



Quarks & Co „Phänomen Licht“



Autoren:

Daniel Münter
Martin Rosenberg
Lars Westermann

Redaktion:

Monika Grebe

Künstliches Licht ist heute ein alltägliches Phänomen: Glühbirnen, Neonröhren und Halogenscheinwerfer helfen uns dabei, trotz Dunkelheit sehen zu können. Aber Licht kann noch mehr.

Quarks & Co stellt Ihnen eine andere, faszinierende Seite des Lichts vor: Wir zeigen, wie Archäologen mit Hilfe von Hologrammen antike Schriftquellen enträtseln und wie man mit einem Nachtsichtgerät auf die Suche nach der absoluten Dunkelheit geht. Außerdem geht es um folgende Fragen:

Wie misst man mit Licht die exakte Entfernung zum Mond?

Und was verrät das Licht über die Sterne?

Wie funktioniert ein optischer Schalter und was haben Kieselalgen damit zu tun?

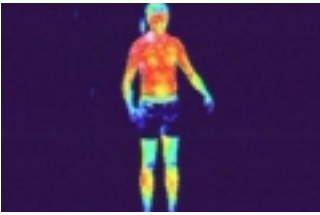
Warum lassen Wissenschaftler Bakterien leuchten?

Und wie kann man damit Schädlinge bekämpfen?

Lassen Sie sich faszinieren vom Phänomen Licht!

Lichtquellen, Temperatur und Farbe

Von Herdplatten und Glühlampen

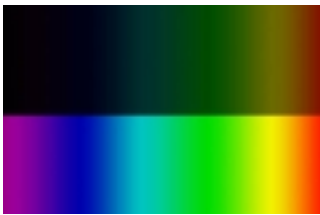


Wärmestrahlung eines Menschen sichtbar gemacht mit einer Infrarotkamera

Wir kennen das aus dem Alltag: eine heiße Herdplatte beginnt rot zu glühen und wird immer gelblicher je heißer sie wird. Das gilt auch für eine einfache Glühlampe. Regelt man den Stromfluss z.B. über einen Dimmer langsam hoch, so beginnt der Glühdraht irgendwann leicht rötlich zu leuchten. Er hat dann etwa eine Temperatur von 800 Grad. Erhöht man den Stromfluss weiter und steigt die Temperatur. Bei einer Temperatur von über 1200 Grad leuchtet der Draht gelblich. Wenn man den Stromfluss schließlich voll aufdreht, wird das Licht fast weiß. (2500 Grad)

Jede Temperatur hat also eine eigene Farbe. Das gilt übrigens nicht nur für Glühdrähte, sondern auch für Menschen. Auf den Bildern einer Infrarotkamera ist die Strahlung sichtbar gemacht, die wir selbst permanent abstrahlen. Da wir aber deutlich kühler sind als die 800 Grad des rotglühenden Drahtes, ist unsere „Farbe“ nicht sichtbar für unsere Augen. Sie ist infrarot.

Das Spektrum



oben:

Farbspektrum bei 800° K

unten:

Farbspektrum bei 2500° K

Genau genommen ist es nicht nur eine Farbe, die ein heißer Körper aussendet, sondern eine Mischung aus verschiedenen Wellenlängen, also verschiedenen Farben. Unser Auge nimmt diese Mischung allerdings als eine einzige Farbe wahr. Welche Wellenlängen in der Mischung enthalten sind kann man sichtbar machen, wenn das Licht durch ein Prisma oder ein Beugungsgitter fällt. Das Licht wird in sein Spektrum zerlegt.

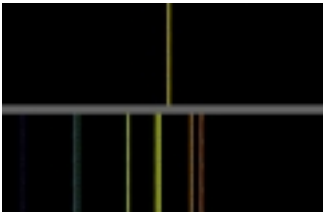
Das Spektrum einer gelblich-weißen Glühlampe zeigt Farben von Blau bis Rot, wobei das Blau deutlich schwächer ist. Wenn man die Temperatur der Lampe und damit ihre Farbe über gelb nach rötlich verändert, so ändert sich auch das Spektrum. Am einen Rand verschwindet langsam das Blau.

Das Sonnenlicht enthält das gesamte Spektrum von Rot bis Violett, denn die Oberflächentemperatur der Sonne liegt bei rund 5500 Grad. Das rötliche Licht der Glühlampe hat hingegen nur wenige Blauanteile, dafür mehr unsichtbares Infrarot. Zu jeder Temperatur gehört also nicht nur eine bestimmte Farbe, sondern ein typisches Spektrum. Das macht sich die Wissenschaft zu Nutze: Aus dem Spektrum des Lichts kann man viel über die Quelle erfahren, auch wenn sie weit, weit entfernt ist. (siehe auch Kapitel „Sternengeflüster“)

Andere Lichtquellen

Neben den Temperaturstrahlern (Glühlampe, Sonne) gibt es noch eine zweite Art Licht zu erzeugen: Durch die Anregung von Atomen. Dieses Prinzip wird zum Beispiel in so genannten Natriumdampflampen eingesetzt, die in Deutschland viele Fußgängerüberwege in gelbes Licht tauchen.

Eine solche Lampe ist mit erhitztem, dampfförmigem Natrium gefüllt. Die Natriumatome schwirren geradezu durch die Gegend. In einem Atom kreisen die Elektronen in definierten Abständen um den Kern. Wenn zwei Natriumatome, quasi in einem Auffahrunfall, kollidieren, wird das äußerste Elektron in eine Bahn geschubst, die weiter vom Atomkern entfernt liegt.



oben:

Spektrum Natriumdampf Lampe

unten:

Spektrum Quecksilberdampf Lampe

Nach kurzer Zeit springt das Elektron wieder auf seine alte Bahn zurück und gibt dabei ein Lichtteilchen ab. Die Farbe des abgegebenen Lichtteilchens hängt vom Abstand zwischen den Bahnen ab. Beim Natrium ist dieses gelb. Im Gegensatz zum gelben Licht einer Glühlampe lässt sich dieses „atomare“ Licht nicht aufspalten. Es besteht wirklich nur aus einer Wellenlänge (Farbe). Bei größerem Druck in der Dampf Lampe reicht der Stoß zweier Natriumatome aus, um es auf eine noch weiter außen gelegene Bahn zu stoßen. Bei der Abregung kann man noch eine weitere Farbe beobachten.

