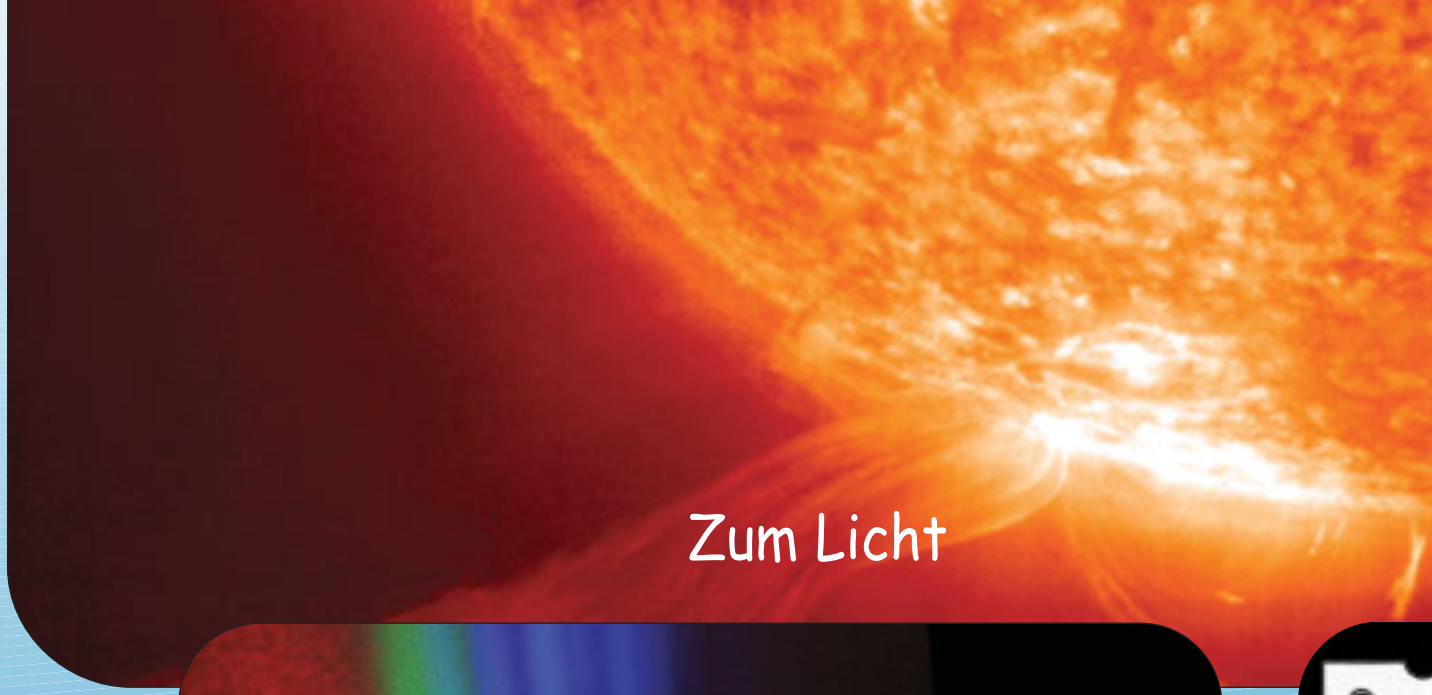
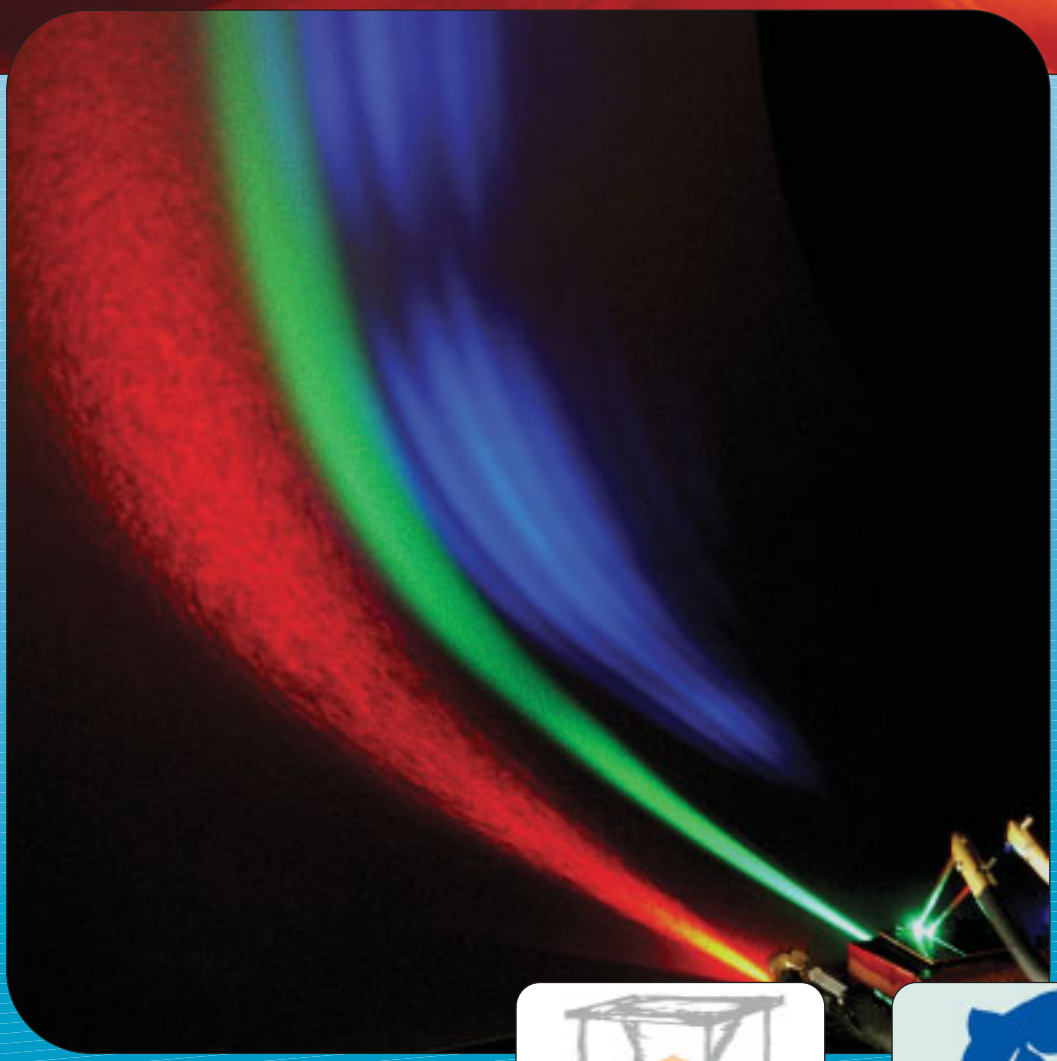


Zum Licht



4 Leben in der Finsternis
Eine Reise in die Tiefsee

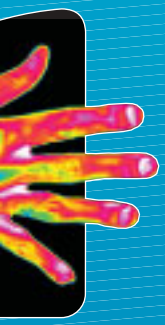
20 Lineale aus Licht
Was nach dem Urmeter kam

23 Verräterisches Leuchten
Dem Krebs auf der Spur

30 „Mehr Rot als nur ein Tropfen"
Ein Interview zwischen Physik und Kunst

46 Es war einmal ... Es wird einmal
Die Lampenwelt der Zukunft

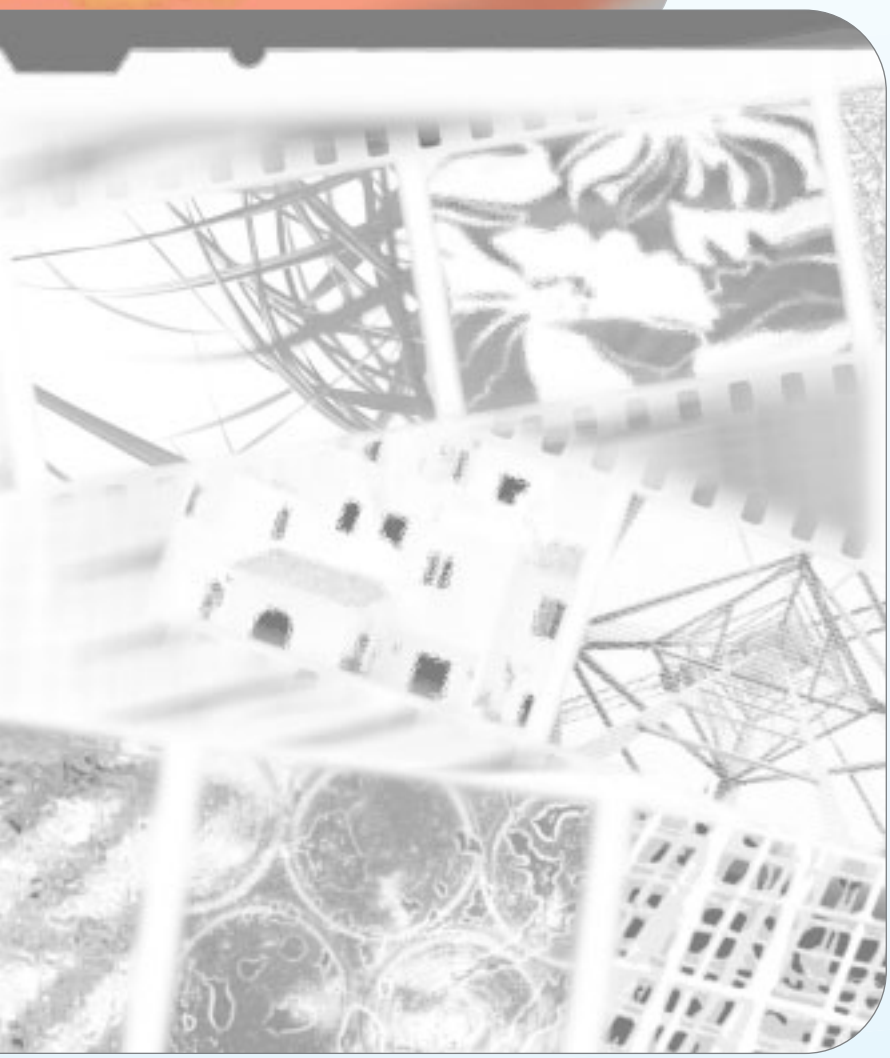
50 Sonnige Aussichten
Solarzellen – der Natur abgeschaut



Heft 3: Februar 2003

maßstäbe

Magazin der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt PTB



Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

oh, lassen Sie mal sehen – Sie haben da was im Auge: Teilchen, ganz viele Teilchen. Ihre Netzhaut wird soeben bombardiert – das ist gewiss, denn Sie verfolgen mit Ihren Augen ja die hier aufgeschriebene Buchstabenfolge und das könnten Sie nicht, wenn Ihre Netzhaut unbehelligt wäre. So aber durchdringen gerade aberwitzig viele Lichtteilchen, die vielleicht aus einer Glühlampe stammen und vom Papier reflektiert werden, ihren Augapfel und versetzen, am hintersten Ende der Netzhaut, Ihre Zäpfchen und Stäbchen in helle Erregung. Diese Erregung pflanzt sich bis in Ihr Gehirn fort, wandelt sich zu einem Sinneseindruck und wird schließlich zu einem Gedanken. Dieser Gedanke könnte sein: „Was soll mir das hier sagen?“ oder „Verdammt dunkel hier!“ oder „Vorwortschreiber, komm’ zur Sache!“.

In dieser *maßstäbe*-Ausgabe wollen wir das Phänomen Licht gewissermaßen durch unser journalistisches Prisma schicken und uns ein paar der ausfallenden Strahlen und der entstehenden Reflexe anschauen. Natürlich ist es unmöglich, alles über das Licht zu sagen, was sich sagen ließe, aber wir wollen doch versuchen, einen Bogen zu spannen, der die Größe des Phänomens zumindest andeutet.

Jens Simon

Da es nie verkehrt sein kann, sich einem Gegenstand über die Frage zu nähern, wie denn die Welt ohne diesen Gegenstand aussähe, beginnen wir also beim Licht mit dessen Gegenteil: der Dunkelheit. Wir haben diejenige genommen, die sich bereits nach einigen hundert Metern unter der Meeresoberfläche findet. In der Tiefe ist dabei einiges los – etwa Fische, die sich selbst Licht machen (eine Fähigkeit, die wir zweibeinigen Säugetiere gelegentlich auch gern hätten). Auf dem Meeresboden finden wir dann aber zugleich „technisches Licht“ – wenn auch in armdicke Kabel eingesperrtes. Indem wir auch diese Welt des Infraroten zu unserem Thema machen, ignorieren wir die akademische Maßregelung, nach der nur derjenige Teil des elektromagnetischen Spektrums Licht genannt werden dürfe, der für das menschliche Auge sichtbar ist (und etwa zwischen 380 und 770 Nanometern Wellenlänge liegt). Wir schauen uns auch ein wenig links und rechts des sichtbaren Spektrums um. Um eine andere Sicht zu bekommen, setzen wir unsere physikalische Brille an einigen Stellen sogar gänzlich ab: So fragen wir zum Wesen der Farben in der Welt der Kunst nach.

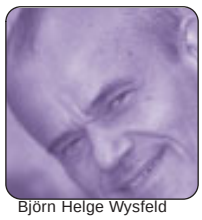
Erika Schow

Aber neben all diesen kleinen Vorstößen auf „verbotenes Terrain“ (auch die Physik kennt „verbotene Übergänge“) geht es selbstverständlich auch in diesen *maßstäben* sehr physikalisch zu. Licht ist schließlich eines der größten Phänomene in der Ideengeschichte der Physik und eines der wichtigsten technischen Handwerkszeuge schlechthin. Ohne Licht sieht man nicht nur nichts. Ohne Licht würde in unserer Welt auch nichts funktionieren.

Jörn-Uwe Barz

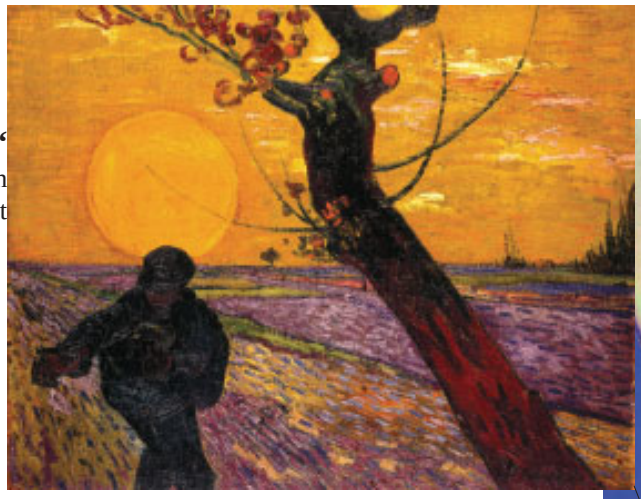
Im Namen der gesamten Redaktion wünsche ich Ihnen eine erhellende und unterhaltende Lektüre. Und denken Sie daran: Auch die Dunkelheit breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit aus.

Ihr Jens Simon

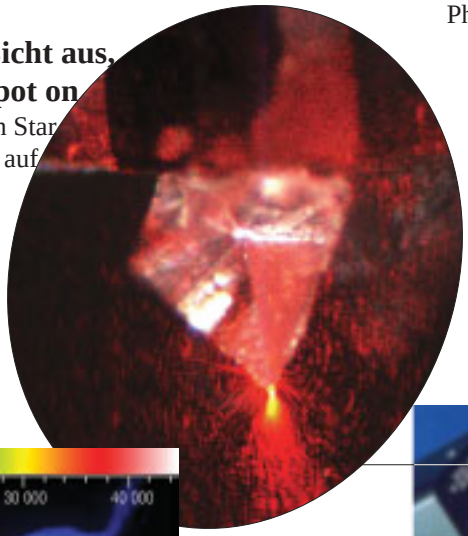

Björn Helge Wysfeld

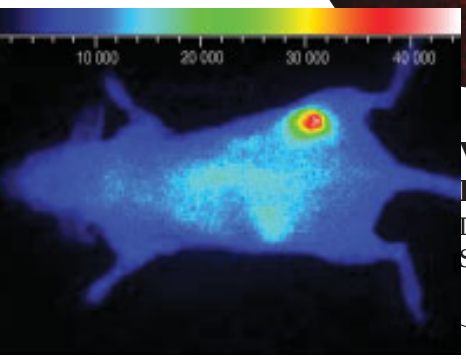
Inhaltsverzeichnis

„Mehr Rot als nur ein Tropfen“
Ein Interview zwischen Physik und Kunst



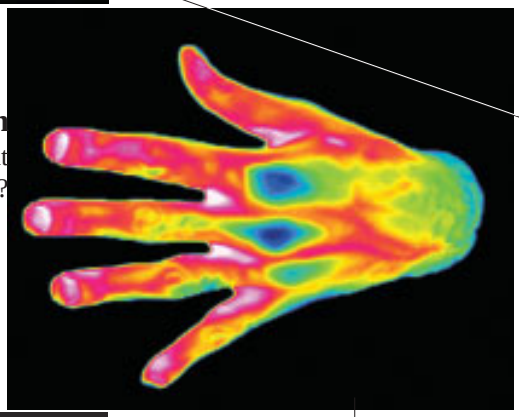
Licht aus, Spot on
Ein Star tritt auf



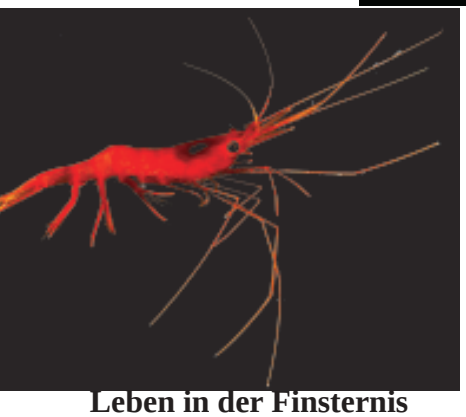


Verräterisches Leuchten
Dem Krebs auf der Spur

Lineale aus Licht
Was nach dem Urmeter kam



Wärme sehen
Schwarz wie die Nacht oder strahlendes Objekt?