Da die Abstände der Bahnen für jedes chemische Element anders ist, lässt sich aus den Linien des Spektrums auf die Art des Atoms rückschließen, denn jedes Element produziert typische Linien. Mit einer Quecksilberdampf Lampe erzeugt man zum Beispiel eine ganze Reihe von Linien im sichtbaren Bereich. Ihre Mischung wirkt auf unser Auge übrigens bläulich weiß.

Daniel Münter

Welle und Teilchen

Geschichte

Schon seit über 300 Jahren gibt es einen Disput darüber, was Licht eigentlich ist. Ende des 17. Jahrhunderts gab es zwei Hauptkontrahenten: Der große Naturforscher Isaac Newton war Verfechter der Teilchentheorie, der Niederländer Christiaan Huygens stand für die Wellentheorie. Newton setzte sich aufgrund seiner Autorität durch.

Die wissenschaftliche Meinung schlug erst um, als Thomas Young 1801 die Ergebnisse seines Doppelspaltversuchs veröffentlichte. Das Licht zeigte dabei Interferenzeigenschaften. Bei der Interferenz überlagern sich zwei Lichtquellen so, dass sie sich gegenseitig verstärken oder auslöschen. Eine klassische Erklärung für dieses Phänomen ist nur im Wellenbild möglich.

Das Doppelspaltexperiment



Interferenzmuster

Der Aufbau des Doppelspaltversuchs ist ziemlich einfach: eine Fläche mit zwei dünnen Schlitzen wird mit Licht bestrahlt. Das Licht, das durch die beiden Schlitze getreten ist, fällt auf einen Schirm. Würde Licht aus Teilchen bestehen, die sich wie kleine Schrotkugeln verhalten, so wäre der Ausgang des Experiments klar. Auf dem Schirm müssten sich zwei helle Streifen abzeichnen. Was man tatsächlich sieht, ist aber radikal anders. Auf dem Schirm entsteht ein regelmäßiges Muster aus hellen und dunklen Streifen. Der hellste Streifen liegt genau in der Mitte zwischen beiden Spalten. Dieses Verhalten lässt sich nur im Wellenbild erklären: Wenn sich zwei Lichtstrahlen der gleichen Wellenlänge überlagern, dann entsteht nicht notwendigerweise mehr Helligkeit. Es kommt darauf an, wie Wellenberge und Wellentäler der beiden Lichtwellen zueinander liegen. Fällt Wellenberg auf Wellenberg, dann verstärkt sich das Licht; fällt Wellental auf Wellenberg, so können sich die beiden Lichtwellen gegenseitig auslöschen. Diesen Effekt der Überlagerung von Wellen nennt man „Interferenz“.

Moderne Experimente



Auch einzelne Lichtteilchen bilden ein Interferenzmuster

Heute kann man den Doppelspaltversuch mit einzelnen Lichtteilchen (Photonen) durchführen, d.h. wenn man statt eines einfachen Schirms einen empfindlichen Detektor verwendet, so kann man einzelne Photonen auftreffen sehen. Das scheint gegen das Wellenmodell und für das Teilchenmodell zu sprechen. Wartet man aber lange genug, so bildet sich wieder das Interferenzmuster. Man sieht einzelne Lichtteilchen, das Gesamtverhalten ist aber das einer Welle. Entsteht das Photonenmuster vielleicht durch die Wechselwirkung der Photonen mit der Apparatur, also durch Kollision mit den Spalträndern? Dann müsste das Interferenzmuster auch entstehen, wenn man erst nur den einen Spalt und dann nur den anderen Spalt öffnet.

Fehlanzeige: das Hell-Dunkel-Verhalten auf dem Schirm sieht dann aus, als ob Lichtwellen erst durch den einen und dann durch den anderen Spalt geschickt wurden: Auf dem Schirm bzw. im Detektor entstehen nur noch zwei helle Abbilder der Spalte.

In immer raffinierteren Experimenten haben die Physiker versucht, einem verborgenen Mechanismus auf die Spur zu kommen, der die Lichtteilchen dazu zwingt, sich wie Wellen zu verhalten. Die Bemühungen waren bislang vergeblich und heute scheint festzustehen: In der merkwürdigen Welt der Quantenphysik ist Licht weder Welle noch Teilchen – oder beides: Teilchen mit Welleneigenschaften.

Daniel Münter

Biologisches Licht als Werkzeug der Wissenschaft



Glühwürmchen benutzen die Biolumineszenz zur Partnersuche

In warmen Sommernächten schweben sie flimmernd über unseren Wiesen: Glühwürmchen. Sie leuchten nicht zu unserem Vergnügen, sondern weil sie auf Partnersuche sind: Auf diese Weise machen sie Artgenossen auf sich aufmerksam.

Das Licht produzieren sie selbst – Biolumineszenz nennen die Wissenschaftler dieses Phänomen. Aber nicht nur Glühwürmchen können von selbst leuchten: Auch manche Tiefseefische besitzen Leuchtorgane, mit denen sie Beute anlocken. Daneben gibt es biolumineszente Bakterien, Algen (Meeresleuchten) und Pilze. Eine Eiweiß-Enzym-Reaktion ist für die Lichtproduktion verantwortlich. Die verwendeten Eiweiße heißen Luciferin, die Enzyme Luciferase.

Leuchtende Bakterien gegen Apfelschorf

Die Idee, das Licht dieser Organismen für Forschungszwecke zu nutzen, ist schon älter. Wenn man bestimmte Mikroorganismen zum Leuchten brächte, dachten die Wissenschaftler, könnte man sie im Dunkeln ganz einfach durch ihre Strahlung erkennen. Besiedelungen mit Mikroorganismen wären dann auf den ersten Blick – ohne aufwändige Tests – festzustellen.