Leben in der Finsternis
Eine Reise in die Tiefsee

Kennen Sie schon die Zeit?
Eine Frage, viele Antworten

Pulsadern der Weltgesellschaft
Unsichtbare Lichtblitze

Vorwort 1

4

8

13

17

20

23

26

Licht-Muster
Ultraviolette Strahlung für Computerchips

Das Letzte
Höhlenwesen

56

54

Unscheinbarer Zwerg der Klasse G2 Römisch Fünf
Unsere Sonne

50

46

Es war einmal ...
Es wird einmal
Die Lampenwelt der Zukunft

43

40

38

Sonnige Aussichten
Solarzellen – der Natur abgeschaut

35

Eine Paarbeziehung anderer Art
Spukhafte Fernwirkung

30

Licht-Bilder
Zwischen Hell und Dunkel

Es blaut so blau
Blaue Wunder

Was ist Licht?

Kleine Chronologie des Lichts
zusammengestellt von: Jens Simon

Je größer ein Rätsel, umso zahlreicher die Lösungsvorschläge. So verstanden ist Licht ein wahrlich großes Rätsel. Wie viele prinzipiell mögliche Antworten die Frage „Was ist Licht?“ auch zulässt – die Physik hat sie im Laufe ihrer Geschichte alle gegeben. Zunächst die Frage der Richtung: Das Licht könnte vom Objekt kommend in das Auge des Betrachters fallen. Oder es könnte genau anders herum, vom Auge ausgesendet sein. Beides wurde gedacht. Dann die Frage, wie es den Weg zurücklegt: Es könnte wie ein Pfeil geradeaus fliegen oder sich als ein Schwarm kleinster Teilchen, als Lichtkügelchen, ausbreiten. Oder es könnte wie eine angeschlagene Saite sein – ein Schwingen des Mediums zwischen Auge und Objekt. Jedes dieser Modelle hatte seine Zeit.

Und ist das Rätsel Licht heute gelöst? Mitnichten! Die Physik deutet es heute in der Art eines Sowohl-als-auch und hat damit – ganz klassische Moderne – ein Paradoxon geschaffen. Paradoxa lassen sich zwar nicht zu Ende denken, aber mit großer Wahrscheinlichkeit kommt dieses Nicht-Denkbare der Wirklichkeit am nächsten. Da dies so ist, lohnt es, die Geschichte des Lichts kurz zu überschlagen, eine Geschichte der unterschiedlichsten Modellvorstellungen und Technologien.

→ Fortsetzung S. 5 bis S. 51

Leben in der Finsternis

Ein Brodeln in der Finsternis
11 000 Meter unter dem Meeresspiegel lauert der Abgrund. Kein Sonnenstrahl dringt bis in diese finsteren Tiefen vor, der Druck ist bis zu 1100 mal größer als an Land. An diesen Nahtstellen der Erdkruste spucken „Schwarze Raucher“ (Black Smokers) ihren über 300 Grad Celsius heißen Sud aus. Er entsteht, wenn Meerwasser durch Erdspalten versickert und in die Nähe einer rund 1200 Grad Celsius heißen Magmablase gelangt. Dort erwärmt es sich und belädt sich mit Schwefelwasserstoff, der für die meisten Organismen giftig ist, außerdem mit Metallen und Wasserstoff. Die Brühe steigt auf. Beim Kontakt mit dem kalten Meerwasser fallen Mineralien – Sulfide – aus, die sich manchmal zu haushohen Schloten rund um einen „schwarzen Raucher“ ablagern. Außerdem enthält der Sud große Mengen an gelösten Schwefelverbindungen. Alles in allem eine Umgebung, die unbewohnbar erscheint.

Foto: OAR/National Undersea Research Program (NURP); NOAA

Ein Leben mit Schwefelfressern
Erst 1979 entdeckten Forscher in den Tiefen nahe des Galapagos-Grabenbruchs eine reiche Lebensgemeinschaft im Bereich der brodelnden Erdspalten. Über zwei Meter lange Röhrenwürmer sowie Muscheln, Krabben und Aalmuttern schöpfen aus den schwefelhaltigen heißen Quellen (Hot Vents) ihre Lebenskraft. Dort lebt ihr „Futter“: Chemosynthese-Bakterien. Anders als die Lebewesen an der Sonne, die Photosynthese betreiben können, erzeugen sie Energie mit Hilfe von chemischen Reaktionen. Die Bakterien oxidieren Schwefelwasserstoff. Durch die freiwerdende Energie wird Kohlendioxid aus dem Meerwasser gebunden. Dabei entstehen organische Moleküle. Somit sind die Bakterien selbst ernährend (autotroph); können also ohne jede Zufuhr organischen Materials überleben.

Der Röhrenwurm Riftia pachyptila unternimmt keinerlei Anstrengungen, Nahrung aufzunehmen. Er besitzt weder Mund noch Verdauungsorgane. Seine Nahrung bezieht er ausschließlich durch Schwefel fressende Bakterien, die er in den Zellen seines Körpers beherbergt. Riftia versorgt seine „Untermieter“ über Kiemen und Kreislauf mit Sulfid und Sauerstoff. Diese Rohstoffe benötigen die Bakterien für ihre Chemosynthese. Im Gegenzug liefern sie ihrem Wirt Nährstoffe wie Zucker und Aminosäuren.

Auch die **Muschelgattungen** Calyptogena und Bathymodiolus leben in einer Symbiose mit Schwefel oxidierenden Bakterien, die in ihren Kiemen hausen. Sauerstoff und Kohlendioxid erhalten die Bakterien aus dem Wasser. Sulfide liefert ihnen die Muschel, die mit einer Art Fuß im Sediment stöbert und das aufgenommene Sulfid über ihren Kreislauf bis in die Kiemen transportiert.

Foto: OAR/NURP; Texas A&M Univ.

Lebensgemeinschaft

Foto: OAR/NURP; College of William & Mary

Röhrenwurm

Foto: Geomar-Institut Kiel

Muscheln (Calyptogena spp.)

Damit Gott sehen konnte, was er tat, musste er natürlich Licht machen. Und so tat er es.

Anfang
„Am Anfang schuf Gott Himmel und Erde. Und die Erde war wüst und leer, und es war finster auf der Tiefe; und der Geist Gottes schwebte auf dem Wasser. Und Gott sprach: Es werde Licht! Und es ward Licht! Und Gott sah, dass das Licht gut war. Da schied Gott das Licht von der Finsternis und nannte das Licht Tag und die Finsternis Nacht. Da ward aus Abend und Morgen der erste Tag.“ (1. Moses 1, 1-5)

4 000 000 000 v. Chr.
Noch besteht die Erdatmosphäre hauptsächlich aus Kohlendioxid. Doch Cyanobakterien in den Ozeanen beginnen, das Sonnenlicht als Energiequelle zu nutzen. Mit dieser irdischen Photosynthese kommt nach und nach Sauerstoff in die Welt.

1 300 000 v. Chr.
Homo erectus beschert der Menschwerdung einen großen Technologieschub. Dank ihm braucht Fleisch nicht mehr nur roh gegessen zu werden und aus den Höhlen verschwindet die Dunkelheit. Homo erectus lernt, das Feuer zu beherrschen. (Reste von Feuerstellen aus dieser Zeit wurden in Nordafrika entdeckt.)

5. Jh. v. Chr.
Anaxagoras von Klazomenai (ca. 500 bis 428) stellt die These auf, dass alle ...

→ S. 7

Ein Leuchten in der Dunkelheit
Vom Grund des Ozeans geht es langsam aufwärts in die mittleren und oberen Regionen der Tiefsee. Auch hier in rund 1500 Metern Tiefe gibt es keinen blassen Schimmer von Sonnenlicht. Doch aus dem Dunkel tauchen vereinzelt leuchtende Lebewesen auf: Fische, Quallen, Krebse und Oktopusse „knipsen“ sich ihr eigenes Licht an.

Das Geheimnis des kalten Biolichts
Das Phänomen heißt Biolumineszenz. Dabei wird das Protein Luziferin oxidiert, als Katalysator dient das Enzym Luziferase. Durch diese Reaktion wird Biolicht freigesetzt, aber kaum Wärme abgegeben. Hier ist die Natur der menschlichen Technik um Längen voraus. Zum Vergleich: Glühbirnen können nur fünf Prozent der zugeführten Energie in Licht umsetzen. Der Rest geht als Wärme verloren. Biolumineszenz beruht auf der Aktivität eigener Zellen (primäres Leuchten) oder gelingt mit Hilfe von eingelagerten Bakterien (sekundäres Leuchten), die z. B. mit Fischen in Symbiose leben. Die Bakterien sitzen zu Millionen in besonderen Drüsenzellen, den Photophoren. Dort werden sie über das Blut mit Stärke und Sauerstoff versorgt. Zum Ausgleich leuchten sie ihrem Wirt.

„In dem unendlichen Dunkel hilft das Biolicht, Beute anzulocken, Feinde zu täuschen und abzuwehren oder einen Fortpflanzungspartner zu finden“, erklärt Thomas Soltwedel vom Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven.

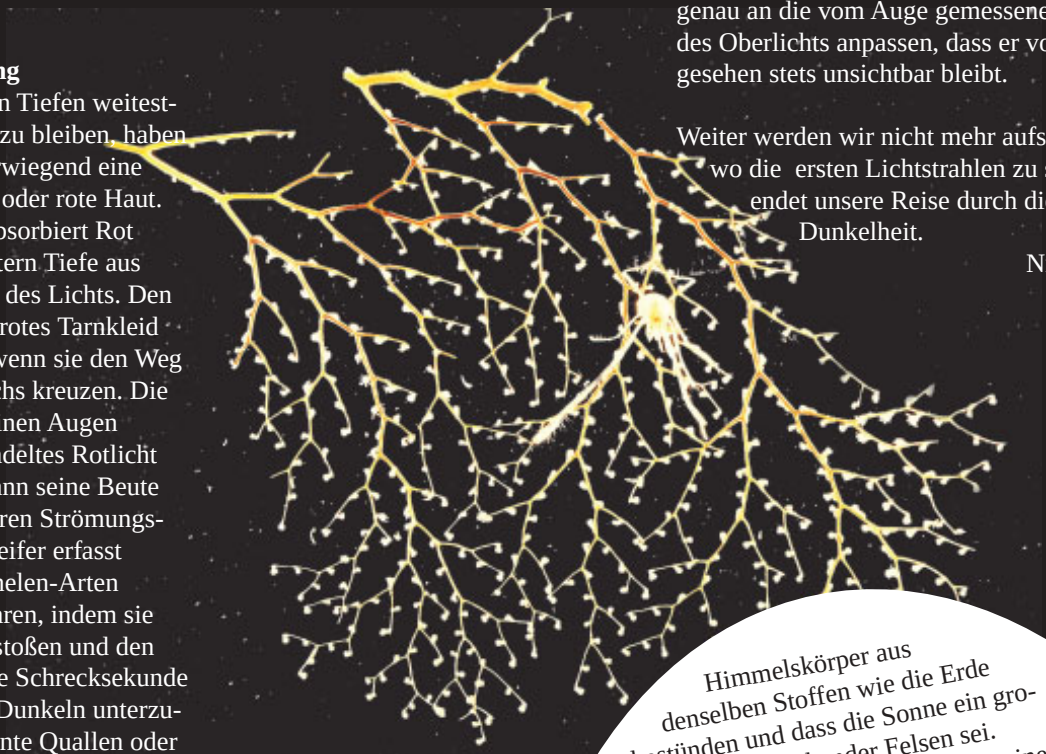
Licht als Lockmittel
Anglerfische besitzen Leuchtorgane, die wie eine Laterne vor ihrem Maul baumeln. Jede Lichtquelle weckt die Neugier. Die arglose Beute nähert sich dem Glühen und wird prompt verspeist. Ein Riesenmaul mit Vampirzähnen macht ein Entkommen unmöglich. Auch Staatsquallen nutzen Biolicht, um Beute zu machen. Dabei setzen die Winzlinge auf Teamarbeit: Hunderte kleiner Einzeltiere bilden bis zu 40 Meter lange Lichterketten. Die größere Oberfläche sorgt für einen reichen Fang. Der Korallenfisch Photoblepharon beherbergt in seinen unter den Augen gelegenen Leuchtorganen Bakterien, die ununterbrochen leuchten. Durch Bewegung seines Augenlids kann der Fisch den Lichtfluss nach außen regulieren. Eine Reflektor- und eine Pigmentschicht schließen das Auge nach hinten ab. Seine Leuchtorgane erfüllen gleich mehrere Funktionen: Sie unterstützen wie ein Scheinwerfer das Sehen des Fischs, locken Beute an, wehren durch plötzliches Aufblinken Feinde ab und senden Signale an Fortpflanzungspartner aus. Wissenschaftler vermuten, dass sich die Tiere an artspezifischen Lichtmustern erkennen.

Fotos: Harbor Branch Oceanographic

Licht zur Täuschung
In den oberen Regionen der Ozeane dämmert es bereits. In einer Tiefe von 200 Metern sieht man den ersten Strahl von Sonnenlicht. Dann trübt sich der Blick. Silberbeilfische, die in der Dämmerzone leben, täuschen ihre Feinde mit Leuchtorganen an Bauch und Seiten. Äußerst geschickt ahmen sie das diffuse Restlicht nach. Aus Sicht eines Räubers, der aus der Tiefe nach oben späht, löst sich die Körperkontur völlig auf. Dabei kann der Silberbeilfisch die Intensität seines Lichts über neuronale Steuerung so genau an die vom Auge gemessene Intensität des Oberlichts anpassen, dass er von unten gesehen stets unsichtbar bleibt.

Weiter werden wir nicht mehr aufsteigen. Hier, wo die ersten Lichtstrahlen zu sehen sind, endet unsere Reise durch die Welt der Dunkelheit.

Nicole Geffert



Tricks zur Tarnung
Um in den finsteren Tiefen weitestgehend unsichtbar zu bleiben, haben die Bewohner überwiegend eine schwarze, silberne oder rote Haut. Das Meerwasser absorbiert Rot bereits in zehn Metern Tiefe aus dem Farbspektrum des Lichts. Den Garnelen nutzt ihr rotes Tarnkleid allerdings wenig, wenn sie den Weg eines Schwarzbauchs kreuzen. Die Photophoren an seinen Augen senden stark gebündeltes Rotlicht aus. Der Räuber kann seine Beute erspähen, bevor deren Strömungssensoren den Angreifer erfasst haben. Einige Garnelen-Arten wissen sich zu wehren, indem sie Leuchtwolken ausstoßen und den Feind blenden. Die Schrecksekunde nutzen sie, um im Dunkeln unterzutauchen. Transparente Quallen oder Tintenfische sind in der Finsternis leicht zu durchschauen. Doch was tun, wenn die eigene Beute im Bauch verräterisch leuchtet? „Die Tricks sind verblüffend“, sagt Thomas Soltwedel. Einige Arten ummanteln ihren Magen mit einer lichtundurchlässigen Schutzschicht, andere schimmern rot und übertünchen das bläuliche Licht.

Der **Blitzlichtfisch** dreht im Ernstfall einfach das Licht ab. Die Zellen seines Leuchtorgans sitzen in halbkugeligen Kammern, die mit Reflektoren und Linsen ausgestattet sind und die Strahlung wie einen Scheinwerfer bündeln. Sitzt ihm ein Feind auf der Flosse, klappt der Blitzlichtfisch sein Leuchtorgan so ab, dass kein Strahl mehr nach außen fällt.

Himmelskörper aus denselben Stoffen wie die Erde bestünden und dass die Sonne ein größer, heißer und glühender Felsen sei.

Demokritos von Abdera (460 bis 371), einer der frühen Atomisten, stellt eine Teilchentheorie des Lichts auf. Von jedem Gegenstand sollen Atome in den leeeren Raum ausschwärmen. Indem das Auge diese Atome wahrnimmt, wird ein Gegenstand sichtbar.

Empedokles von Akragas (ca. 495 bis 435) hat dazu die Gegentheorie: Das Auge ist es, das Lichtstrahlen aussendet und diese auf die Objekte der Welt richtet.

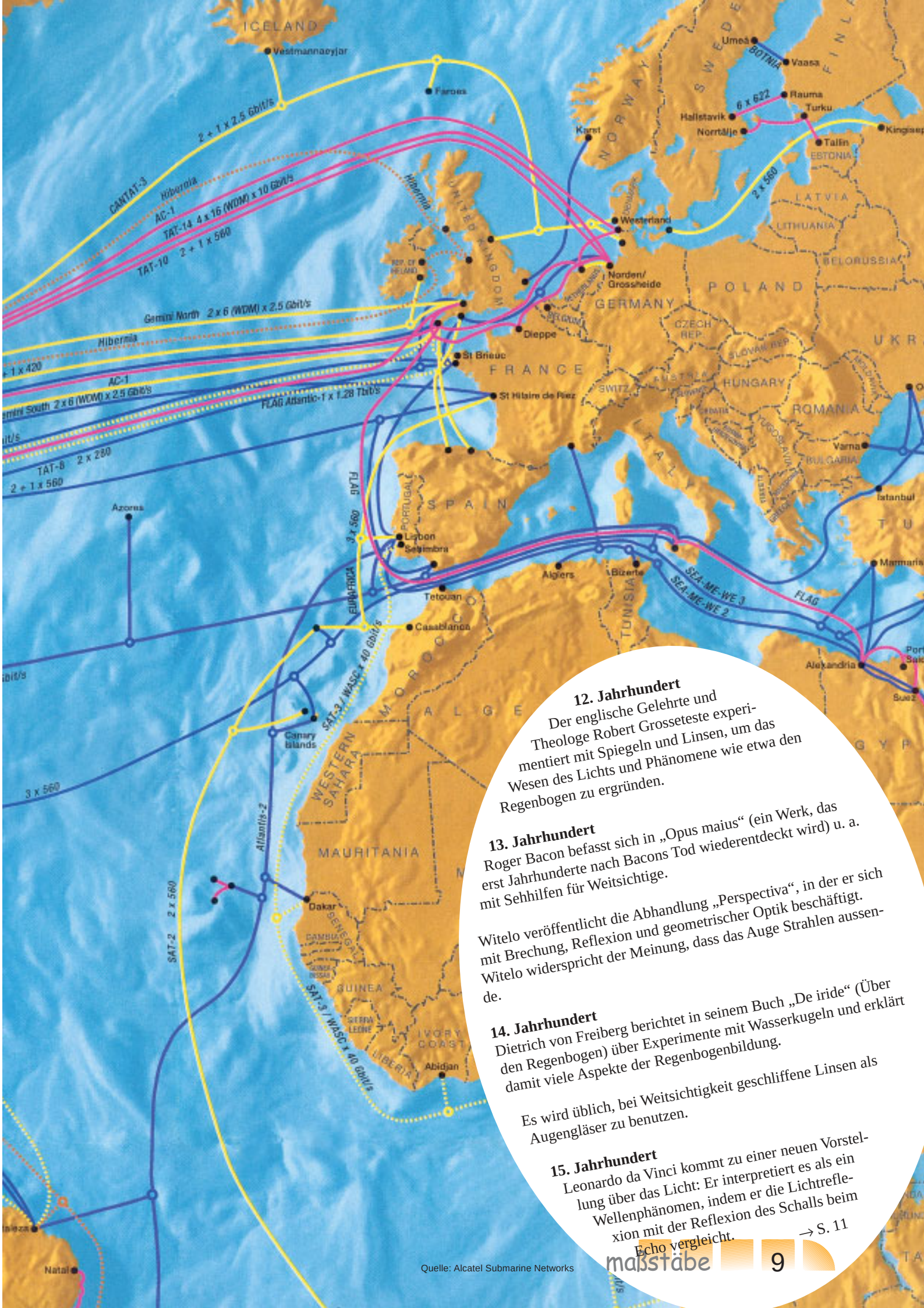
4. Jh. v. Chr.
Aristoteles (384 bis 322) übernimmt von Empedokles die Lehre von den vier Elementen – Feuer (Zeus), Luft (Hera), Erde (Hades) und Wasser (Nestis) – und führt einen von den Elementen unterschiedenen, ewigen und unveränderlichen Körper ein: den Äther.

297 v. Chr.
Der Leuchtturm von Pharos (das „Achte Weltwunder“) bei Alexandria wird eingeweiht.

11. Jahrhundert
Der arabische Physiker Abu Ali Al Hasan Ibn Al Haitham (auch Alhazen oder der „Zweite Ptolemäus“ genannt) beschreibt in seinem Buch „Schatz der Optik“ zutreffend, wie optische Linsen funktionieren, und entwickelt Parabolspiegel.

→ S. 9

Globales Informationsnetzwerk
Auf dem Meeresgrund liegen hunderttausende Kilometer Seekabel – für die optische Datenübertragung.
C A N A D A
U N I T E D S T A T E S
M E X I C O
C U B A
HAITI
COLOMBIA
VENEZUELA
ECUADOR
B R A Z I L
GUYANA
SURINAM
Pennant Point
Medway Harbour
Boston
Shirley
Rhode Island
Long Island
New York
Manasquan
Tuckerton
Bermuda
West Palm Beach
Hollywood
Mazatlan
Cancún
Cayman
Kingston
Santo Domingo
San Juan
Tortola
St. Thomas
Puerto Cortes
Puerto Limon
Colon
Panama
Barranquilla
Cabimas
Caracas
Carúpano
Trinidad
Buenaventura
Salinas
PTAT-1
TAT-12 2 x 3 (WDM) x 5 Gbit/s
TAT-11 3 x 560
TAT-13 2 x 3 (WDM) x 5
FLAG Atlantic-1 x 1.28 Tbit/s
4 x 16 (WDM) x 10 Gbit/s
TAT-14
CANUS-1
Atlantica-1
MAC 2 x 4 (WDM) x 2.5 Gbit/s
CARAC 1 x 420
Columbus-3
1 x 2 (WDM) x 2.5
Americas-1 2 x 520
ARCOS 1 6 x 2.5 Gbit/s
MAYA-1 2 x 3 (WDM) x 2.5 Gbit/s
CFX-5 2.5 Gbit/s
1 x 140
TCS-1 1 x 140
Columbus-2
EQ-FS 1 x 622
SAC 2 x 10 Gbit/s
Americas-2 8 x 2.5 Gbit/s
PAC
PANAM 2 x 2.5 Gbit/s
Hersteller Alcatel
Hersteller Alcatel und Partner
sonstige Hersteller
Unterwasser-Abzweigung
Seekabel im Bau
Seekabel in Planung



12. Jahrhundert
Der englische Gelehrte und Theologe Robert Grosseteste experimentiert mit Spiegeln und Linsen, um das Wesen des Lichts und Phänomene wie etwa den Regenbogen zu ergründen.

13. Jahrhundert
Roger Bacon befasst sich in „Opus maius“ (ein Werk, das erst Jahrhunderte nach Bacons Tod wiederentdeckt wird) u. a. mit Sehhilfen für Weitsichtige.

Witelo veröffentlicht die Abhandlung „Perspectiva“, in der er sich mit Brechung, Reflexion und geometrischer Optik beschäftigt. Witelo widerspricht der Meinung, dass das Auge Strahlen aussende.

14. Jahrhundert
Dietrich von Freiberg berichtet in seinem Buch „De iride“ (Über den Regenbogen) über Experimente mit Wasserkugeln und erklärt damit viele Aspekte der Regenbogenbildung.

Es wird üblich, bei Weitsichtigkeit geschliffene Linsen als Augengläser zu benutzen.

15. Jahrhundert
Leonardo da Vinci kommt zu einer neuen Vorstellung über das Licht: Er interpretiert es als ein Wellenphänomen, indem er die Lichtreflexion mit der Reflexion des Schalls beim Echo vergleicht.

→ S. 11

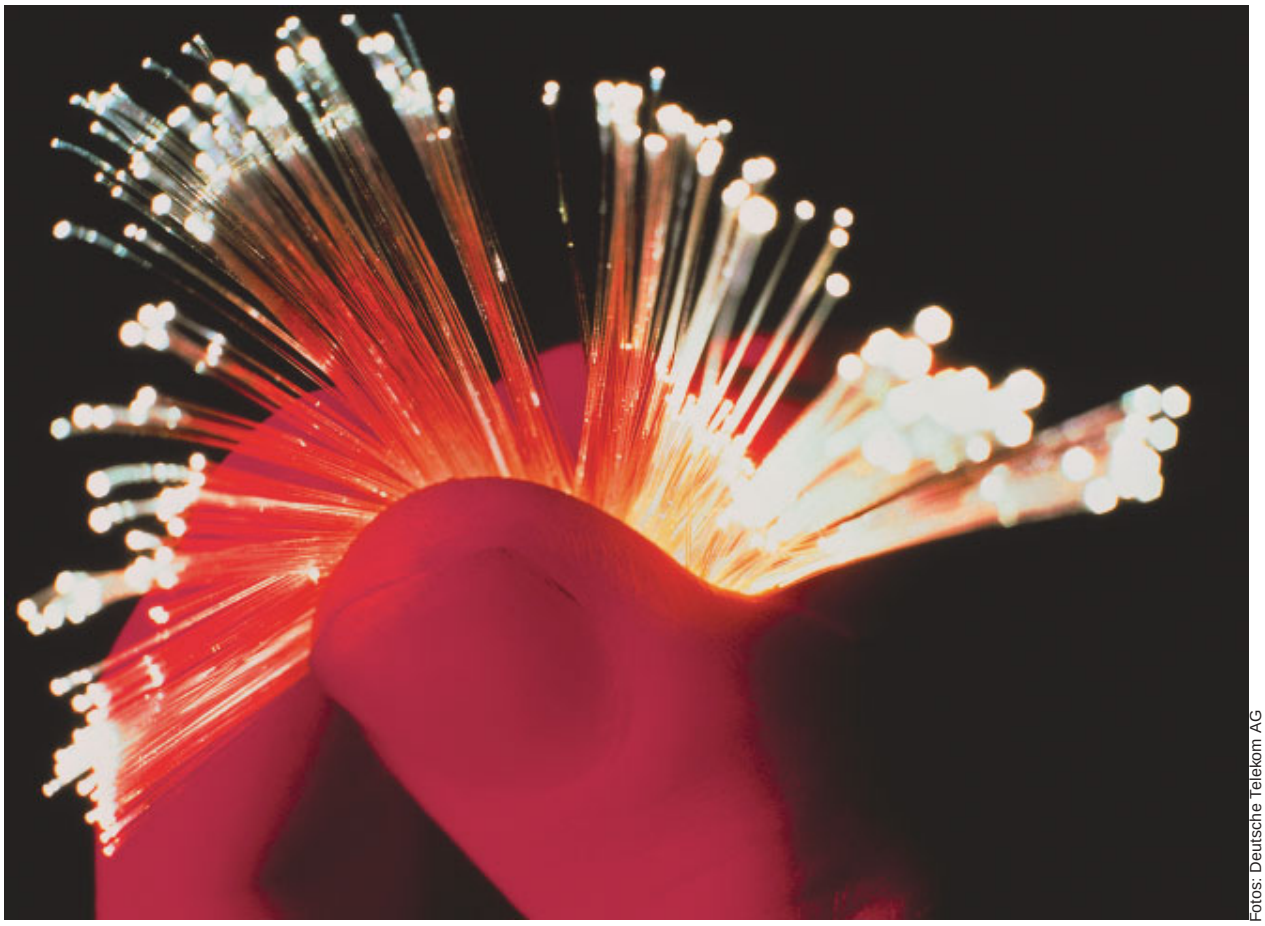
Quelle: Alcatel Submarine Networks

Pulsadern der Weltgesellschaft

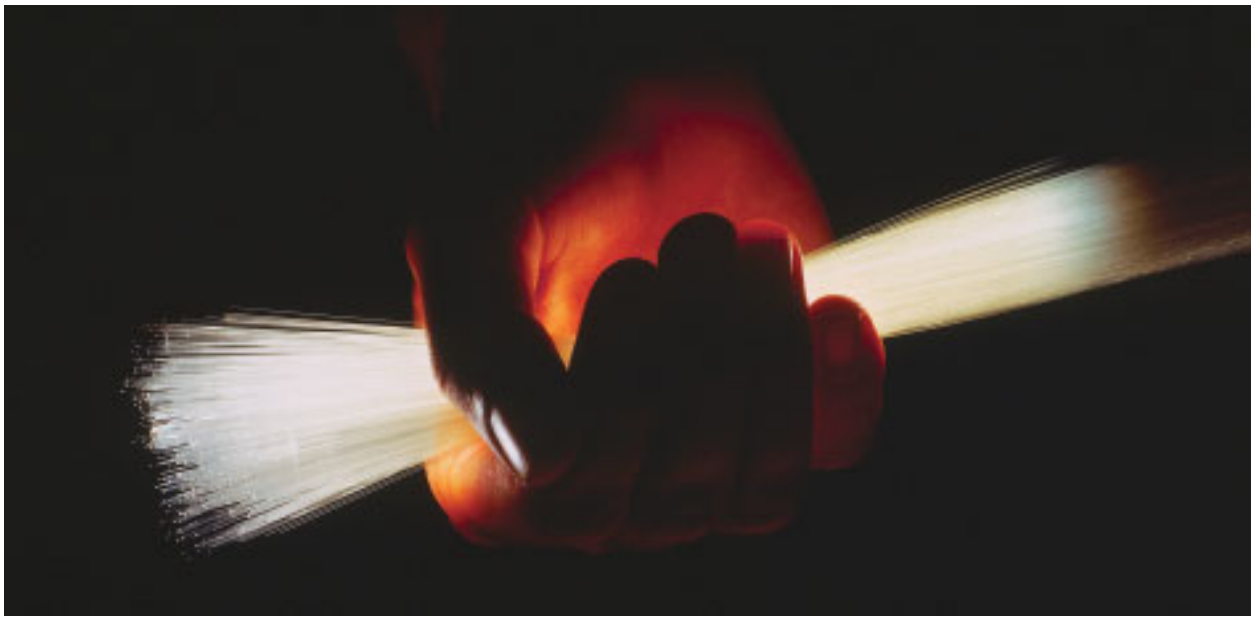
Sie sind unsichtbar – auch wenn sie gerade nicht unterirdisch reisen. Ohne die infraroten Lichtblitze und ohne die hauchdünnen Glasfasern, in denen sie von Kontinent zu Kontinent jagen, wäre unser moderner Alltag kaum mehr denkbar.

Die Rekorde purzeln. Meist liegen nur wenige Monate zwischen den Meldungen, dass wieder mehr Daten durch eine einzige Glasfaser – kaum dicker als ein menschliches Haar – geschleust wurden als je zuvor. Kurz vor Redaktionsschluss gaben Techniker des Telekommunikationskonzerns Alcatel bekannt, pro Sekunde 6,4 Terabit Daten über eine Strecke von 2100 Kilometern übertragen zu haben. Das entspricht dem Inhalt von 985 CD-ROMs oder 61 Komplettausgaben der Encyclopedia Britannica. „Dieses Ergebnis haben wir unter Laborbedingungen erzielt“, stellt Kurt Lösch, Leiter Photonik im Stuttgarter Forschungszentrum der Alcatel SEL AG, klar. „Doch bisher sind die Raten aus Laborversuchen eine gewisse Zeit später immer auch im Routinebetrieb verwirklicht worden.“

Welche Bedeutung Glasfasern im Alltag der Informationsgesellschaft haben, ahnt man, wenn man die gewaltigen Computerschränke in der Seekabel-Endstelle der Deutschen Telekom in der ostfriesischen Kleinstadt Norden sieht. Mit ihrer Hilfe werden die Datenströme von insgesamt zwölf Seekabeln gesteuert und auseinander dividiert – darunter auch die des „TAT-14“. Es ist das derzeit modernste transatlantische Kabel, das sich ein internationales Konsortium aus 50 Unternehmen immerhin 1,4 Milliarden US-Dollar kosten ließ. Seit März 2001 können darüber bis zu 14 Millionen Telefongespräche zwischen den USA und Europa geführt werden. Zum Vergleich: Das erste transatlantische Kabel „TAT-1“ aus Kupfer ließ ab 1956 gerade einmal 36 Gespräche gleichzeitig zu. Die Kapazitäten von „TAT-14“ werden allerdings weniger von Telefongesprächen, sondern viel mehr von Multimedia-Daten wie Webseiten, Fotos oder Musik beansprucht. Diese digitalen Daten müssen, bevor sie auf die Reise gehen können, zunächst in Laser-Lichtpulse umgewandelt werden (aus „Null oder Eins“ wird „An oder Aus“). Dann werden sie in die Glasfaserleitungen eingespeist, wo sie theoretisch sehr, sehr lange reisen können. Denn die Fasern sind so konstruiert, dass jeder Lichtstrahl, der die innere Wand trifft, wie von einem perfekten Spiegel zurückgeworfen wird. Totalreflexion nennt man das. Leider sorgen aber (zum Beispiel) kleine Verunreinigungen oder winzige Risse dafür, dass die Lichtstrahlen dennoch abgeschwächt werden. Diese Dämpfung – so der Fachbegriff – ist bei infrarotem Licht am kleinsten. Deshalb liegen die Wellenlängen der Laserblitze in diesem für das menschliche Auge unsichtbaren Bereich.



Fotos: Deutsche Telekom AG



Schneller als der Satellit

Über den Knotenpunkt in Norden haben die deutschen Internet-Surfer auch Anschluss an das weltweit längste Kabel „SEA-ME-WE-3“. Es verbindet auf seinem insgesamt 38 000 Kilometer langen Weg 34 Staaten und verläuft durch das Mittelmeer, das Rote Meer und den Indischen Ozean. Vor Singapur gabelt es sich: Eine Route führt nach Australien, die andere nach Japan und Korea. Bis eine Information aus Deutschland in diesen asiatischen Staaten angekommen ist, vergeht weniger als eine achtel Sekunde. Ein Signal, das per Funk über Satellit zum Empfänger geschickt wird, ist mehr als siebenmal länger unterwegs. Diese Zeitverzögerung kann bei einem Telefongespräch sehr störend sein. Der noch größere Nachteil der Satelliten ist aber ihre niedrigere Übertragungskapazität. Daher können die künstlichen Himmelskörper das Kommunikationsbedürfnis zwischen den Ballungszentren der Industrienationen weit schlechter befriedigen als ihre irdische Konkurrenz. Das sieht auch Fachmann Lösch so. „Allerdings sind Glasfasernetze für abgelegene Regionen der Erde zu teuer – da wiederum hat die Satellitentechnik Vorteile“, sagt er.