Jede Pflanze wird einmal täglich fotografiert. Dafür hat Achim Gau eine spezielle Apparatur entwickelt

Genau das hat die moderne Molekularbiologie jetzt möglich gemacht. In Hannover haben Biologen und Chemiker das Luciferin-Gen eines leuchtenden Bakteriums auf einen Bakterienstamm übertragen, der auf Apfelbäumen wächst. Dieser Bakterienstamm ist für die Forscher deshalb interessant, weil er den Apfelbaum vor dem Befall mit Apfelschorf schützt. Der Apfelschorf ist ein Pilz der ganze Ernten vernichten kann. Haben die Bakterien den Baum schon besetzt, ist für den Pilz dort kein Platz mehr.

Bakterien beim Wachsen beobachten



Beim richtigen Klima besiedeln die Bakterien den Apfelbaum sehr schnell. Dank des Leucht-Gens kann man sie dabei beobachten

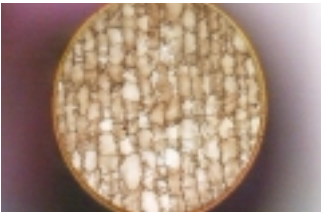
Die Wissenschaftler wollen nun herausfinden, wann der beste Zeitpunkt ist, um die Bakterien auf den Apfelbäumen anzusiedeln. Dazu geben sie Tropfen mit den schützenden Bakterien auf kleine Apfelbäume und stellten diese in eine Klimakammer. Dann testeten sie, unter welchen klimatischen Bedingungen sich die Bakterien am besten vermehren. Täglich macht eine lichtempfindliche Kamera von den Bäumchen ein Foto in einer dunklen Kammer. So können die Forscher sehen, wie sich die Bakterien auf der Pflanze ausbreiten.

Ziel dieser Untersuchung ist, den Bakterien einen so großen Startvorteil vor dem Apfelschorf zu verschaffen, dass sie als natürlicher Pflanzenschutz eingesetzt werden können und chemische Pilzbekämpfungsmittel überflüssig machen.

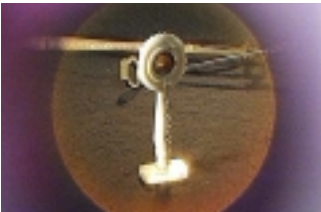
Lars Westermann

Meilensteine der Lichtmikroskopie

Erste Entdeckungen



In einer dünnen Korkscheibe lassen sich einzelne Zellen genau erkennen



Einzelne Linse mit kunstvoll gearbeiteter Elfenbeinfassung – ein frühes Mikroskop

Robert Hooke (1635-1703) war einer der Wegbereiter der mikroskopischen Forschung. Er experimentierte mit Kombinationen aus zwei Linsen und veröffentlichte seine Beobachtungen von Nadelspitzen und Rasiermessern, Insektenaugen, Haaren und anderen Dingen 1665 in seinem Werk *Micrographia*. Hooke betrachtete auch dünne Scheiben, die er aus einem Flaschenkorken geschnitten hatte, und erkannte dort winzige Kammern. Er nannte sie „cellulae“, zu Deutsch: „Zellen“ – doch es dauerte noch fast 200 Jahre, bis die Zelle als Grundbaustein des Lebens erkannt wurde.

Mini-Mikroskope mit nur einer einzigen, extrem winzigen Linse konstruierte der niederländische Stoff-Händler Antonie van Leeuwenhoek (1632-1723). Er erreichte bis zu 270fache Vergrößerungen und beobachtete Flöhe, Fliegen und Blutropfen. 1674 sah er unbekannte winzige Lebewesen. Erst viel später stellte sich heraus, dass das wohl Bakterien gewesen sein mussten.

Viele Versuche

Große wissenschaftliche Fortschritte brachten die Mikroskope im 18. Jahrhundert nicht. Denn die Linsen hatten unschöne Nebeneffekte: Ihre Bilder waren an den Seiten verzerrt und unscharf und die Objekte hatten farbige Säume. Die Mechaniker und Linsenschleifer in jener Zeit bemühten sich, die Abbildungen zu verbessern. Nach vielen Versuchen fanden sie heraus, dass sie die Farbsäume durch die Kombination verschiedener Glastypen reduzieren konnten. Die Kombination mehrerer schwacher Linsen konnte die Unschärfen am Rand beheben.

Mathematische Berechnung

Der Physiker Ernst Abbe und der Mechaniker Carl Zeiss konstruierten ab 1860 gemeinsam Mikroskope, die auf mathematischen Berechnungen basierten. 1872 kam das erste Präzisionsmikroskop aus der Werkstatt Zeiss auf den Markt. Die Abbildungsfehler konnten auf ein Minimum reduziert werden. Abbe berechnete auch, welche Größe mikroskopische Strukturen haben müssen, damit sie vom Mikroskop noch abgebildet werden können: 200 nm (0,2 Tausendstel Millimeter) ist die Untergrenze – das so genannte Abbe-Limit.

Auch das Ölimmersionsmikroskop erfand Abbe: Er füllte Öl zwischen Objekt und Objektiv und konnte so die Auflösung verbessern. Mit einem solchen Mikroskop entdeckte Robert Koch die Tuberkelbazillen.



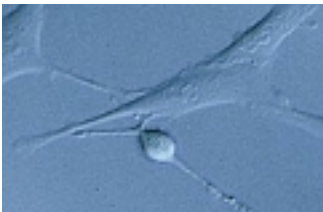
Neuronen im Hellfeld – kaum zu erkennen

Besserer Kontrast

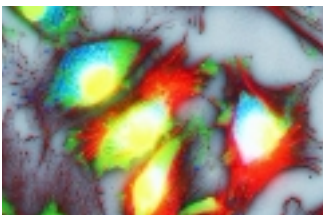
Bis zu dieser Zeit konnten Mikroskope nur durchsichtige Proben abbilden. Die Wissenschaftler mussten deshalb ihre Proben entsprechend präparieren und einfärben. Wollten sie lebende Zellen beobachten, musste der Kontrast verstärkt werden.