Es waren vor allem zwei Entwicklungen, die den Siegeszug der Glasfaser erst möglich gemacht haben. Eine davon heißt „optischer Verstärker“: Das ist ein Stück Glasfaser, in das fremde Atome eingelagert sind (sehr häufig Erbium-Atome). Sie werden von außen – von einem winzigen Halbleiterlaser – optisch „gepumpt“ und somit ihre Elektronen auf ein höheres Energieniveau gehoben. Trifft ein optisches Signal auf ein solches Elektron, fällt es zurück und gibt Licht ab. Damit wird das Signal gewissermaßen wieder aufgefrischt – und das auf rein optischem Weg. Ohne den zeitraubenden Umweg über eine Elektronik kommen die Datenströme daher viel schneller an ihr Ziel. Die zweite Entwicklung ist das so genannte „Wellenlängen-Multiplex-Verfahren“: Lichtpulse leicht unterschiedlicher Wellenlänge werden durch die Faser geschickt und am Ende getrennt voneinander ausgelesen. Das eröffnet neue Datenkanäle und erhöht so die Übertragungsrate um ein Vielfaches. Damit ist auch das Nachrüsten bereits verlegter Kabel möglich: Neue Laser werden angekoppelt, die andere als die bereits benutzten Wellenlängen senden. „Das ist der Trend: Es werden wenig neue Fasern teuer verlegt. Stattdessen werden Bauteile wie etwa Multiplexer und Schalter ausgetauscht und so die Übertragungskapazitäten erhöht“, erläutert Physiker Holger Hoffmann, Experte vom Forschungszentrum Karlsruhe. „SEA-ME-WE 3“ beispielsweise wird bereits aufgepäppelt, obwohl das Kabelsystem erst vor rund drei Jahren seinen Dienst aufnahm.

17. Jahrhundert

Johannes Kepler beschreibt in seiner „Astronomia pars Optica“ (**1604**), wie das Auge das Licht fokussiert, und er weist nach, dass die Lichtstärke mit dem Quadrat der Entfernung von der Lichtquelle abnimmt.

Die Optik bekommt wichtige Instrumente: Der deutsch-holländische Optiker Hans Lipperhey erfindet um **1608** das Fernrohr. Das Lipperheysche Mikroskop hingegen geht auf eine Erfindung von Zacharias Janssen Ende des 16. Jahrhunderts zurück.

Galileo Galilei erfährt **1609** von Lipperheys Erfindung eines „optischen Rohres“ – präsentiert auf einer Ausstellung in Venedig –, das entfernte Gegenstände näher heranholen kann. Galilei baut nun sein eigenes Fernrohr und erreicht eine etwa 30-fache Vergrößerung. Seine damit möglichen Planetenbeobachtungen – von den Jupitermonden über die Saturnringe bis zu den Venusphasen – machen Galilei in ganz Europa berühmt.

Doch da die Beobachtungen allesamt das Kopernikanische Weltbild bestätigen, hält die Kirche sie unter Verschluss. Auch Kopernikus’ „De revolutionibus“ steht auf dem kirchlichen Index und wird dort noch mehr als zwei Jahrhunderte bleiben.

→ S. 13

Die Probleme beginnen da, wo die Faser endet

Auch künftig bleibt für die Tüftler in den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen der Telekommunikationsfirmen noch genug zu tun. „Die Probleme fangen da an, wo die Faser endet“, sagt Hoffmann. Eine dieser Schwierigkeiten ist es, die Datenpakete an den Netzknoten mit Hilfe so genannter „Router“ auf den richtigen Weg zu bringen, ohne dass die Laserblitze zeitraubend in elektronische Signale umgewandelt werden müssen. Herkömmliche elektronische Router werten den Adresskopf (Header) eines jeden Datenpakets aus. Entsprechend der Angaben im Header stellt ein Integrierter Schaltkreis (IC) die Verbindung her, während das eigentliche Informationspaket im Router zwischengespeichert wird. Einen Speicher für Lichtsignale gibt es jedoch bisher genauso wenig wie das optische Pendant zu einem IC. Und so fehlen noch einige Schritte, bis das Datennetz der Zukunft wirklich perfekt ist – bis es ausschließlich mit Licht arbeitet. Erst wenn die Licht-Daten unterwegs nicht mehr in elektronische Daten umgewandelt werden müssen, dann kann man den Vorteil der ungeheuren Geschwindigkeit des Lichts optimal nutzen. Ein solches rein optisches Netzwerk wird erst dort enden, wo die Daten wirklich gebraucht werden – zum Beispiel am heimischen Computer.

FRANK FRICK

Puls-Kontrolle

Es wird eng in den Glasfaserkabeln: Immer mehr Lichtsignale der verschiedensten Wellenlängen verlaufen hier nebeneinander. Diese Bandbreite immer weiter zu erhöhen ist eine große Herausforderung für die Hersteller – aber auch für die Messtechnik-Experten. In der PTB laufen die Fäden in zwei Bereichen zusammen: Erstens kann jeder, der es ganz genau wissen möchte, mit Hilfe der PTB kontrollieren, wie hoch die Leistung seiner Laser ist. Dazu schickt er nicht die einzelnen Laser, sondern einen (oder mehrere) Leistungsmessgeräte in die PTB, bekommt nach einer gewissen Zeit Gerät samt Kalibrierschein zurück und kann nun die Leistung seiner Laser mit der im Schein angegebenen Genauigkeit überprüfen. Zweitens unterstützt die PTB die Weiterentwicklung des Wellenlängen-Multiplex-Verfahrens. Damit möglichst viele Lichtblitze verschiedener Wellenlängen in den Glasfasern nebeneinander laufen können, muss man diese verschiedenen Wellenlängen sehr genau erzeugen. Das geht zum Beispiel mit so genannten Faser-Bragg-Gittern, die wie ein Filter dafür sorgen, dass nur Licht einer ganz bestimmten Wellenlänge den Laser verlässt – oder auch mit bestimmten Absorbern, die unerwünschte Wellenlängen quasi schlucken. In einem internationalen Projekt, das sie auch koordiniert, entwickelt und untersucht die PTB zusammen mit Partnern aus anderen Forschungsinstituten und der Industrie zurzeit solche Materialien. es

Wärme sehen

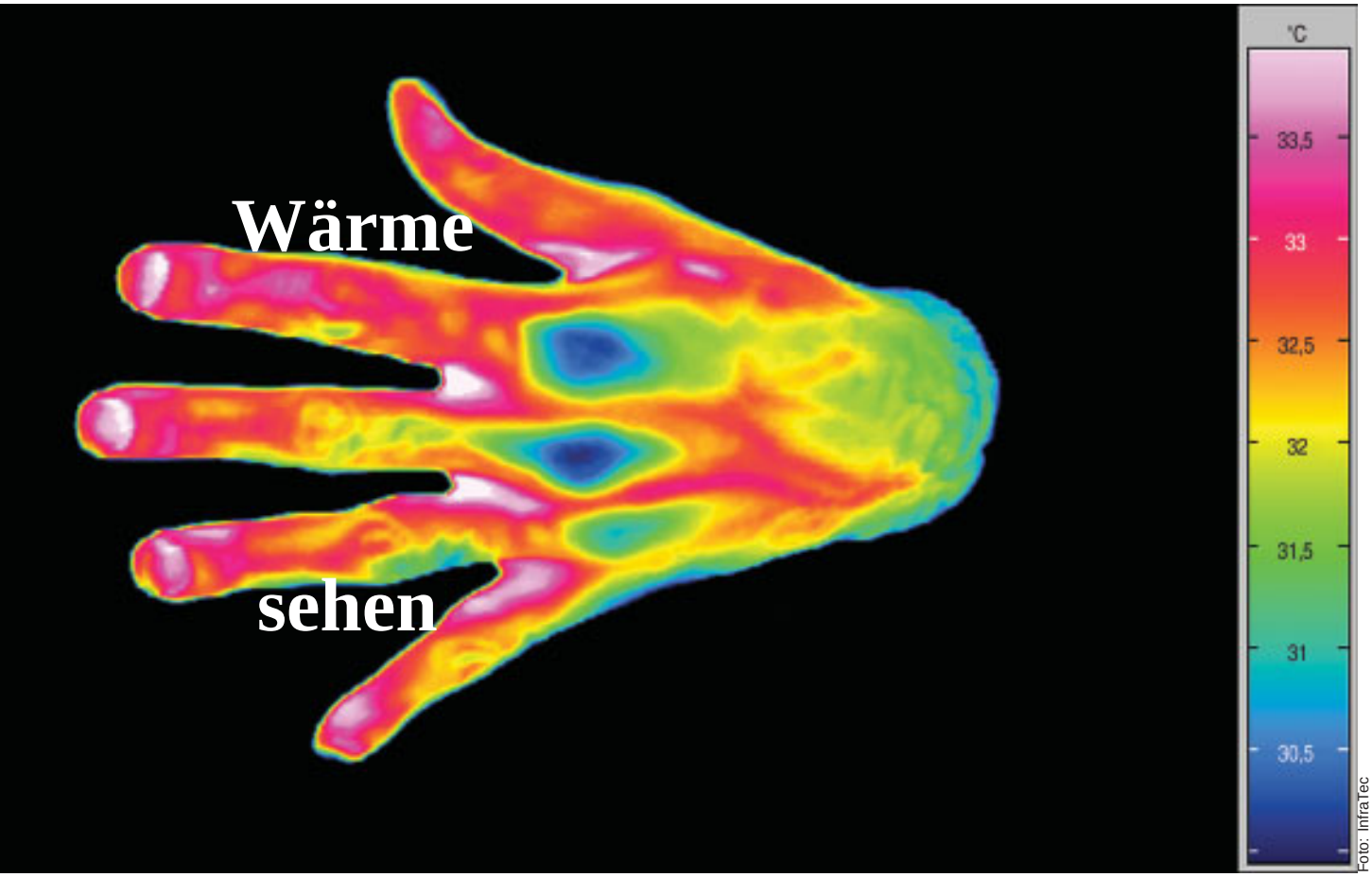


Foto: InfraTec

Kann man Wärme eigentlich nur fühlen oder auch sehen? Sehen wäre praktisch, dann würde man sich an heißem Kaffee nicht den Mund verbrennen. Tatsache ist, der Kaffee ist nur noch nicht heiß genug, sonst könnte man selbstverständlich sehen, dass er heiß ist. So ab cirka 600 Grad Celsius. Solche Temperaturen verträgt der Kaffee zwar nicht, ganz klar, der wäre längst verdampft. Aber andere Dinge – man denke an die überhitzte Herdplatte – fangen dann an zu glühen und werden tatsächlich sichtbar heiß.

Schwarz und also unsichtbar ist eine Tasse heißen Kaffees in einem nachtdunklen Raum. Ein strahlendes Objekt dagegen ist sie für eine Wärmebild- oder Thermographiekamera. Denn die spezielle Optik und der Detektor dieser Kamera sind auch dort scharfsichtig, wo das menschliche Auge blind ist. Wir sehen zwar alles zwischen rot und blau und nennen das dann Licht. Aber jenseits des Roten, jenseits des Blauen? Da ist die „Lichtwelt“ nicht zu Ende. Das Infrarote, die Domäne der Temperatur- oder Wärmestrahlung, schließt mit Wellenlängen größer als 800 Nanometer an das (für uns) sichtbare Spektrum an. Eine Wärmebildkamera liefert ein Bild, das nach Temperaturzonen aufgeteilt ist. Rehe im Wald sind wärmer als der Wald und werden in einer thermographischen Aufnahme in Rottönen wiedergegeben. Auch die einzelnen Bäume, Sträucher, Bäche, Laub auf dem Boden und ein Ameisenhügel sind unterschiedlich warm und lassen sich von ihrer Umgebung abgrenzen, wenn die Kamera sensibel genug eingestellt ist. Schließlich strahlen alle Dinge dieser Welt – nur je nach Wärmeinhalt mal etwas mehr, mal etwas weniger.

Licht ist eine Welle – das beweist Francesco Maria Grimaldi (1613 bis 1663). Er entdeckt die Beugung der Lichtwellen. Allerdings wird Grimaldi damit kaum wahrgenommen. Die Zeit wird erst rund 200 Jahre später (mit Thomas Young, der die Wellentheorie des Lichts entwickelt) reif für derartige Entdeckungen sein.

Willebrord Snell findet **1621** heraus, wie Licht beim Übergang zwischen zwei Medien gebrochen wird. Nach ihm wird das berühmte Brechungsgesetz benannt, wonach die Lichtbrechung durch den Sinus des Einfallswinkels bestimmt ist.

Um **1650** stellt der Mathematiker Pierre de Fermat das heute unter dem Begriff „Fermatsches Prinzip“ bekannte Theorem auf: Von allen möglichen Wegen, die das Licht zwischen zwei Punkten nehmen könnte, nimmt es den Weg, der die kürzeste Zeit erfordert.

Die Laterna magica beginnt zu leuchten. Der dänische Mathematiker und Physiker Thomas Walgenstein stellt sie **1665** als Weltneuheit vor. Die grundlegende Idee geht jedoch wahrscheinlich auf Christian Huygens (1629 bis 1695) zurück.

Robert Hooke vergleicht **1665** in seiner „Micrographia“ (dem ersten Buch über Mikroskopie überhaupt) das Licht mit Wasserwellen und beschreibt Beugung und Interferenz von Licht an dünnen Schichten.

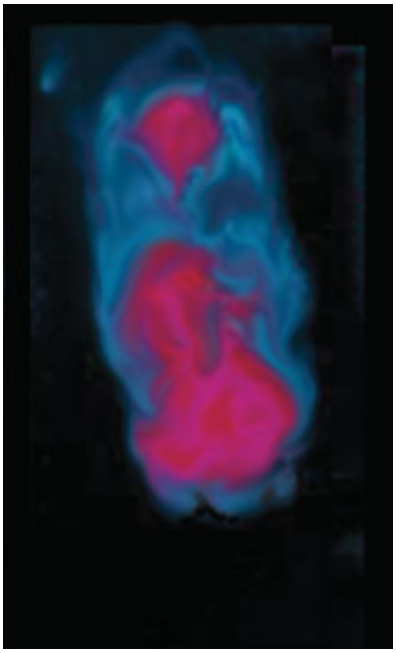
→ S. 15

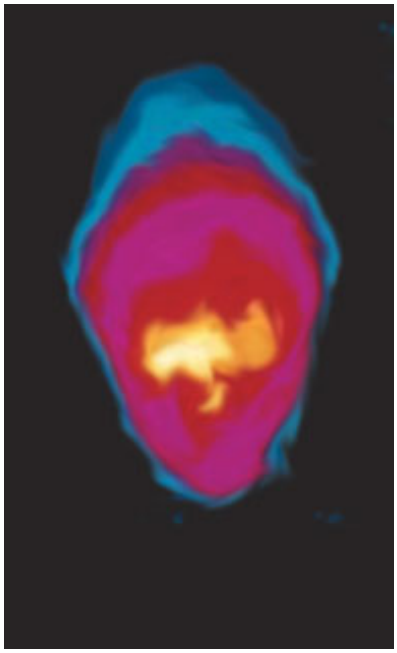
Der Wärmeinhalt eines Stoffes ist dabei das Resultat ungeordnet zappelnder Moleküle und Atome in seinem Inneren. Je schneller und aufgeregter die Bewegung, umso höher der Wärmeinhalt und umso höher die Temperatur des Stoffes. Wärme ist also „ungeordnete“ Energie. Und damit eine äußerst flüchtige Energieform, will sie sich doch ständig an ihre Umgebung verschwenden – das sagt schon die Erfahrung: Einerseits können wir unsere Hände an der Kaffeetasse wärmen – Wärmeleitung durch Kontakt. Andererseits sorgt auch die Wärmestrahlung, die eine elektromagnetische Welle ist, dafür, dass sich die Wärme ausgleicht, also die Tasse kälter und die Umgebung wärmer wird.

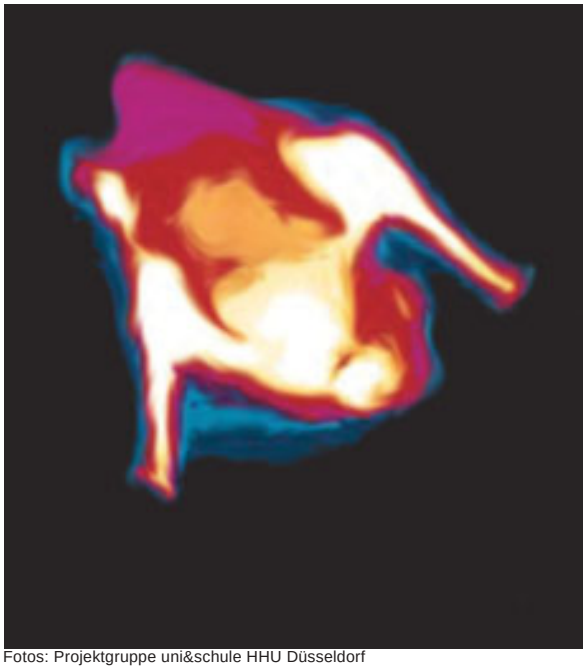
Jeder Körper strahlt nicht nur irgendwie, um seine Wärmeenergie loszuwerden, sondern er tut dies nach ganz festen Regeln. Vor hundert Jahren hat Max Planck das Spektrum der Wärmestrahlung mathematisch genau beschrieben und das berühmte Plancksche Strahlungsgesetz entdeckt, ein Gesetz, das auch technisch ausgesprochen nützlich ist. Die spektrale Zusammensetzung der Wärmestrahlung eines Körpers ist zugleich eine Art „thermodynamischer Fingerabdruck“. Wer die Wärmestrahlung kennt, kann auf die Temperatur schließen. Und hier liegt der messtechnische Vorteil dieses Phänomens. Wie heiß es auf der Sonne ist, wissen wir nicht, weil wir etwa dort waren und ein Thermometer angehalten haben. Wir wissen es, weil das Lichtspektrum es uns verrät: 6000 °C. Über die Aufzeichnung der Wärmestrahlung lässt sich die Temperatur berührungslos messen.