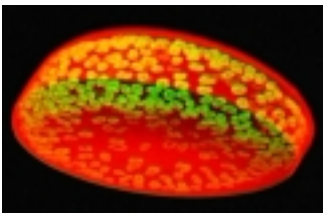
Neuronen im Phasenkontrast: Kleine Details sind deutlich zu sehen



Neuronen im Interferenzkontrast – hier entsteht ein räumlicher Eindruck



Verschiedene Bestandteile einer menschlichen Endothelzelle können mit unterschiedlichen Farben sichtbar gemacht werden



Eine Kieselalge unter dem konfokalen Lasermikroskop

Frits Zernike entwickelte dazu um 1936 das Phasenkontrastmikroskop und erhielt 1953 dafür den Nobelpreis: Zwei ringförmige Blenden setzen unterschiedliche Brechungsindizes des Untersuchungsobjektes in unterschiedliche Helligkeitswerte um. Dadurch wird das Bild wesentlich schärfer. Die Wissenschaftler waren mit dieser Erfindung einen wesentlichen Schritt weiter: Sie konnten sogar lebende Zellen während der Teilung beobachten.

Eine zweite Methode zur Verbesserung des Kontrastes wurde von dem Franzosen Georges Nomarski entwickelt. Er schob zwei Prismen in den Strahlengang und machte so Unterschiede in der Dicke der Proben sichtbar. Mit dem Interferenz-Kontrast-Mikroskop entstehen reliefartige Bilder. Diese Art der Mikroskopie gehört heute zu den Standard-Abbildungsverfahren.

Fluoreszenz

Manche Moleküle (zum Beispiel der Blattfarbstoff Chlorophyll) strahlen bei Beleuchtung mit Licht einer bestimmten Wellenlänge gleichzeitig Licht einer anderen, größeren Wellenlänge ab. Dieses Phänomen heißt Fluoreszenz. Da fluoreszierende Objekte nur sehr schwach leuchten, reduzieren Filter in Fluoreszenz-Mikroskopen das einfallende Licht genau auf die Wellenlängen, die nötig sind, um die Fluoreszenz zu erzeugen.

Laser-Mikroskopie

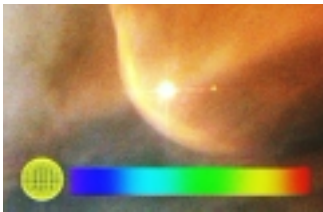
Der Laser bringt einen weiteren Vorteil in die Lichtmikroskopie: Das konfokale Laserscanning-Mikroskop (CLSM) tastet einzelne Punkte der Probe auch weit unter der Oberfläche ab und filtert durch geeignete Blenden störendes Streulicht heraus. Dadurch werden dreidimensionale Bilder erzeugt. An der Weiterentwicklung dieses Prinzips arbeiten Forscher des Max-Planck-Instituts für biophysikalische Chemie in Göttingen: Sie können mittlerweile sogar die von Abbe berechnete Grenze für die lichtmikroskopische Auflösung unterschreiten. Statt 200 nm erreichen sie bereits Größenordnungen von 100 nm – und in der Theorie sind sogar 10 nm möglich.

Martin Rosenberg

Sternengeflüster

Beinahe alles, was wir heute über das Universum wissen, haben wir aus dem Licht gelernt, das Himmelsobjekte – zum Teil vor langer Zeit – ausgesandt haben. Durch Aufzeichnen und Analysieren des Lichts erfahren Astronomen etwas über die Distanz, Bewegung, Temperatur, Dichte und chemische Zusammensetzung der Himmelsobjekte.

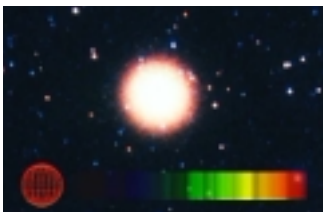
Die Farbe



Der Stern Rigel hat eine Oberflächentemperatur von 15000 Grad.

Aus dem Farbspektrum eines Sterns lässt sich seine Temperatur erkennen. Das gilt nicht nur für Sterne, sondern für alle heißen Objekte. (siehe auch Kapitel „Farbe und Temperatur“). Ein glühender Draht leuchtet erst rot, dann gelb, weiß und schließlich bläulich. Dieses Licht lässt sich ebenso wie das Licht der Sterne mit einem Spektrometer in seine Bestandteile aufspalten. Je heißer ein Stern ist, desto stärker sind die blauen Anteile in seinem Spektrum. Bei „kühlen“ Sternen dominiert hingegen der Rotanteil. Die Astronomen ordnen jeden Stern einer so genannten Spektralklasse zu.

Die Leuchtkraft

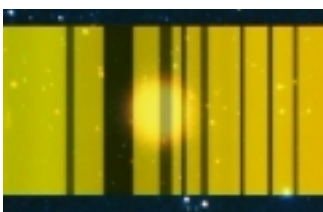


Der Stern Beteigeuze hat eine Oberflächentemperatur von 3000 Grad.

Die Leuchtkraft eines Sterns erlaubt Rückschlüsse auf die Masse: Für die meisten Sterne gilt die Faustregel: Je heller desto schwerer und heißer. Es gibt aber auch Ausnahmen von dieser Regel: Der rote Riesenstern Beteigeuze ist 6000mal heller, aber nur halb so heiß wie unser Stern, die Sonne. Man nennt Sterne seines Typs „Rote Riesen“.

In der Astronomie ist es üblich, die Sterne in ein so genanntes „Hertzsprung-Russell“-Diagramm einzutragen, dass auf der einen Achse die Spektralklasse und auf der anderen die Leuchtkraft anzeigt. Sterne, die der Faustregel folgen, liegen auf einer Linie und heißen auch „Hauptreihensterne“. Sterne wie Beteigeuze liegen auf dem „asymptotischen Riesenast“.