Die Wärmestrahlung der Sonne sehen wir, weil die Sonne so heiß ist. Zugleich spüren wir sie, denn die Sonne sendet auch einen großen Anteil ihrer Strahlung im Infraroten aus. Je kälter ein Objekt dagegen wird, umso langwelliger (und irgendwann dann unsichtbar) wird die Strahlung, die es aussendet. Eine Wärmebildkamera, die im infraroten Bereich sensibel ist, erkennt dagegen, was der Mensch nicht sehen kann, nämlich die Wärmestrahlung in alltäglicher menschlicher Umgebung. Und je dunkler es ist, um so besser gelingt die Aufnahme, weil sich die Reflexion der Sonnenstrahlen dann nicht mehr störend bemerkbar machen kann. Kein Zufall, dass das Militär solche „Nachtsichtgeräte“ enwickelte und nutzte. Zivile Verwen-

Foto: InfraTec







Fotos: Projektgruppe uni&schule HHU Düsseldorf

Semperoper in Dresden

Bilder links:
Diese Fledermaus verbrachte ihren Winterschlaf auf einem Bauernhof in der Nähe von Soest. Ihre normale Körpertemperatur um 40 °C passt sich in dieser Phase der Außentemperatur an und kann bis auf Werte knapp über dem Gefrierpunkt fallen. Auf dem ersten Thermofoto befindet sich die Fledermaus noch im festen Winterschlaf. Mit etwas gutem Willen kann man die Ohren erkennen (die Fledermaus hängt natürlich mit dem Kopf nach unten). Die beiden nächsten Aufnahmen zeigen die Aufwachphase, 20 bzw. 40 Minuten nach Ende des Winterschlafs.

In europäischen Städten wird in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts die Dunkelheit aus den nächtlichen Straßen vertrieben. Öllampen beleuchten Paris (ab **1667**), London (ab **1668**), Amsterdam (ab **1669**) und Berlin (ab **1679**).

Der Däne Erasmus Bartholin entdeckt **1669** die Doppelbrechung des Lichts bei seinen Untersuchungen des isländischen Feldspats.

Wie schnell ist das Licht? Dass es nicht unendlich schnell ist, wie alle antiken Naturphilosophen und auch noch etwa Johannes Kepler und René Descartes glaubten, fand der dänische Astronom Ole Rømer **1676** heraus. Er beobachtete den innersten Jupitermond Io und stoppte die Zeiten zwischen den Monduntergängen, in denen Io im Kernschatten des Jupiters verschwand. Rømer stellte fest, dass diese Eklipsen (Verfinsterungen) etwas früher eintraten, wenn sich Erde und Jupiter auf derselben Seite von der Sonne befanden bzw. etwas später, wenn die Sonne zwischen Erde und Jupiter stand. Der Unterschied beträgt etwa 16 Minuten. Dies musste die Zeit sein, die das Licht braucht, um die Strecke zwischen der nächsten und der fernsten Jupiterposition (was dem Durchmesser der Erdbahn um die Sonne entspricht) zurückzulegen. Also ist Licht nur endlich schnell. Wie schnell, konnte Rømer nicht sagen, da er den Erdbahndurchmesser nicht kannte.

→ S. 17

dungszwecke zeigten sich erst nach und nach. So ist eine Thermographiekamera bei der Suche nach vermissten Personen ebenso effektiv wie beim Aufspüren von Wärmelecks oder verborgener historischer Bausubstanz, die Wärme anders als die modernen Baumaterialien abstrahlt. Auch in der Industrie ist dieses berührungslose Temperaturmessen sehr gefragt. Problemlos kann sehr Heißes, weit Entferntes oder nicht Zugängliches, wie Turbinen in Kraftwerken, unter ständiger optischer Temperaturüberwachung stehen. Ausgesprochen gut eignet sich diese Methode auch zum Aufdecken von Umweltschäden, weil zum Beispiel in Flüsse eingeleitete Schadstoffe andere optische Eigenschaften aufweisen als das Wasser und mit einer Thermographiekamera von ihrer Umgebung deutlich unterschieden werden können.

Je nach Beschaffenheit der Oberfläche und der Fähigkeit, Licht zu reflektieren oder zu absorbieren, verhalten sich Materialien ganz unterschiedlich. So erscheint ein Brillenträger in der Aufnahme einer Thermographiekamera mit markant schwarzer Brille. Die wärmere Augenpartie entgeht der Kamera, weil sie die Werte der kälteren Brille erfasst. Glas ist infrarottechnisch gesehen eben nicht durchsichtig. Wer also tatsächlich von einer Thermoaufnahme auf die Temperatur des aufgenommenen Objekts schließen will, muss ein paar Dinge wissen. Um zu einer tatsächlichen Temperaturaussage zu kommen, müssen Materialeigenschaften, etwa die optischen Oberflächeneigenschaften, des untersuchten Körpers – der in den seltensten Fällen ein idealer schwarzer Körper, sondern eher ein „grauer Strahler“ ist – bekannt sein.

Außerdem gibt es eine größere Anzahl an Störfaktoren, die die Messung beeinflussen und im Ergebnis berücksichtigt werden müssen. Dazu zählen neben Eigenschaften der Objektoberfläche auch die Luftfeuchtigkeit, der Abstand der Kamera zum Objekt oder die Umgebungstemperatur. Wer Temperaturverteilungen nur qualitativ einschätzen will, braucht diese vielzähligen Detailinformationen nicht. Ganz anders sieht es dagegen bei quantitativen Temperaturmessungen aus.

Wie hoch ist die kleinste nachweisbare Temperaturdifferenz? So lautet eine der Fragen, wenn über die Qualität einer solchen Kamera entschieden werden soll. Mit Hilfe so genannter Hohlraumstrahler werden in der PTB in Berlin Thermographiekameras kalibriert. Die geprüfte Wärmebildkamera ist danach verbürgt in der Lage, Temperaturwerte in einem bestimmten Temperaturbereich genau zu ermitteln. Der Hohlraumstrahler, ein zylinderförmiger schwarzer Hohlraum mit einer möglichst kleinen Öffnung, ist bei der angesprochenen Prüfung das Normal, das genaue Werte vorgibt. Mit diesen Normalen lassen sich genaue Temperaturwerte mit präzise festgelegten Korrekturfaktoren erzeugen. Die austretende Temperaturstrahlung wird mit dem Planckschen Strahlungsgesetz verglichen. Der Zusammenhang zwischen der auf die Kamera treffenden Temperaturstrahlung und dem Kamerasignal wird bei der Kalibrierung ermittelt. Dies erlaubt es, beim späteren Einsatz der Kamera auf die genaue Temperatur des beobachteten Objekts zu schließen.

BIRGIT EHLBECK/JENS SIMON

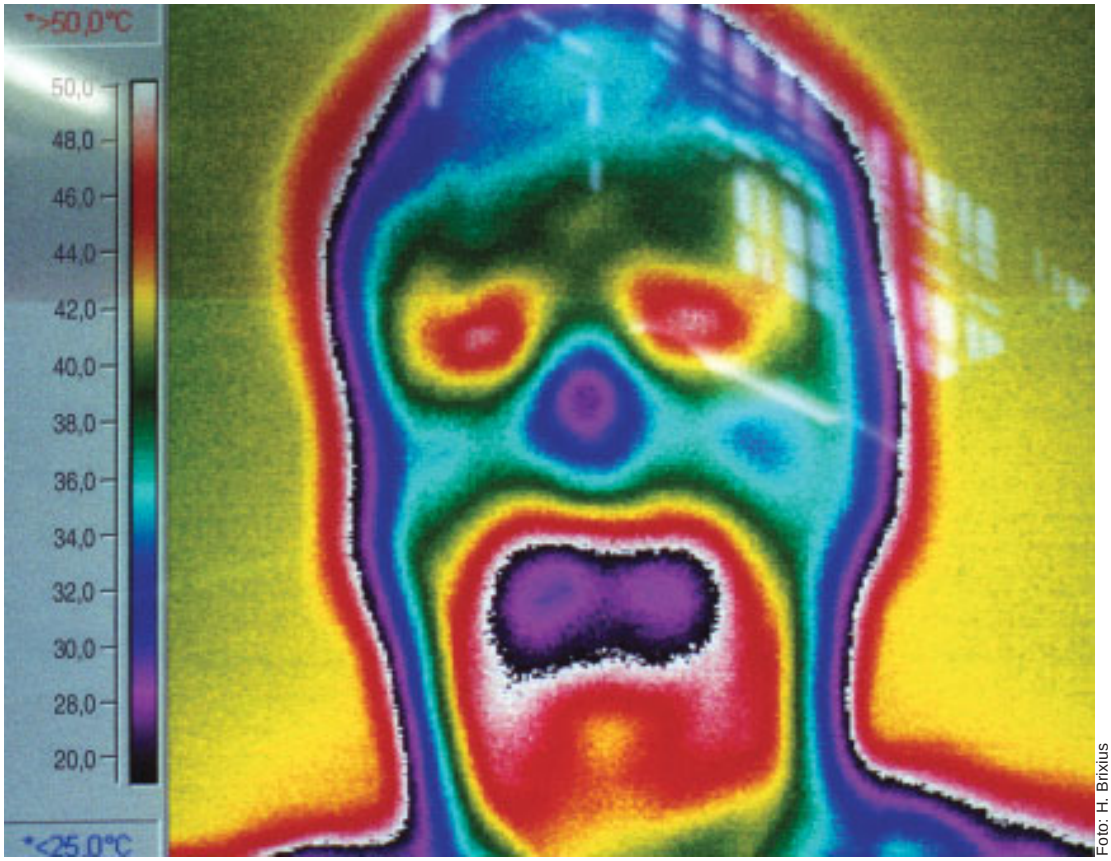


Foto: H. Brixius

Kennen Sie schon die Zeit?

Zeit? Hat man nie genug, ist aber trotzdem einfach so da. Und wenn ich's genau wissen will, guck ich auf den Videorekorder, der bekommt ja die genaue Zeit von der Atomuhr aus Braunschweig gefunkt. ...

Die kleine Zeitreise, die bei diesen scheinbaren Selbstverständlichkeiten beginnt, das Innere eines Atoms in Braunschweig streift und Zeitzeugen aller Art befragt, wird eine einfache Sekunde in ein wissenschaftliches Meisterwerk verwandeln und der Zeit den Rang zuweisen, der ihr gebührt: als größtes Rätsel aller Zeiten.

Den Ausgangspunkt – dass also Zeit eben da ist – teilt immerhin Immanuel Kant noch mit uns. Wenn auch etwas umständlicher. Der Philosoph versuchte, Erkenntnisse auf ein solides, wissenschaftliches Fundament zu stellen.

Foto: dpa

Zeit? Ist wie der Raum a priori gegeben. Ihre Eigenschaften sind ganz unwiderleglich so, wie sie sind, das sagt uns die Vernunft. Aus der Erfahrung können Sie sie nicht herleiten. Vielleicht stellen Sie sich eine Brille vor, die vor Ihren Augen fest montiert ist. Alles, was Sie sehen, sehen Sie durch diese Brille, die Sie niemals abnehmen können und die Sie deshalb auch nicht unabhängig von Ihren Wahrnehmungen untersuchen können.

Das war im 18. Jahrhundert. Im täglichen Leben spielte die genaue Zeit lange keine große Rolle. Eine Sekunde war der 60. Teil einer Minute, die der 60. Teil einer Stunde. Aus 24 h wurde ein Tag, aus 365 Tagen ein Jahr, und die Sonne gab den Takt vor. Das reichte ja auch – jedenfalls bis ins 20. Jahrhundert. Raumfahrt, Computer, Präzisionsmessungen brauchten eine genauere Sekunde. Und sie kam 1967 mit Cäsium-Atomen und per Mikrowelle.

9 192 631 770

Zeit – ja, da haben wir jetzt eine bessere Definition. Wir brauchten dafür eine sehr stabile Mikrowellenquelle, die mit einer bestimmten Frequenz strahlt. Die liefert uns das Cäsium-133-Atom. Die ursprüngliche Sekunde nahmen wir quasi als Vorlage – schließlich wollen wir ja unsere gewohnte Zeiteinteilung nicht ändern – und zählten, wie oft die ausgewählte Strahlung in diesem Zeitintervall schwingt:
9 192 631 770 mal. Diese Frequenz haben wir in die neue Sekunden-Definition übernommen.

Der Schritt von der Sonnenuhr zum Cäsium-133-Atom ging zu schnell? Kein Wunder, immerhin hat in der Zwischenzeit Herr Einstein gewaltig mit der a-priori-Zeit aufgeräumt. Einfacher ist es dadurch allerdings nicht geworden.

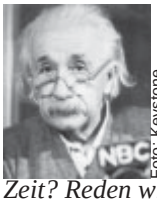


Foto: Keystone

Zeit? Reden wir lieber von Raumzeit! Raum und Zeit gehören untrennbar zusammen. Und beide hängen von der Masse ab, die sich darin befindet: Ein Planet krümmt mit seiner großen Masse die Raumzeit sehr stark. Und diese Krümmung ihrerseits bestimmt, wie sich der Planet bewegt. Genaueres dazu finden Sie in meiner Allgemeinen Relativitätstheorie. Und in der Speziellen Relativitätstheorie geht's einfach nur darum, dass Zeit relativ ist. Sie kennen ja das Beispiel: Wenn ich meinen Zwilling auf eine Reise mit annähernd Lichtgeschwindigkeit schicke, dann kann es passieren, dass ich in vielen Jahren, selbst senil, einen Mann in den besten Jahren wieder in Empfang nehme.

Die neuen Einsichten sind etwa 100 Jahre alt – richtig angekommen sind sie bei den Menschen aber noch nicht. Genau wie die andere große Revolution: die Quantenphysik. Ohne sie würde auch das Cäsium-Atom aus Braunschweig in dieser Reise gar nicht auftauchen.

Zeit: Für uns Atome hier ein verdammt wichtiger Job. Sagen wir mal so: Unser Leben besteht aus einem trägen Grundzustand. Da ist nicht viel mit uns los. Um in einen

Die Wellentheorie des Lichts setzt sich immer mehr durch. Christiaan Huygens beschreibt diese Wellentheorie in seiner Schrift „Traité de la lumière" (Abhandlung über das Licht), die **1690** veröffentlicht wird.

18. Jahrhundert

Nachdem im 17. Jahrhundert die Wellentheorie des Lichts en vogue war, favorisiert das 18. Jahrhundert die Teilchentheorie. Verantwortlich dafür ist Isaac Newton, der in seinem Buch „Optics" (**1704**), das zu einem Standardwerk der Experimentalphysik wird, die Wellentheorie mit dem Argument verwirft, dass nur Licht-Teilchen einen scharfen Schatten erzeugen können. (Anmerkung: Die Beugung von Licht an Kanten ist zu gering, als dass Newton sie hätte beobachten können.)

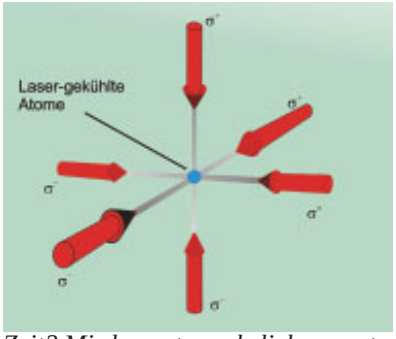
Chester Moor Hall erfindet **1733** das achromatische Fernrohr, dessen Objektiv aus zwei verschiedenen Glassorten besteht. Die chromatische Verzerrung des einen Glases wird durch die des anderen ausgeglichen.

Christiaan Huygens bekommt um **1746** mathematische Verstärkung durch Leonhard Euler, der die Lichtbrechung auf der Annahme eines Wellenphänomens beschreibt. Die Farben des Lichts entsprechen dabei unterschiedlichen Wellenlängen.

→ S. 19

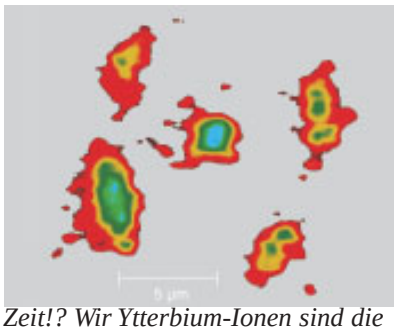
angeregteren Zustand zu kommen, muss uns jemand einen ordentlichen Tritt geben. Und wir sind da sehr eigen. Der Tritt muss genau richtig sein, sonst passiert gar nichts. Einen solchen Tritt verpassen uns Photonen, das sind die Lichtteilchen, die hier als Mikrowellen auf uns geschossen werden. Nur wenn die Mikrowelle genau auf unsere Anregungsfrequenz eingestellt ist, können die Photonen ihre Energie an uns weitergeben. Dann sind wir Atome eine Weile aufgeregt, bis wir wieder zurückfallen in die Trägheit. Das Gerät, in dem wir eingesperrt sind, misst, wie viele von uns jeweils angeregt werden. Wenn es besonders viele erwischt hat, signalisiert es der Mikrowelle, dass sie ihre Photonen haargenau mit der richtigen Frequenz losschickt. Mit der Frequenz, bei der 9 192 631 770 Schwingungen eine Sekunde sind.

Auf diese Weise messen die Atomuhren, die kaum größer sind als eine altmodische Standuhr und in Braunschweig in einer kupferverkleideten Halle stehen, die Zeit ziemlich genau: Hätte man sie gestartet, als die ersten Vorgänger des Menschen begannen, auf zwei Beinen zu gehen, würden sie heute kaum eine Sekunde falsch gehen. Andererseits haben die Atome ein paar Schwierigkeiten verschwiegen. Zum Beispiel, dass sie als Quantenobjekte manchmal gar nicht wissen, ob sie nun angeregt sind oder nicht. Oder dass sie so schnell durch die Mikrowellenphotonen fliegen, dass die gar keine Gelegenheit haben, sie zu treten. Oder noch schlimmer, dass die Zeit für die schnellen Atome anders vergeht und sie deshalb auch die Frequenz der Photonen anders wahrnehmen – Einsteins Zwilling lässt grüßen! Deshalb werden in den neuesten Uhren-Modellen die Atome erstmal zur Ruhe gebracht – mit einem Kühllaser.