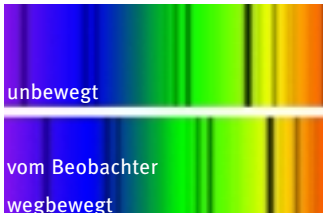
Chemische Zusammensetzung



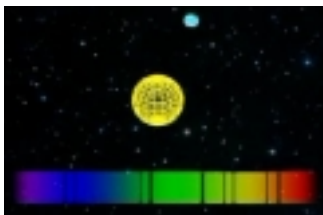
Feine Lücken im Spektrum verraten die chemische Zusammensetzung

Das Spektrum eines Sterns weist charakteristische Linien auf, welche die chemische Zusammensetzung seiner Atmosphäre verraten: Die Elemente der äußeren Sternenschichten verschlucken das Licht bestimmter Wellenlinien. Dieser Mechanismus ist der umgekehrte Effekt zur Erzeugung von Licht durch die Anregung von Atomen (siehe auch Kapitel „Farbe und Temperatur“). Jeder chemische Stoff schluckt eine ganz bestimmte Reihe von Wellenlängen – es hinterlässt quasi einen Fingerabdruck im Sternenlicht. In jungen Sternen findet sich fast nur Wasserstoff und Helium. Wenn der Stern altert, werden auch schwerere Elemente produziert. Der Fingerabdruck im Sternenlicht sagt also auch etwas darüber aus, wie lange ein Stern noch zu leben hat.

Planeten



Der so genannte Dopplereffekt verrät die Geschwindigkeit, mit der sich der Stern von uns weg bewegt. Je schneller er „flieht“, desto stärker sind die Absorptionslinien in seinem Spektrum in Richtung rot verschoben. Mit dieser Methode lässt sich auch die Distanz entfernter Galaxien bestimmen, denn je weiter ein Stern von uns entfernt ist, desto schneller bewegt er sich von uns weg. Grund dafür ist die Ausdehnung des Raumes.



Der Stern HD33636 verrät seinen Planeten durch das „Wobbeln“ der Absorptionslinien.

Bei manchen Sternen lässt sich ein ganz leichtes Wackeln der Linien beobachten. Sie wandern oft innerhalb von mehreren hundert Tagen einmal minimal hin und her. Dieses „Wobbeln“ der Spektrallinien lässt die Astronomen vermuten, dass der Stern einen oder mehrere Planeten besitzt: Im Rhythmus seines Umlauf verschieben sich die Linien – eine sehr schwache Variante des Dopplereffekts. Die Stärke und Frequenz des „Wobbelns“ lässt sogar Schlüsse auf die Größe und Umlaufbahn der Planeten zu. Mit dieser Methode hat man in den vergangenen Jahren etliche Planeten aufgespürt.

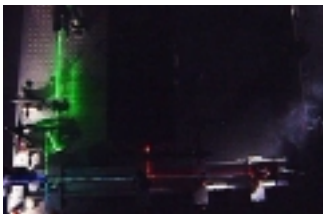
Daniel Münter

Moderne Holographie und mesopotamische Keilschriften

Keilschriften aus Mesopotamien nehmen in der Forschung der Altorientalisten eine wichtige Stellung ein: Die mehrere tausend Jahre alten Texte verraten viel über das damalige Leben der Menschen im Zweistromland.

Doch die Tafeln mit den Keilschriften sind inzwischen auf Museen in der ganzen Welt verteilt: Oft liegt ein Fragment in den USA, ein anderes in Europa und ein drittes in einem orientalischen Land. Deshalb fertigt man von den Schrifttafeln zu Forschungszwecken gerne Kopien an. Das hat den Vorteil, dass mehrere Wissenschaftler auf der ganzen Welt gleichzeitig an den Tafeln arbeiten können und die Originale in den Museen bleiben. Allerdings sind Nachbildungen aus Gips praktisch nicht herzustellen und gewöhnliche Fotos reichen für die Untersuchungen nicht aus.

Physiker kopieren die Keilschriften mit Laserlicht



Dank einer präzisen Strahlenführung werden ein grüner, ein blauer und ein roter Laser zu weißem Licht vereinigt



Das weiße Licht wird vom Spiegel auf die Glasplatte gelenkt, fällt durch sie hindurch und wird von der darunter liegenden Keilschrift auf die Glasplatte zurückgeworfen. So wird die lichtempfindliche Glasplatte zweimal belichtet.

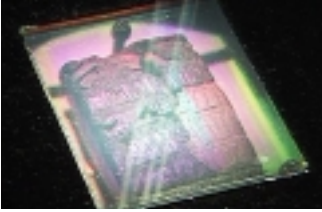
Aus diesem Grund haben die Wissenschaftler am Labor für Biophysik in Hannover zusammen mit dem Marburger Altorientalisten Professor Walter Sommerfeld ein Verfahren zur Holographie von mesopotamischen Keilschriften entwickelt. Sie fertigen hochauflösende, dreidimensionale Photographien in den Originalfarben an.

Im Labor werden dank einer präzisen und komplizierten Strahlenführung drei Laserstrahlen vereinigt. Sie bestehen aus Licht in den drei Grundfarben. Ein grüner Laser wird zunächst mit einem blauen gemischt, etwas später kommt noch ein roter dazu. Richtig vermischt entsteht jetzt weißes Licht.

Der weiße Lichtstrahl wird aufgeweitet und auf einen Spiegel gelenkt. Dieser wirft das Licht auf eine lichtempfindliche Glasplatte, die die Funktion des Films bei der herkömmlichen Fotografie hat. Der vom Spiegel reflektierte Strahl belichtet die Glasplatte zum ersten Mal. Da die Glasplatte durchsichtig ist, geht das Licht durch sie hindurch - und fällt auf die darunter liegende Keilschrift. Sie wirft das Licht von unten auf die Glasplatte zurück. Auf diese Art wird die Platte ein zweites Mal belichtet. Durch die Belichtung von zwei Seiten entsteht in der Glasplatte ein Interferenzmuster, das mit einem Mikroskop sichtbar gemacht werden kann. Vorher muss die Aufnahme allerdings - wie bei einem normalen Foto auch - entwickelt werden.

Nicht greifbar: Kopien aus Licht

Wird die Platte nun mit weißem Licht bestrahlt, erkennt man mit bloßem Auge die Keilschrift in dreidimensionaler Darstellung: Sie sieht dem Original zum Verwechseln ähnlich.



Das Hologramm hat fast alle Eigenschaften des Originals und sieht ihm zum Verwechseln ähnlich

Diese Kopien eignen sich hervorragend für die Forschungsarbeiten der Altorientalisten: Die Auflösung der Hologramme ist so gut, dass die Wissenschaftler mit dem Mikroskop sogar die Oberflächenstruktur der Keilschrift untersuchen können.

Nur eines leisten die Hologramme nicht: Man kann sie nicht betasten, denn sie bestehen nur aus Licht.

Lars Westermann

Kieselalgen und photonische Kristalle

Datenträger Licht

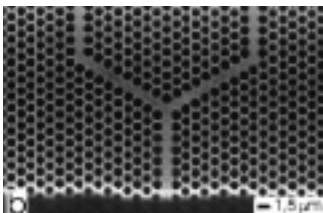


Hunderttausende von Kilometern Glasfaserkabel verbinden die Kontinente

Mit Licht lassen sich große Datenmengen wesentlich schneller übertragen als mit Strom. Dafür gibt es einige Gründe: Glasfasern leiten Lichtsignale fast mit Lichtgeschwindigkeit weiter, während der Strom in Kupferkabeln nur etwa ein Zehntel dieser Geschwindigkeit erreicht. Beim Strom sind Leitungsverluste vor allem bei langen Kabeln durch den hohen Widerstand immens – in Glasfasern geht nur wenig Information verloren. Glasfasern können außerdem zu Hunderten in ein Bündel gepackt werden, ohne dass sich die einzelnen Lichtstrahlen gegenseitig beeinflussen. Beim Kupferkabel hingegen muss jede einzelne Ader gut abgeschirmt sein, damit das durch den Strom aufgebaute Magnetfeld die Informationen in den Nachbaradern nicht beeinflusst. Alles gute Gründe dafür, dass Telefongespräche, Webseiten, Fotos und Musik zwischen den Kontinenten per Glasfaser übertragen werden.

Achillesferse im Netz

Doch das weltweite Netz hat Schwachstellen: Die Knotenpunkte, an denen die Lichtblitze in elektronische Signale umgewandelt werden. Der Vorgang kostet viel Zeit und Energie. Forscher in aller Welt sind deshalb auf der Suche nach einem optischen Schalter, der die Lichtimpulse so umschalten und verteilen kann, wie ein Transistor die Ströme in elektrischen Schaltungen lenkt. In Abhängigkeit von der Wellenlänge des eingestrahlt Lichts müsste ein optischer Schalter in der Lage sein, Lichtströme zu reflektieren, umzulenken und weiterzuleiten. Ein Schaltelement, das diese Eigenschaften aufweist, bezeichnet man als photonischen Kristall. Wäre er so weit entwickelt, dass man ihn in den Netzknotenpunkten einbauen kann, wären weitere Anwendungen denkbar: Auch Computerchips könnten dann auf optischer Lichtverarbeitung aufbauen – der Computer wäre ohne Strom viel schneller.



Forscher vom Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik Halle haben solche Strukturen künstlich hergestellt

Die Suche nach dem photonischen Kristall

Theoretisch weiß man schon viel über den photonischen Kristall. Im Prinzip ist er ein optisches Gitter, bei dem die Gitterabstände im Bereich der Wellenlänge des Lichts liegen – also um die 500 nm. Forscher konnten sogar Prototypen von einzelnen photonischen Kristallen herstellen, zum Beispiel am Max-Planck-Institut für Mikrosystemtechnik in Halle, allerdings mit immensem Aufwand, denn die winzigen Kristallstrukturen müssen mühsam Stück für Stück aufgebaut werden.



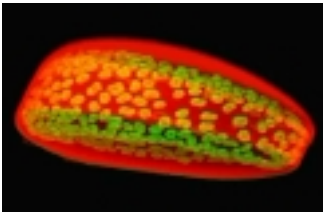
Können die kleinen Einzeller helfen, die Computertechnik zu revolutionieren?

Vorbild in der Natur

Nanoforscher in Kassel haben entdeckt, dass die Natur solche Strukturen schon längst erfunden hat: Kieselalgen haben ein Muster aus winzigen Löchern in der Schale, die genau die richtige Größe und die richtige Anordnung zeigen, die ein photonischer Kristall haben muss. Die Kasseler Forscher vermuten, dass diese Anordnung kein Zufall ist.



Kieselalgen können einstrahlendes Licht (hier von rechts) in der Schale einfangen wie eine Glasfaser



Die Kieselalge hat schon lange den Trick raus, wie sie das Licht optimal auf ihre Chloroplasten (grün) lenken kann.

Sie nehmen an, dass die Kieselalgen die photonische Kristallstruktur dazu nutzen, um Licht einzusammeln und zu bündeln, das die Lebewesen für die Photosynthese brauchen.

Kieselalgen sind Einzeller mit einer Schale aus Glas. Man schätzt, dass sie rund ein Viertel des Sauerstoffes auf der Erde produzieren. Sie treiben als Plankton im Meer und bilden dort den Anfang der Nahrungskette. Auch in jedem Fluss, Bach, See und Tümpel leben sie – der Vorrat ist praktisch unerschöpflich. Kieselalgen galten bisher auch als ideale Testobjekte für die Entwicklung hochauflösender Mikroskope, denn ihre feine Kristallstruktur stellt höchste Anforderungen an jedes optische Instrument. Sie lassen sich nur schwer scharf stellen und schillern in allen Regenbogenfarben – ein Umstand, der Biologen immer stört, denn er macht ihre Beobachtung schwierig. Für die Nanoforscher sind diese optischen Effekte jedoch genau das, was die Kieselalgen für sie so interessant macht. Jetzt müssen sie „nur“ noch herausfinden, wie die Bündelung und Sammlung des Lichts in der Kieselalge im Detail funktioniert.