Zeit? Mir kommt es, ehrlich gesagt, nur auf die Sekunde an, und mit meiner Laserkühlung wird sie noch genauer. Laserkühlung hört sich paradox an? Ist sie nicht. Denn Kühlung heißt ja nur, dass sich die Atome nicht mehr so wild bewegen. Wir machen das so: Wir Kühllaser strahlen mit einer Frequenz, die gerade noch nicht ausreicht, um die Atome anzuregen. Wenn so ein schnelles Atom aber auf uns zufliegt, dann erlebt es den gleichen Effekt, den Menschen von heranbrausenden Polizeiwagen mit Sirene kennen: Der Ton klingt höher, beziehungsweise: die Frequenz wird erhöht. Deshalb kann dieses Atom jetzt ein Photon aus unserem Kühlstrahl absorbieren, dabei verliert es etwas Bewegungsenergie. Wenn das oft genug passiert, wird das Atom immer langsamer – also immer kälter. Es steckt quasi in einer Kühl-Falle.

Die gekühlten Atome bilden das Herzstück der Cäsium-Fontäne, der neuesten unter denjenigen Atomuhren, die auch wirklich schon einmal zur Weltzeit beigetragen haben. In der Fontäne schweben 10 Millionen langsame Atome durch die Mikrowellenfelder. Der Rest funktioniert wie bei der Standard-Atomuhr – nur noch zehnmal genauer. Von dieser Qualität gibt es weltweit nur vier Exemplare – eine davon in der PTB. Probleme gibt's natürlich auch hier noch: Zum Beispiel die Kollisionen der Atome untereinander, die das Ergebnis empfindlich stören. Aber die Lösung ist schon in Sicht.



Zeit!? Wir Ytterbium-Ionen sind die Zeitweiser des neuen Jahrtausends! Wir sind individualistischer als die Horde Cäsium-Atome, bei uns wird immer nur ein Atom in der Paul-Falle mit einem Elektron beschossen. Es wird dadurch zum Ion. Und dann ist es, ganz allein, für die Frequenzkontrolle zuständig. Wir werden hier auch nicht mehr von Mikrowellen getreten, sondern von Lasern – die haben viel mehr Energie, schwingen also viel schneller, und genau das ist nötig, um uns anzuregen. Wir geben unser Bestes, um zum neuen „optischen Frequenznormal" zu werden – aber hier in Braunschweig machen uns noch die ultrakalten Calcium-Atomwolken Konkurrenz. Und in anderen Zeitlabors regen sich Quecksilber- und Indium-Ionen im Dienste der genauen Sekunde an und ab.

Die neue Ein-Ion-Uhr der PTB wird, wenn sie ideal ausgereift ist, wahrscheinlich so genau sein, dass sie in zehn Milliarden Jahren gerade mal eine Sekunde falsch geht. Das heißt: Wäre bei der Entstehung der Erde gleich diese Uhr mitgelaufen, dann müsste die Erde noch mal so alt werden, wie sie jetzt ist, und erst dann würde die Uhr knapp eine Sekunde falsch gehen.

Zeit? Bei unserem besten Experiment ist das Ytterbium-Ion 16 Monate in der Falle geblieben. Immer schön zentriert, damit Kühllaser und Uhrenlaser – der Laser also, der das Ion mit der richtigen Frequenz in den gewünschten

Anregungszustand tritt – es genau treffen. Die beiden Laser wechseln sich ab. Immer wenn der Kühllaser das Ion nicht in seinem Grundzustand antrifft, weiß die Apparatur: Okay, der Tritt des Anregungslasers war genau richtig, er hat das Ion erwischt. Das ist es, was wir wollen. Dann kommt die zweite große Herausforderung: Die Anregungsfrequenz ist ja jetzt eine optische Frequenz; vorher haben wir mit Mikrowellen gearbeitet. Schon um aus der richtigen Mikrowellenfrequenz eine Sekunde zu bekommen, muss man mehr als neun Milliarden Schwingungen in dieser kurzen Zeit akkurat abzählen. Bei der verwendeten optischen Frequenz sind es über 688 Billionen ...

So lange die Sekunde über das Cäsium-Atom und eine Schwingung im Mikrowellenbereich definiert ist, bleibt der Erfolg der optischen Uhren natürlich etwas gebremst. Das ist ungefähr so, als würde man einen neuen Maßstab für Hundertstelmillimeter an ein ausgefranstes Maßband legen. Vielleicht wird aber, wenn die neue Methode stabil und ausgereift ist, die Sekunde in einigen Jahren neu definiert. Eine so genaue Sekunde brauchen diejenigen, die sich mit den Grundlagen der Physik beschäftigen. Zum Beispiel mit der Frage, ob das, was wir als Naturgesetz bezeichnen, tatsächlich immer schon galt – oder ob sich möglicherweise mit der Zeit „konstante“ Kräfte und Verhältnisse geändert haben. Am Rande der aktuellen wissenschaftlichen Diskussion kann man aber auch noch ganz andere Abenteuer mit (oder ohne) Zeit erleben.

Zeit? Ich weiß gar nichts mehr! Im letzten Jahr behauptete dieser amerikanische Physikprofessor – Ronald Mallett – , dass er eine Zeitmaschine bauen kann. Einstein hat Zeitreisen mit seiner Relativitätstheorie ja nicht ausgeschlossen, und Mallett glaubt, er könne sie tatsächlich umsetzen. Im Kreis umlaufende und stark verlangsamte Lichtstrahlen sollen dafür sorgen, dass Zeit und Raum ihre Dimensionen tauschen und zum ersten Mal einen Abzweig vom steten Zeitfluss schaffen. Dann begegnete man noch Claus Kiefer, einem Professor für Theoretische Physik in Köln, und hörte Ideen, wie sie im Prinzip schon der heilige Augustinus hatte – nur nicht so physikalisch, natürlich. Kiefer sagt: Es gibt die Zeit eigentlich gar nicht. Die Physik funktioniert bei den elementaren Gesetzen ohne Zeit, und es ist rätselhaft, wie die Zeit in die Welt kommt. Also kann man davon ausgehen, dass es im Prinzip gar keine chronologische Abfolge gibt. Allein unser Bewusstsein konstruiert aus der Überlagerung aller Zustände ein Fortlaufen der Dinge. Die Ewigkeit, so hat sich Augustinus das wohl gedacht, ist gar nicht ewig, weil sie überhaupt keine zeitliche Ausdehnung hat. Sie ist eher Gottes Blick auf eine statische Gleichzeitigkeit von allem, was war, ist und je sein wird ... oder ... gewesen sein wird?

Solange wir immer nur davon reden, aber nie wirklich meinen, dass wir gar keine Zeit haben, reicht es vielleicht zu wissen, dass die Cäsium-Atomuhren der PTB – sie gehören zu den genauesten der Welt – einen Sender bei Frankfurt kontrollieren. Der sendet pausenlos Signale aus, die den Funkwecker korrekt auf Sommerzeit umstellen und dem Videorekorder automatisch die Zeit diktieren. Und zwar ganz unabhängig davon, ob es sie nun gibt oder nicht.

JULIA FÖRSTER

Aus Russland erhält die Wellentheorie philosophische Unterstützung: Michail Wassiljewitsch Lomonossow ist in seiner Arbeit „Der Ursprung des Lichts und der Farben“ (**1756**) vom Licht als Welle überzeugt.

Der Franzose Claude Chappe erfindet **1791** den Semaphor, einen Apparat zur optischen Nachrichtenübermittlung.

19. Jahrhundert

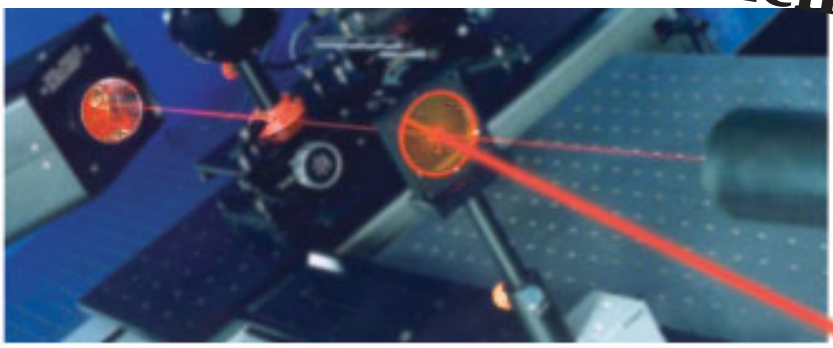
Es gibt „Licht“ jenseits des Sichtbaren: Im Jahr **1800** entdeckt Wilhelm (William) Herschel die Infrarotstrahlung. Er stellt fest, dass dieses unsichtbare Licht jenseits von Rot die meiste Wärme erzeugt. Ein paar Jahre später wird John Leslie zeigen, dass die Wärmestrahlung die gleichen Eigenschaften wie die Lichtstrahlung hat.

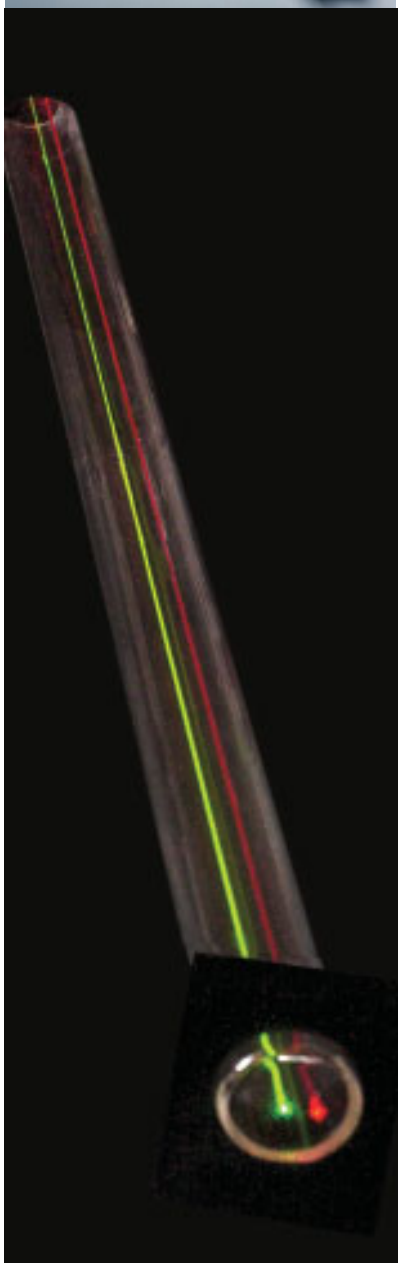
Auch auf der anderen Seite des sichtbaren Spektrums ist die Optik nicht zu Ende: Der Physiker Johann Ritter entdeckt **1801** – bei der Arbeit mit Silberchlorid – die UV-Strahlen.

Der Begriff Interferenz (die Überlagerung von Licht) ist für immer mit Thomas Young verknüpft. **1802** veröffentlicht Young seine Arbeit „On the theory of light and colours“, in der er nachweist, dass Licht Interferenzmuster erzeugen kann – etwa, indem es durch zwei schmale Spalte hindurch geschickt wird. Interferenz ist nur mit Wellen möglich.

→ S. 21

Lineale aus Licht





Das Urmeter hat als Verkörperung der Längeneinheit schon lange ausgedient. Wer heutzutage eine Länge exakt messen will, braucht Licht, am besten aus einem Laser. In der PTB werden die Grenzen der Längenmessung immer weiter vorgeschoben.

Wie ein Erdbeben könnte ein vorbeifahrender Lastwagen auf die Atome des glatt polierten, dunklen Granitblocks im Keller des Abbe-Baus der PTB wirken. Und die Körperwärme eines Menschen reicht aus, um den Fels und die aufliegenden Geräte um ein paar milliardstel Meter auszudehnen. Selbst der federleichte Aluminium-Schlitten, der luftgepolstert über den Granitblock gleitet, drückt den Fels um Bruchteile einer Haaresbreite nach unten. Ein Horror für Jens Flügge: Der PTB-Wissenschaftler will das genaueste Lineal der Welt bauen. Der „Nanometer-Komparator“, an dem er zusammen mit Kollegen seit zwei Jahren arbeitet, soll demnächst den Abstand zwischen Strichen auf Längenmaßstäben bis auf fünf milliardstel Meter (5 Nanometer = 5 nm) genau messen, die Strukturen auf Masken für Computerchips sogar (in bestimmten Fällen) auf ein paar zehntel Nanometer. Damit das klappt, muss Ruhe herrschen in der Nanowelt.

Um das lästige Zittern und Wackeln, die Temperaturschwankungen und Luftbewegungen der makroskopischen Welt von ihrem Messgerät fernzuhalten, haben Flügge und seine Kollegen zahlreiche Vorsichtsmaßnahmen getroffen. Der Nanometer-Komparator steht rund acht Meter unter der Erde, mitten in einer aufwendig klimatisierten Halle. Deren Decke besteht aus 30 Zentimetern Beton und 1,20 Metern Dämmmaterial. Zusätzlich ist sie von zwei Metern Erde bedeckt. Das schottet den Messraum sowohl von Vibrationen als auch von Sommerhitze oder winterlichem Frost ab. Gegen die Körperwärme der PTB-Techniker kann der Nanometer-Komparator allerdings nicht abgeschirmt werden. Eine Messung kann deshalb erst zehn Stunden nachdem der letzte Mensch die kleine Messkabine innerhalb des großen Messraums verlassen hat, beginnen. Während der Messungen darf nicht einmal der Vorraum betreten werden.

Die Abstände wackeln

Wenn der Nanometer-Komparator zur Ruhe gekommen ist, kann es losgehen. Sein eigentliches Messinstrument ist ein hochgenaues „Lineal“, das aus Licht besteht, grünem Licht mit einer Wellenlänge von genau 532 Nanometern, erzeugt von einem Neodym:Yttrium-Aluminium-Granat-Laser. „Die Wellenberge und -täler des Laserlichts sind praktisch die Striche eines solchen Lichtlineals“, erklärt Harald Schnatz vom PTB-Laboratorium „Längeneinheit“. „Mit ihnen kann man einen Millimeter noch mal in 2000 Abschnitte unterteilen“. Doch das Lineal aus Licht ist nicht so starr wie eines aus Stahl oder Holz. Die Abstände zwischen den „Messstrichen“ schwanken ein kleines bisschen, weil das vom Laser abgestrahlte Licht nicht immer exakt die gleiche Wellenlänge hat. Um diesen Störfaktor auszuräumen, wird die Wellenlänge in einer komplizierten Prozedur durch Vergleich mit bestimmten Atomübergängen „stabilisiert“. Vor kurzem ist es Schnatz zusammen mit Kollegen gelungen, die Frequenz eines bestimmten Übergangs von Calcium-Atomen, die bei 455 Billionen Schwingungen pro Sekunde (Hertz) liegt, bis auf acht Hertz exakt zu bestimmen.

Laser, deren Frequenz und Wellenlänge unter genau festgelegten Bedingungen mit einer möglichst kleinen Unsicherheit sehr präzise bekannt sind, so genannte Frequenznormale, ersetzen heutzutage das Urmeter. Der Stab aus Platin-Iridium verändert sich auf Dauer zu stark; schließlich ist er von der Temperatur abhängig. Der Maßstab des Licht-Lineals dagegen ist mittlerweile so genau, dass andere Störfaktoren bei der Längenmessung eine wesentlich größere Rolle spielen. Zum Beispiel die Luft: Sie verändert Geschwindigkeit und Wellenlänge des Lichts um einen winzigen Bruchteil. Dummerweise hängt die Veränderung von mehreren Faktoren ab: von Temperatur, Druck, Feuchtigkeit und der genauen Zusammensetzung der Luft. Um eine Länge von einem Meter mit einer Genauigkeit von besser als 10 Nanometern zu bestimmen, müsste die Temperatur bis auf ein hundertstel Grad Celsius konstant gehalten werden. Beim Nanometer-Komparator ist das kaum zu erreichen; er enthält einige Wärmequellen, die nicht ausgelagert werden können. Die Lösung für dieses Problem heißt: die Luft verbannen. Die Laserstrahlen laufen komplett im Vakuum.

Spiegel-Tricks

Um eine Genauigkeit von 5 Nanometern zu erzielen, ist ein Abstand von 532 Nanometern (die Wellenlänge des Nd:YAG-Lasers) zwischen den „Messstrichen“ natürlich noch viel zu breit. Mit einem Trick kann der Zwischenraum noch weiter unterteilt werden. Dafür nutzen Jens Flügge und Kollegen das Prinzip der Interferometrie. Der Lichtstrahl des Lasers wird in zwei Teile aufgespalten. Sie nehmen unterschiedliche Wege und werden über geschickt aufgestellte Spiegel später wieder zusammengeführt. Die Messanordnung wird so gewählt, dass der Unterschied zwischen den Wegen, die beide Strahlen zurücklegen, gerade die Länge ist, die man messen möchte. Wenn die beiden Lichtstrahlen wieder zusammenfinden und sich überlagern, bildet sich ein Interferenzmuster: Treffen Wellenberg und Wellental aufeinander, löschen sich die zwei Lichtwellen gegenseitig aus, beim Zusammentreffen von zwei Wellenbergen entsteht ein heller Strich. Durch die Verschiebung der beiden Strahlen gegeneinander werden auch winzigste Längen messbar. Eine Lichtwellenlänge kann so noch mal in 2000 bis 60 000 Teile zerlegt werden. Das genügt selbst Jens Flügge und seinen Auftraggebern. Der Nanometer-Komparator soll bei der Produktion von Computerchips eingesetzt werden. Dabei werden so genannte Masken gebraucht, um nacheinander Transistoren oder elektrische Leitungen auf dem Chip abzubilden. Damit bei den immer kleiner werdenden Chips alles am richtigen Platz landet, müssen die winzigen Masken nanometergenau gemessen werden.

Das Prinzip der Interferometrie wird auch bei anderen Längenmessungen verwendet, bei denen es nicht auf Nano-, aber doch auf Bruchteile von Mikrometern ankommt. PTB-Forscher um Ahmed Abou-Zeid messen Maßbänder, Messlatten, Mikrometerschrauben und Schieblehren, damit sie in der Industrie höchsten Anforderungen genügen können. Auch so genannte Parallel-Endmaße – Sätze von 122 glatt polierten, unterschiedlich langen Metallquadern, die zur Kalibrierung von Maschinen dienen – werden in der PTB mit Hilfe der Interferometrie exakt gemessen. Das ist Routine für die PTB-Forscher. An der Grenze der Machbarkeit bewegt sich dagegen Arnold Nicolaus aus dem PTB-Labor „Interferentielle Längenmessung“. Er arbeitet daran, das Volumen eines kugelförmigen Silizium-Einkristalls von der Größe einer Boule-Kugel so exakt zu messen, dass er sich höchstens um den hundertmillionsten Teil irrt. Um die geforderte Genauigkeit zu erreichen, misst Nicolaus mit einem eigens konstruierten Kugel-Interferometer den Durchmesser der Silizium-Kugel mit einer Unsicherheit von etwa einem Nanometer. „Das ist die momentane Leistungsgrenze der Längenmessung“, sagt er. Seine Messungen tragen dazu bei, auch das Urkilogramm dereinst überflüssig zu machen. Dann kann auch die Masseeinheit ohne Prototyp auskommen. Bislang ist das Meter dem Kilogramm darin um einige Längen voraus.

Ute Kehse

Bilder (S. 20): Das Urmeter (links oben) ist heute ein Museumsstück. Für Längenmessungen ist Licht der bessere Maßstab – Laser fungieren als „optische Lineale“. Im Bild links unten laufen die (ansonsten nicht-beobachtbaren) Lichtstrahlen zweier Laser durch eine mit Jod-Gas ($^{129}I_2$) gefüllte Küvette. Das rote Licht stammt aus einem Helium-Neon-Laser, das grüne aus einem Nd:YAG-Laser – der Wirtskristall aus Yttrium, Aluminium und Granat ist mit Neodym dotiert. Der rote Strahl aus dem He-Ne-Laser im Bild rechts oben ist Ergebnis fotografischer Kunst und wäre mit bloßem Auge nicht sichtbar.

In London gehen **1807** auf öffentlichen Straßen die ersten Gaslaternen an. Der Erfinder William Murdock hatte den Großversuch zuvor mit seiner eigenen Fabrik unternommen – es war das erste Gebäude, das mit Gaslicht versorgt wurde. Bereits 1792 hatte Murdock die Eigenschaften von „Leuchtgas“ entdeckt und erste Leuchtgaslampen gebaut. Murdocks Erfindung ist so überzeugend, dass die London Gas Light & Coke Company entsteht, die in der ganzen Londoner Innenstadt Gaslaternen aufstellen wird.

Zwischen zwei Kohlestäben, die an eine Stromquelle angeschlossen sind, kann ein sehr heller Lichtbogen gezündet werden. Humphry Davy erfindet diese Bogenlampe **1808** – das erste elektrische Licht. Allerdings ist sie nicht ganz praktisch – sie erzeugt unglaublich viel Rauch und strahlt enorme Hitze ab. (Einen größeren kommerziellen Erfolg hat Davy ein paar Jahre später, als er die Sicherheitsgrubenlampe erfindet.)

Mit Johann Wolfgang von Goethe bekommen Newtons Ideen einen prominenten Widersacher – was die Deutung des Lichts betrifft. Newton hatte 1672 weißes Licht durch Prismen geschickt und es so in seine Spektralfarben zerlegt. Gleichzeitig konnte er den Prozess umkehren und aus verschiedenfarbigen Lichtstrahlen wieder weißes Licht erzeugen. Newton hatte Licht als Zusammengesetztes entdeckt. In seiner Farbenlehre von **1810** vertritt Goethe hingegen eine ganzheitliche, psychologisch orientierte Farbentheorie.

→ S. 23

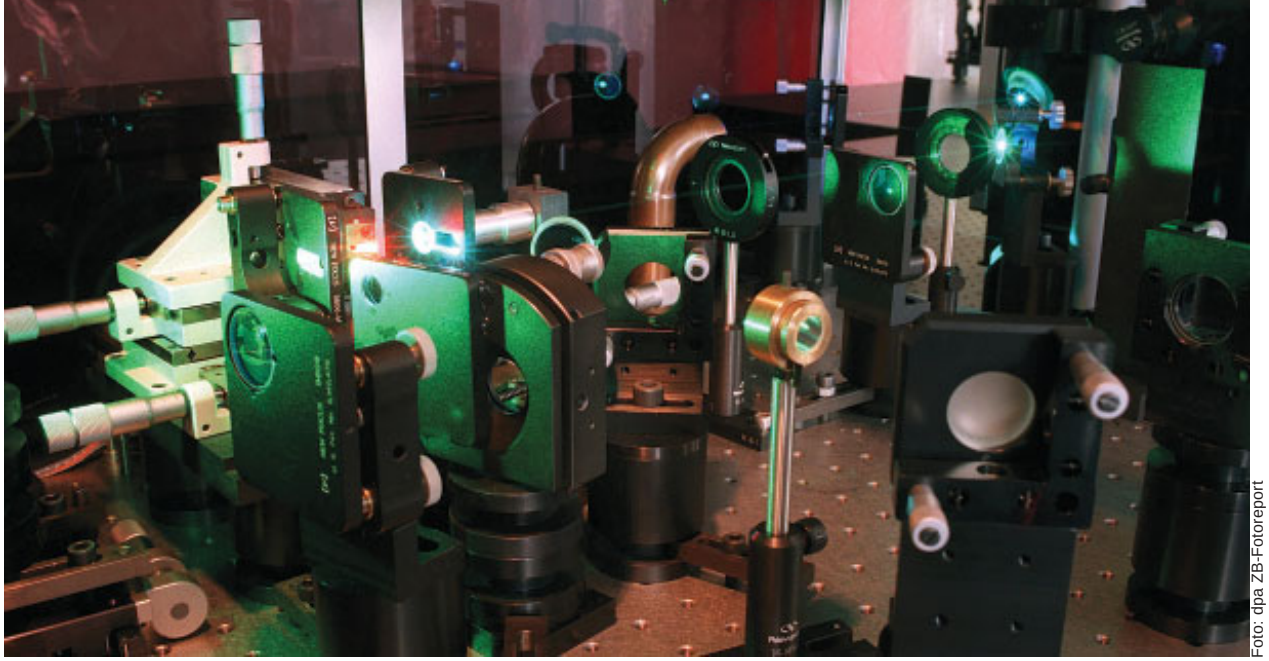


Foto: dpa ZB-Fotoreport

Laser – eine „Lawine“ aus Licht

Ein Laser ist ein ausgeklügelter „Lichtverstärker“. Er erzeugt extrem energiereiches Licht. Es beginnt in einem Gas (oder auch Halbleiter oder Festkörper – je nach Lasertyp), in dem sich normalerweise fast alle Atome oder Moleküle in einem Zustand möglichst geringer Energie, im so genannten Grundzustand, befinden. Nur wenige der Atome tummeln sich auf einem höheren Energieniveau. Pumpt man nun – durch Einstrahlen von Licht oder durch eine elektrische Entladung – Energie in das Gas hinein, so werden viele der Atome angeregt und die ursprüngliche Situation (viele Atome im Grundzustand, wenige im Anregungszustand) dreht sich genau um. Die Physiker sprechen daher auch von „Besetzungsumkehr“. Überlässt man die Atome sich selbst, dann fallen alle nach kurzer Zeit spontan in ihren Grundzustand zurück.

Um zu einer Laserwirkung zu kommen, muss man dieser spontanen Emission zuvorkommen und das Atom zwingen, in seinen Grundzustand zurückzufallen: Ein eingestrahltes Photon genau passender Energie kann diesen Übergang gezielt auslösen. Indem das Atom in seinen Grundzustand fällt, sendet es seinerseits ein Photon aus. Es hat genau dieselbe Energie, Wellenlänge und Phase wie das eingestrahlte Photon. Aus einem Lichtteilchen sind somit zwei geworden. Jetzt muss man nur noch an den Enden des Lasers Spiegel parallel zueinander aufstellen. Die abgegebenen Photonen werden reflektiert und veranlassen angeregte Atome, ihrerseits ein Photon abzugeben. Diese werden wieder reflektiert, veranlassen das nächste Atom zur Photonenabgabe – der Lawineneffekt ist da. Er hat dem Laser seinen Namen gegeben: „**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation“ (Lichtverstärkung durch stimulierte Emission). Ein Teil der Photonen entweicht durch einen der Spiegel, der teilweise durchlässig ist, und bildet den Laserstrahl, der dann im CD-Spieler, in der Supermarktkasse, beim Hautarzt oder in der Industrie verwendet werden kann.

Der Laser – von dem es 1962 noch hieß, er sei „eine Lösung auf der Suche nach einer Anwendung“ – ist heute aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken. Das liegt an den besonderen Eigenschaften des Laserlichts, die aus der erzwungenen oder stimulierten Emission resultieren: Die einzelnen Photonen, die beim „Herabspringen“ der Elektronen aus dem Anregungs- in den Grundzustand ausgesendet werden, sind nicht nur streng einfarbig (monochrom), sondern – im Gegensatz zu jeder anderen Lichtquelle – sämtlichst miteinander verkoppelt. Verschiedene Wellenzüge des Laserlichts können daher auch dann miteinander überlagert werden (interferieren), wenn sie sehr unterschiedlich lange Wege zurückgelegt haben. Das Maß für diese Fähigkeit, die Kohärenzlänge, beträgt bei Laserlicht leicht 1000 Kilometer, während sie bei anderen monochromatischen Lichtquellen eher bei einigen Zentimetern liegt. Laserlicht eignet sich damit neben seinen zahlreichen anderen technischen Anwendungen auch, nach einigen Tricks der Frequenzstabiliserung, hervorragend als „optisches Lineal“ – für hochpräzise Längenmessungen.

uk/es/jes

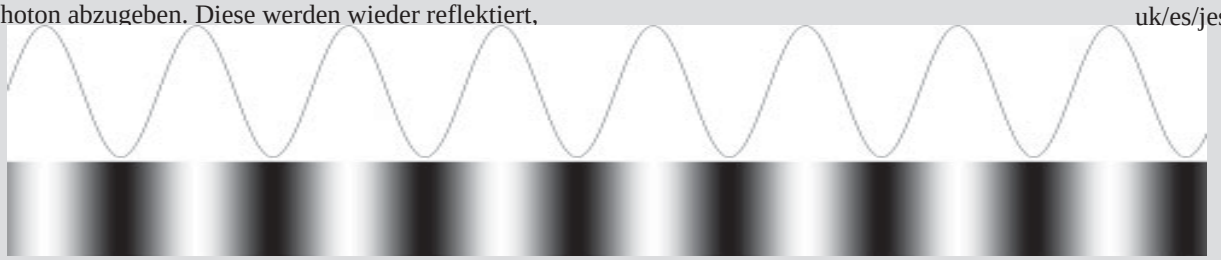


Bild oben: Moderner Femtosekundenlaser. Mit Pulsen von nur 20 Femtosekunden (10^{-15} s) Dauer können ultraschnell ablaufende Prozesse in der Natur – wie das Molekülverhalten während der Photosynthese oder die Dynamik der Ladungsträger in Halbleitern – „geblitzt“ werden.

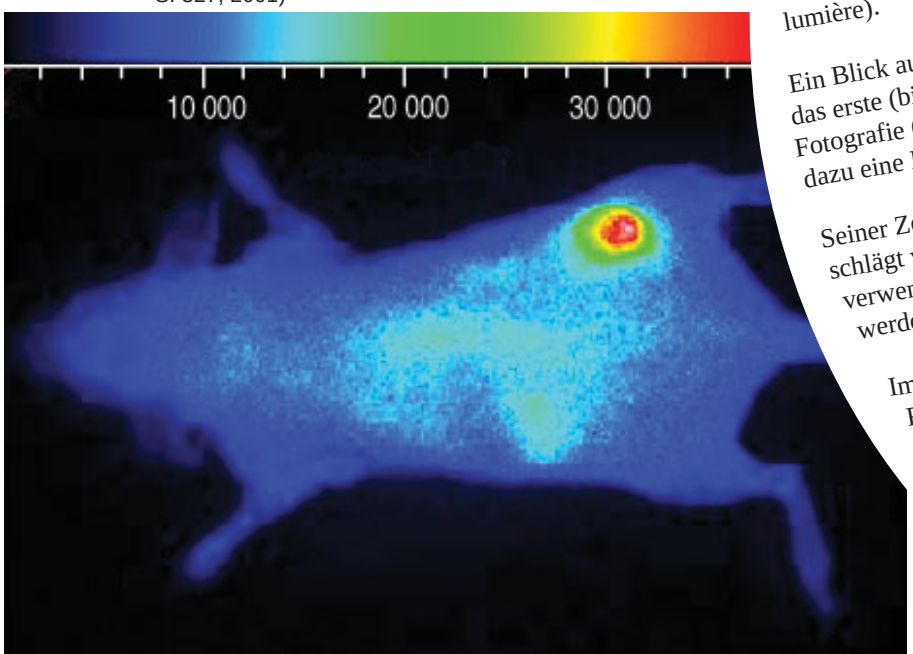
Grafik unten: Licht plus Licht kann auch Dunkelheit ergeben. In diesem Phänomen der Interferenz – die Grafik stellt ein streng periodisches Muster heller und dunkler Interferenzstreifen dar – zeigt sich die Wellennatur des Lichts. Kleinste Gangunterschiede (Bruchteile der Wellenlänge) der überlagerten, kohärenten Lichtstrahlen lassen sich damit auflösen.

Ein großes Talent, dieser Undercover-Agent: Unerkannt ist er quer durch das Land gereist und hat Kontakt mit den Mitgliedern der „Vereinigung des Bösen“ aufgenommen. Und jetzt funkt er. In aller Seelenruhe. Verschlüsselt. Und was am anderen Ende der Welt die Entschlüsselungexperten in die Zentrale bringen, sind allerfeinste Tatsachen: zum Beispiel, wo das Hauptquartier liegt und wie groß es ist.

„Da liegt der Tumor“, sagt Rainer Macdonald und zeigt auf ein Foto auf einem Poster. Eine Maus mit einem leuchtenden Fleck auf der rechten Körperseite. Was hier leuchtet, ist nicht der Tumor selbst, sondern der „Agent“ – ein Kontrastmittel, das die Forscher der Maus gespritzt haben. Es hat die Krebszellen im Körper der Maus aufgespürt und sich an sie geheftet. Um Kontakt mit ihrem Agenten aufzunehmen, bestrahlen die Wissenschaftler die Maus mit Laserlicht einer ganz bestimmten Wellenlänge (in diesem Fall 740 nm), das mehrere Zentimeter tief in das Gewebe eindringt. Der Agent antwortet – will sagen: das Kontrastmittel leuchtet auf – und verrät den Sitz des Tumors. „Eine faszinierende Sache, nicht wahr?“ sagt Macdonald. „Stellen Sie sich vor, ein Arzt muss nur einen solchen Stoff spritzen, und wir können dann mit Hilfe von Laserlicht und einer Spezialkamera Tumore im Körper aufspüren.“

Aber so weit sind er und seine Kollegen vom Fachbereich „Medizinische Messtechnik“ der PTB in Berlin noch nicht – trotz erster Erfolge bei der Maus. Gemeinsam mit ihren Kooperationspartnern müssen sie noch so manches Experiment starten, bis das neue Kontrastmittel auf den Markt kommen kann. „Es hätte wesentlich schneller gehen können – wenn nicht Menschen und Tiere so ein aufmerksames Immunsystem hätten“, erklärt Macdonald. Im Reagenzglas funktioniert es schon seit zehn Jahren: die Kopie eines ganz normalen Vorgangs im menschlichen Körper. Ein intaktes Immunsystem versucht körperfremde Substanzen, zum Beispiel ein eindringendes Virus, abzuwehren. Dazu werden Antikörper gebildet, die auf ihrer Oberfläche speziell geformte Strukturen aufweisen. Sie passen – wie ein Schlüssel zum Schloss – genau auf entsprechende Strukturen auf der Virus-Oberfläche. Hat sich ein Antikörper dort festgesetzt (angedockt), dann ist das Virus identifiziert und kann außer Gefecht gesetzt werden. Das Konzept der Wissenschaftler sieht ganz ähnlich aus. Sie wollen bestimmte Körperzellen nachweisen, zum Beispiel weiße Blutzellen oder Tumorzellen. Dazu suchen sie sich Stoffe, mit denen sie diese Zellen gezielt aufspüren können – und zwar über dasselbe Schlüssel-Schloss-Prinzip: Ein ausgewählter Antikörper (zum Beispiel aus dem Blut von Mäusen oder Ziegen), der exakt auf die Oberflächenstrukturen dieser Körperzellen passt, wird mit einem geeigneten Fluoreszenzfarbstoff markiert. Jetzt leuchtet er, wenn man ihn mit Licht bestrahlt. Er ist ein wirksamer Spion, zumindest im Reagenzglas oder auf dem Objektträger. Dasselbe auch im lebenden Organismus zu erreichen ist wesentlich schwieriger, denn das Immunsystem wehrt den Antikörper normalerweise ab. Doch die Forscher des Kooperationspartners haben den Agenten gewissermaßen verkleidet – Einzelheiten werden nicht verraten, die Entwicklung läuft ja noch –, damit er unerkannt durch die Reihen der Immunabwehr schlüpfen kann. Ob das auch beim Menschen problemlos funktioniert, muss sich noch zeigen. Vielleicht wird die Vision vom Stoff, der den Krebs mit Hilfe von Lasern zum Leuchten bringt und mit Spezialkameras aufgespürt werden kann, schließlich einmal Wirklichkeit.