Martin Rosenberg

Spiegel auf dem Mond

Die Lichtgeschwindigkeit



Messapparatur von A. H. Fizeau zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit

Im Jahr 1849 gelang dem Franzosen Armand Hippolyte Fizeau zum ersten Mal in einem Laufzeit-Experiment die Lichtgeschwindigkeit zu messen. Mit Hilfe einer ausgeklügelten Apparatur ermittelte er die Zeit, die das Licht brauchte, um eine Strecke von gut 8 Kilometern zurückzulegen. Seine Nachfolger vermessen die Lichtgeschwindigkeit mit immer höherer Genauigkeit, bis sie Mitte des 20. Jahrhunderts feststellten, dass sie die Zeit für den Laufweg des Lichtes viel besser bestimmen konnten als dessen Länge. Also drehte man den Spieß einfach um: Man legte die Lichtgeschwindigkeit ein für alle Mal auf 299 792 458 Meter pro Sekunde fest. Andersherum gesagt: der Meter wird heute als die Länge des Weges definiert, den Licht im Vakuum in einer Zeit von $1/299\,792\,458$ Sekunden zurücklegt.



Der „Lunar Laser Retro Reflector“ von Apollo 11

Heute benutzt man die genaue Messung der Lichtlaufzeit beim Bau großer Staudämme und Brücken und auch das Satellitennavigationssystem GPS funktioniert mit dieser genauen Konstante. Im Juli 1969 begann aber eine ganz besondere Ära der Entfernungsmessung, von der so mancher Wissenschaftler schon lange geträumt hatte.

Die Spiegel



Der Spiegel wird aufgestellt

Bei drei verschiedenen Mondmissionen (Apollo 11, 14 und 15) haben amerikanische Astronauten „Spiegel“ auf dem Mond zurückgelassen. Diese Reflektoren arbeiten nach dem Katzenaugenprinzip, d.h. sie werfen das Licht dorthin zurück, von wo sie es empfangen. Mit ihnen ist eine genaue Bestimmung der Mondentfernung möglich und wird auch seit 1969 kontinuierlich durchgeführt.

Die Messung



Das Laser-Observatorium in der Nähe von Grasse, Frankreich

Wir haben die Forscher im Observatoire de la Côte d'Azur bei Grasse in Südfrankreich besucht und bei einer Messung des Mondabstandes beobachtet. Sie schießen einen starken Laserstrahl auf den Mond und messen die Zeit, die das Licht für Hin- und Rückweg braucht. Der Mond ist im Mittel 384.000 Kilometer von der Erde entfernt – das Licht braucht für diese Strecke rund 2,5 Sekunden. Die Wissenschaftler messen die Laufzeit auf 0,1 Nanosekunden (ein Zehntel einer Milliardstel Sekunde) genau und können so die Entfernung des Mondes bis auf drei Zentimeter ermitteln.

Dieses einfache Prinzip ist aber nur schwer zu erreichen: Die Spiegel haben eine Fläche von jeweils einem Quadratmeter und sind in keinem Teleskop zu erkennen. Die Forscher tasten sich jedes Mal an die richtige Position heran, denn sie kennen die Entfernung von bestimmten Mondkratern. Von Vorteil ist dabei, dass sich der Strahl auf seiner Reise zwangsweise aufweitet. Wenn er die Station verlässt ist er 1,5 Meter breit, auf dem Mond rund 10 Kilometer. Die Wissenschaftler schießen also nur in die „vage“ Richtung. Dieser Vorteil ist aber auch ein Nachteil.

Von den 10 000 000 000 000 000 (10 Trillionen) Photonen eines Laserpulses findet meist gerade eines den Weg zurück in das Teleskop. Dieses Signal zu entdecken ist eine messtechnische Meisterleistung, die aber regelmäßig gelingt. Wenn die Erdatmosphäre aber zu unruhig ist oder durch nahe Orte oder auch den Mond selbst zuviel Streulicht in das Teleskop fällt, kann eine Messung aber auch scheitern.

Die Wissenschaft



Auch in Wettzell, Bayern, wird die Entfernung zum Mond gemessen.

Die Messungen, die nur an vier Orten der Welt so durchgeführt werden, sind eine wichtige Informationsquelle für verschiedene wissenschaftliche Bereiche. So lässt sich mit ihnen die Veränderung der Tageslänge und die mit ihr verbundene Entfernung des Mondes von der Erde beobachten (im Moment rund 3,8 Zentimeter pro Jahr), die Relativitätstheorie testen und die Geologie des Mondes und der Erde erkunden. Selbstverständlich schlagen sich auch der Gezeitenhub und die Drift der Kontinentalplatten in den Messungen nieder.

Daniel Münter

Lesetipps

„Auf der Suche nach Schrödingers Katze Quantenphysik und Wirklichkeit“

Unterhaltsame und spannende Einführung in die seltsame Welt der Quanten.

Autor: Gribbin, John
Verlagsangaben: Piper/KNO, ISBN: 3-492-21353-7
Sonstiges: Preis 9,90 Euro

„Schrödingers Kätzchen und die Suche nach der Wirklichkeit“

Fortsetzung und Aktualisierung des ersten Bandes

Autor: Gribbin, John
Verlagsangaben: Fischer/S, ISBN: 3-596-14151-6
Sonstiges: Preis 9,90 Euro

Linktipps

Licht allgemein

Kompakte Zusammenstellung zur Spektralanalyse

http://www.gmbasel.ch/spekt_an.html

Wie die Farben in unserem Auge und Gehirn entstehen. Tiefgehender Text zur Farbwahrnehmung

<http://www.allpsych.uni-giessen.de/karl/teach/farbe.html>

Gute Übersicht zur Doppelnatur des Lichts

<http://www.weltderphysik.de/themen/quanten/licht/welle-teilchen/index.html>

Doppelspalt-Experiment mit einzelnen Photonen an der Uni Bonn.

<http://www.iap.uni-bonn.de/P2K/schroedinger/klicker.html>

Erklärungen und interaktive Experimente des „Münchner Internet-Projekts zur Lehrerfortbildung in Quantenmechanik“

<http://www.cip.physik.uni-muenchen.de/~milq/kap3/k3opo1.html>

Einführender Text zu Linienspektren

<http://www.eduvinet.de/gebhardt/astronomie/spektrum.html>

Apfelbaum

Das Projekt der Uni-Hannover ausführlich:

http://www.uni-hannover.de/en/aktuell/veroeff/www_uni_mag3-4_2001/artikel/arto5_gau.htm

Wie leuchten die Glühwürmchen?

<http://www.vcell.de/genomstation/biolumineszenz.ht>

http://www.faunistik.net/DETINVERT/PHYSIOLOGY/BIOLUMINISZENZ/bioluminis-zenz_01.html

Alles über Biolumineszenz und Chemolumineszenz: Mechanismus, Vorkommen und Anwendungen in der Forschung. Ausserdem schöne Aufnahmen lumineszierender Organismen

<http://141.35.2.84/chemie/institute/oc/weiss/lumineszenz.htm>

Eine ästhetisch gestaltete Seite über Biolumineszenz. Hier erfährt man etwas über die Chemie der Biolumineszenz. Lernt viele leuchtende Tierarten kennen und kann sich über evolutive Hintergründe der Biolumineszenz informieren. Ausserdem schöne Fotos leuchtender Fische und anderer Tiere.

<http://www.lifesci.ucsb.edu/~biolum/>

Sternengeflüster

Kompakte Infos zur Spektralanalyse
http://www.gmbasel.ch/spekt_an.html

Beispiele zur Analyse des Sternenlichts von der Universität Erlangen
http://www.sternwarte.uni-erlangen.de/www/tot/spekt/tot_l.html

Erklärung und Beschreibung der Spektralklassen
<http://www.emt.tu-graz.ac.at/~stav/astrolex/de/spektralklassen.html>

Beispiele für die Spektren verschiedener Spektralklassen
<http://www-astronomy.mps.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Unit1/SpTypes/>

„The Extrasolar Planets Encyclopaedia“ – Umfassende Infos zu Planeten in anderen Sonnensystemen (Englisch)
<http://www.obspm.fr/encycl/encycl.html>

Erklärung zur Methode der Planetenentdeckung
<http://exoplanets.org/doppler.html>

Beschreibung der zweiten Methode extrasolare Planeten zu entdecken: der Transitmethode
http://www.pro-physik.de/Phy/External/News/phy_print/1,,2-0-0-0-1,00.html?recordId=2298&table=NEWS&newsPageId=15954

Seiten der NASA zu extrasolaren Planeten mit vielen multimedialen Angeboten (Englisch)
http://planetquest.jpl.nasa.gov/gallery/gallery_index.html

Meilensteine der Lichtmikroskopie

Faszinierende Mikroskopaufnahmen von 23 Max-Planck-Gesellschaften unter
<http://www.bilder.mpg.de>

Arbeitsgruppe ‚Hochauflösende Optische Mikroskopie‘ Stefan Hell am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen
<http://www.mpibpc.gwdg.de>

Virtuelle Mikroskopie – auf dieser Seite kann der Besucher eine Fülle verschiedener Mikroskopiermethoden mit Java-Applets selbst ausprobieren: Von verschiedenen einfachen Vergrößerungen über die unterschiedlichsten Beleuchtungs- und Kontrastiermethoden bis hin zu Fluoreszenz- und Laser-Scanning-Mikroskopie.
<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/virtual/virtual.html>

Detaillierte Auflistung der Entwicklungen in der Mikroskopie vom 17. bis zum 20. Jh.
<http://www.mikroskop-museum.de>

Holographie

Das Projekt und weiterführende Forschung:

<http://medweb.uni-muenster.de/institute/biophys/projekt7/projek7.htm>

Eine Seite rund um das Thema Holographie: Geschichte, Funktion, Anwendungen, physikalische Hintergründe:

<http://www.holographie-online.de/>

interaktive Erklärungen von Interferenz:

<http://www.pk-applets.de/phy/interferenz/interferenz.html>

<http://www.walter-fendt.de/ph11d/interferenz.htm>

Hologramme einfach selbst gemacht, wie funktioniert und wie sehen Interferenzmuster aus?

<http://users.aol.com/gykophys/holo/holo.htm>

Augenzeugenbericht und Fotodokumentation von Prof. Walter Sommerfeld über die Zerstörung Altmesopotamischer Kulturgüter im Zusammenhang mit dem Irakkrieg:

<http://www.uni-marburg.de/altorientalistik/krieg.html>

Kieselalgen

Die Homepage der Kasseler Kieselalgen-Nanoforscher: <http://www.physik.uni-kassel.de/mmc/d-main.htm>

Mehr über photonische Kristalle vom Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle:

http://www.mpi-halle.mpg.de/~porous_m/research.htm

Mondspiegel

„Die Hochpräzisionsvermessung der Mondbewegung“ – Ausführliche Beschreibung der Methode und wissenschaftlichen Ziele

<http://alpha.fesg.tu-muenchen.de/fesg/llr.html>

Artikel zum 30jährigen Jubiläum der ersten Mondlandung und dem Beginn des ersten Spiegelexperiments (Englisch)

http://www.space.com/news/spacehistory/apollo_mirror.html

Gut aufbereitete Übersicht zum Thema „Licht als Messwerkzeug“

<http://www.weltderphysik.de/themen/quanten/licht/laser/messtechnik/>

Homepage des „International Laser Ranging Service“

<http://ilrs.gsfc.nasa.gov/>

Erläuterungen zur Methode auf den Seiten des Observatoire de la Côte d'Azur
<http://wwwrc.obs-azur.fr/cerga/laser/laslune/englishintro.htm>

Homepage der deutschen Messstation in Wetzell, Bayern
<http://www.wetzell.ifag.de/>

Impressum:

Herausgegeben
vom Westdeutschen Rundfunk Köln

Verantwortlich
Quarks & Co
Monika Grebe

Autoren
Daniel Münter
Martin Rosenberg
Lars Westermann

Redaktion
Monika Grebe

Gestaltung
Designbureau Kremer & Mahler

Bildrechte
Alle: © WDR

Außer:
Kapitel „Meilensteine der Lichtmikroskopie“:
Bild 3, 4, 5 und 6: © Carl Zeiss AG

Kapitel „Kieselalgen und photonische Kristalle“:
Bild 1: © Alcatel
Bild 2: © Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, Halle

Kapitel „Spiegel auf dem Mond“:
Bild 1: © Universität Oldenburg
Bild 2, Bild 3: © NASA
Bild 4: © Observatoire de la Côte d'Azur
Bild 5: © TU München

© WDR 2003