So wird der Tumor sichtbar: Im Licht eines aufgeweiteten Laserstrahls leuchtet der Fluoreszenzfarbstoff, der sich an die Krebszellen der Maus angelagert hat, auf (Skala: Fluoreszenzintensität als Zahl der über eine bestimmte Belichtungszeit registrierten Photoelektronen). (Nature Biotechn. **19**, S. 327; 2001)



Weißes Licht müsse, so Goethe, viel reiner und einfacher sein als farbiges Licht. Ein Zusammengesetztes könne es nicht sein.

1814 stellt Joseph von Fraunhofer eine ausführliche Abbildung des Sonnenspektrums aus 324 Linien her.

Thomas Young und Augustin Jean Fresnel weisen **1817**/**1818** nach, dass Lichtwellen Transversalschwingungen sein müssen. Fresnel dokumentiert dies in seiner „Abhandlung über die Beugung des Lichts“ (Mémoire sur la diffraction de la lumière).

Ein Blick aus dem Fenster, auf die Dächer der Nachbarhäuser, wird das erste (bis heute erhaltene) Positivbild in der Geschichte der Fotografie (**1827**). Der Franzose Joseph Nicéphore Niépce braucht dazu eine Belichtungszeit von mehreren Stunden (s. S. 35).

Seiner Zeit voraus ist **1827** der Franzose Jacques Babinet. Er schlägt vor, die Wellenlänge von Licht als Längenmaßstab zu verwenden. (Erst 1960 wird das Meter auf diese Weise definiert werden.)

Im selben Jahr veröffentlicht der irische Physiker William Rowan Hamilton seine „Theory of systems of rays“, in der er die Phänomene der Optik aus abstrakten Extremalprinzipien herleitet. (Bekannter als seine Untersuchungen über Strahlensysteme ist ...

→ S. 25

Unser Spion hat es geschafft, ganz tief in die „Vereinigung des Bösen“ einzudringen. Zur Zeit finden wir ihn mitten im Ausbildungslager. Geduldig beobachtet er, wie neue Mitglieder rekrutiert werden. Was so schnell wächst wie diese Organisation, muss irgendwo eine Schwachstelle haben.

„Dieser Farbstoff hat sich direkt in die DNA, die Erbsubstanz, eingelagert“, erklärt Jörg Neukammer vom Laboratorium „Messtechnik in der Laboratoriumsmedizin“. Von dort soll er Informationen liefern, die für die Krebstherapie oder -diagnose wichtig sein könnten. „Wir sind noch ganz am Anfang, um mit derartigen Methoden seltene Zellen – zum Beispiel Tumorzellen – im Blut aufzuspüren“, sagt Neukammer. „Aber gerade in diesem Bereich geht die Entwicklung der Wissenschaft sehr, sehr schnell. Was noch vor zwei Jahren als gesichertes Wissen galt, ist heute zum Teil bereits überholt.“ Das gesicherte Wissen von heute lautet folgendermaßen: Bestimmte Farbstoffe können sich an die DNA von Zellen anlagern – auch von Tumorzellen. Und weil Tumorzellen in der Regel eine andere DNA-Menge enthalten als gesunde Körperzellen – der Teilungszyklus ist nämlich gestört –, könnte sich hier eine Möglichkeit bieten, sie nachzuweisen. Das Experiment verläuft nach folgendem Rezept: Man gebe (zusätzlich zu einem spezifischen Oberflächen-Kontrastmittel, einem fluoreszenzmarkierten Antikörper) ein solches DNA-Kontrastmittel in eine Blutprobe. Dann beleuchtet man das Ganze mit Laserlicht der richtigen Wellenlänge. Das eingelagerte Kontrastmittel leuchtet auf und macht die DNA-Menge sichtbar. Wenn auf diese Art bereits kurz nach einer Therapie festgestellt werden könnte, ob die Zahl der Tumorzellen tatsächlich abnimmt, wäre Ärzten und Patienten sehr geholfen. „Es wurde beispielsweise versucht, mit dieser Methode den Fortschritt einer Brustkrebs-Therapie zu überwachen und Vorhersagen über den Krankheitsverlauf zu treffen. Aber bisher funktioniert es noch nicht zufriedenstellend“, gibt Neukammer zu. Oft bestehen Tumore aus verschiedenen Zellen, unterscheiden sich im DNA-Gehalt oder in anderen Eigenschaften. Vielleicht führen verschiedene Verfahren, kombiniert eingesetzt, zum Erfolg. Die Wissenschaftler werden nicht locker lassen.

Foto: National Institute of Health/Science Photo Library

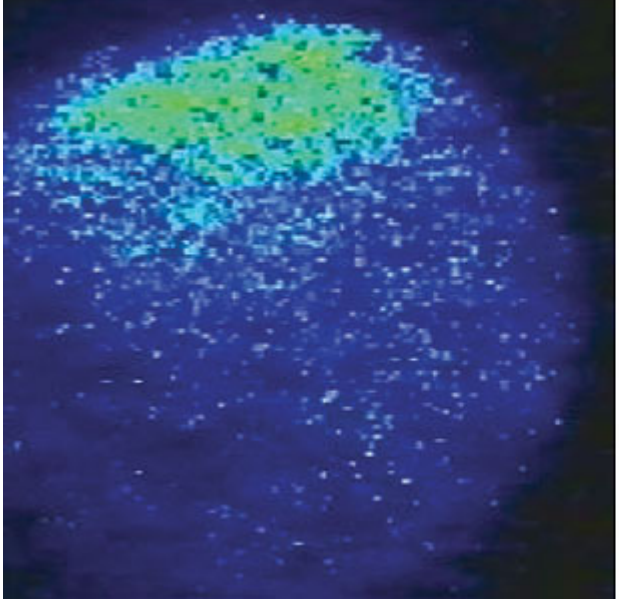
In diesem Reagenzglas befindet sich DNA, die mit einem Fluoreszenz-Farbstoff markiert wurde.

Was ist Fluoreszenz?

Dass bestimmte Stoffe leuchten, nachdem sie angestrahlt wurden, hat man schon in der Antike bestaunt. Der englische Physiker Sir G. Stokes gab dem Phänomen im Jahr 1865 den Namen Fluoreszenz, nach dem Mineral Flussspat oder Fluorit. Die genaue Erklärung konnte erst die Atomphysik des 20. Jahrhunderts liefern: Licht, das auf einen Fluoreszenz-Farbstoff fällt, kann die Moleküle des Farbstoffs anregen. Dabei hebt ein Photon (Lichtteilchen) ein Elektron des Moleküls auf ein höheres Energieniveau. Die einfallende Lichtenergie wird für kurze Zeit – Bruchteile einer Sekunde – in diesem Zustand zwischengespeichert. Ein Teil dieser Energie „verpufft“ gewöhnlich als Wärme. Der verbleibende Rest wird als Licht emittiert; dieses Fluoreszenzlicht ist entsprechend langwelliger als das anregende Licht. Genau dies macht sich die Fluoreszenz-Diagnostik zu Nutze. Ein Laser sorgt für die nötige Anregung des Farbstoffs, und ein Detektor registriert die „langwelligere Antwort“.

Geht ein Mediziner auf die Jagd nach einem Tumor, so tut ihm dieser nur selten den Gefallen, von selbst fluoreszierend zu leuchten. Hier kommen Fluoreszenzfarbstoffe als Kontrastmittel ins Spiel, die chemisch an bio-molekulare Sonden (zum Beispiel Antikörper oder auch DNA/RNA-Fragmente) gebunden werden und sich dadurch sehr spezifisch an den „Übeltäter“ andocken. Diese leuchtenden „Spione“ leisten nicht nur in der Medizin gute Dienste, sondern beispielsweise auch im Umweltschutz, wo sie Verunreinigungen in Gewässern aufspüren.

es



Das Videobild (rechts) erlaubt noch keine eindeutige Diagnose. Aber derselbe Bereich als Fluoreszenz-Falschfarbenbild (links) dargestellt zeigt: In dieser menschlichen Speiseröhre sind einige Schleimhautzellen bösartig verändert: die Vorstufe eines Tumors.

Nirgendwo eine Schwachstelle zu sehen – verdammt langwierige Geschichte. Plötzlich klappt es: Unserem gewitzten Agenten gelingt es, ein paar Nachwuchs-Mitgliedern der „Vereinigung“ Minisender unterzujubeln. Jetzt heißt es cool bleiben und abwarten, bis die Leute an ihre Standorte geschickt worden sind. Und dann: gezielter Zugriff.

„Diese Krebszellen machen es uns einfach. Sie leuchten von selbst“, sagt Rainer Macdonald. Er steht vor einem weiteren Poster. Wieder ein Foto – keine Maus diesmal –, darauf mehrere leuchtende Flecke. „Das sind Krebszellen. Sie enthalten einen körpereigenen Farbstoff, Protoporphyrin IX. Hier mussten wir kein Kontrastmittel zugeben, sondern nur eine körpereigene Vorläufer-Substanz, um zu verstärken, was im Ansatz schon da war.“ Der Farbstoff, der sich vor allem in Krebszellen anreichert, ist ein Glücksfall für die Wissenschaftler. Darum ist die zugehörige technische Anwendung auch schon recht weit entwickelt: die fluoreszenzgestützte Endoskopie. Wenn ein Arzt mit einem entsprechend ausgestattetem Endoskop – beispielsweise in der Speiseröhre – nach Tumoren sucht und eine verdächtige Stelle entdeckt, kann er sich zusätzliche Gewissheit verschaffen: Ein Fußtritt auf einen Schalter am Boden, das normale Bild verschwindet und ein Fluoreszenzbild erscheint auf dem Monitor. Zeigt sich hier in der verdächtigen Region ein Leuchten, dann hat der Patient vielleicht Krebs. Eine gezielte Gewebeentnahme (Biopsie) ist angesagt. „Das Problem ist, dass der Arzt die Bilder mit den bisher verfügbaren Geräten nur nacheinander sehen kann“, erklärt Macdonald. „Es wäre viel besser, wenn er ständig beides im Blick hätte, das normale Weißlicht- und das Fluoreszenzbild.“ Genau das kann die Apparatur, die die Mitarbeiter des Fachlaboratoriums entwickelt und in Zusammenarbeit mit Ärzten in der Charité, Berlin erprobt haben. Dabei sendet der Laser, dessen Licht zur Anregung des Farbstoffs nötig ist, seine Strahlung nicht kontinuierlich, sondern in sehr kurzen Pulsen aus. Es sind nur Nanosekunden (eine Nanosekunde ist der milliardste Teil einer Sekunde) – viel zu kurz, um das normale Endoskopbild zu stören. So kann der Monitor, den der Arzt immer im Blick hat, ständig beide Bilder nebeneinander liefern. „Es ist allerdings noch einige Entwicklungsarbeit zu leisten, bis aus dem jetzigen Forschungsgerät ein marktreifes Diagnoseverfahren für die klinische Routine werden könnte“, sagt Macdonald. Unter anderem müsste das eingesetzte Lasersystem vereinfacht und die beiden Einzelbilder sollen zu einem einzigen Bild vereint werden. Das wäre für den Arzt optimal – und ein weiterer kleiner Sieg im Kampf gegen den Krebs.

ERIKA SCHOW

heute die Hamiltonsche Mechanik, die ebenfalls auf Extremalprinzipien aufgebaut ist.)

Wie nehmen das Auge Licht und das Ohr Schall war? Heinrich Weber und Gustav Theodor Fechner finden **1834** heraus, dass die subjektive Empfindung einer Lautstärke oder einer Helligkeit bei Verdoppelung des physikalischen Reizes sich nicht auch verdoppelt, sondern jeweils um einen konstanten Betrag zunimmt (heute bekannt als Weber-Fechnersches Gesetz).

Die Daguerrotypie wird erfunden: Louis Jacques Daguerre entwickelt **1839** ein photographisches Verfahren, mit dem er Silberbilder (Photos) auf Metallplatten festhalten kann.

1842 ist das „Geburtsjahr“ des Doppler-Effekts. Johann Christian Doppler beschreibt, wie sich Frequenzen für einen Beobachter verschieben, wenn die Wellen aus einer sich (relativ zum Beobachter) bewegenden Quelle stammen. Bei Schallwellen ist der Effekt leicht hörbar: Das Pfeifen eines herannahenden Zuges klingt deutlich höher als das eines sich entfernenden. Beim Licht ist ein ähnlicher Effekt als „Rotverschiebung“ bekannt (formuliert von Hippolyte Fizeau).

Michael Faraday nimmt an, dass Licht aus elektromagnetischen Wellen besteht (**1845**). Er stößt hierauf bei seinen Untersuchungen des Magnetismus und der Beobachtung, dass magnetische Felder die Polarisation von Licht beeinflussen.

→ S. 29

„Was wissen die Armen, denen nie ein Blau aufging
am Ziel ihres Herzens oder am Weg ihres Traums in der Nacht.
Oder die Enthimmelten, die Frühblauberaubten.“
(Else Lasker-Schüler, *Briefe nach Norwegen. Vom Himmel*)

Foto: E. Zueger, Arco Images

Im Blaumann

blaumachen

Der Blaue Reiter

Himmelblau

Um es gleich zu sagen: Nicht jeder Himmel ist blau. Über der Venus etwa ist der Himmel gelblich-weiß und die Sonne sieht blässlich rot aus. Auf unserem Blauen Planeten dagegen, der auch von außen blau schimmert, ist alles viel schöner. Um nichts in der Welt gäben wir doch unser Himmelblau her, oder? Das Blau zu haben ist die eine Sache, es zu verstehen die andere. Die Physik zumindest weiß seit Lord Rayleigh (1842 bis 1919), warum unser Himmel blau ist. Verantwortlich dafür sind die Luftmoleküle, also vorwiegend Stickstoff und Sauerstoff, die sich dem weißen Sonnenlicht in den Weg stellen und es in alle Raumrichtungen streuen. Diese Streuung hängt jedoch empfindlich, genauer: mit der vierten Potenz, von der Wellenlänge des Lichts ab: Je kürzer die Wellenlänge, umso stärker die Streuung. Und die Wellenlänge von Blau ist halb so groß wie die von Rot. Wenn wir also auf irgendeine Stelle des Himmels gucken, sehen wir das von den dort vorhandenen Molekülen gestreute Licht – also vorwiegend blau. Dass der Abendhimmel rot leuchtet, erklärt diese Rayleigh-Streuung übrigens auch: Da jetzt für das Licht der Weg durch die Atmosphäre sehr weit ist, hat das Licht, das wir sehen, schon sehr viele Luftteilchen passiert. Die blauen Anteile sind jetzt längst in alle Richtungen „verstreut“ und wir sehen nur noch, was übriggeblieben ist: Rot.

PS: Diese Erklärung genügt noch nicht für den Venushimmel. Dazu ist es noch nötig zu wissen, dass auch die Dichte der Atmosphäre eine Rolle spielt. Je höher die Dichte, umso stärker die Streuung. Und die Atmosphäre der Venus ist vorwiegend eine „dicke Suppe“ aus Kohlendioxid (von der dichten Wolkenschicht, die zusätzlich alles beschattet, ganz zu schweigen).

Ein zusätzliches Thema beim Himmelblau, wenn auch nicht nur da, ist die Luftverschmutzung: Große Teilchen wie Staub oder Ruß in die Atmosphäre zu blasen bedeutet auch, das Blau auszubleichen. Das Prinzip der wellenlängenabhängigen Rayleigh-Streuung gilt nämlich nur, wenn die Wellenlänge groß gegenüber dem Teilchendurchmesser ist. Das gilt nicht mehr bei Staub oder Ruß oder sonstigen Aerosolen. Dann dominiert eine andere Streu-Variante (nach ihrem Entdecker Mie-Streuung genannt), die sich kaum noch um die Wellenlänge des einfallenden Lichts schert. Das Streulicht der Schmutzteilchen ist dann weiß, überlagert sich der Rayleigh-Streuung an den Luftmolekülen und das Blau des Himmels wird blässlich. Zugleich verdanken wir der Mie-Streuung aber auch ein sehr schönes Bild: Unsere Wolken sind – bei schönem Wetter – nämlich nur darum weiß, weil die Wassertröpfchen, aus denen sie hauptsächlich bestehen, groß sind im Vergleich zu den Wellenlängen des sichtbaren Lichts. Also: Rayleigh macht den Himmel blau, Mie die Wolken weiß.

Tscherenkow-Blau

Wer bisher dachte das blaue Licht sei lediglich im Grimmschen Märchen zu Hause, und man müsste in einen tiefen Brunnen steigen, um es herauszuholen, der irrt. Ganz unmärchenhaft, aber nicht weniger magisch schön, leuchtet es aus den Wasserbecken der Kernreaktoren, wie hier im Forschungsreaktor Geesthacht. Ursache dieses blauen Leuchtens sind sehr schnelle Elektronen, die bei der Spaltung der Uran-Atome aus den Kernbrennstäben entweichen und in das umgebende Wasser eindringen. Diese Elektronen sind schneller, als es Licht in Wasser sein kann. Und analog zu einem Düsenjet, der beim Überschreiten der Schallgeschwindigkeit einen Knall provoziert, „knallt“ es bei den Elektronen optisch, sobald sie die Lichtmauer durchbrechen. Dieser Tscherenkow-Effekt (erstmals 1934 beobachtet) tritt immer dann auf, wenn geladene Teilchen, also etwa Elektronen, mit Überlichtgeschwindigkeit durch ein (dielektrisches) Medium schießen, das sie polarisieren können. Mit „Lichtgeschwindigkeit“ ist dabei die maximale Geschwindigkeit für Licht in diesem Medium gemeint. Und je höher die Brechzahl des Mediums, umso stärker wird das Licht gebremst. (Schneller als das Licht zu sein gelingt einem Teilchen daher wesentlich leichter in einem Medium hoher Brechzahl.) Im Reaktorbecken geben die „verboten schnellen“ Elektronen nun etwas von ihrer Energie an die Wassermoleküle ab und diese wiederum – sobald der Raser vorbei ist – beginnen zu leuchten, vorzugsweise (da der Brechungsindex von Wasser gerade hier besonders hoch ist) mit UV-Strahlung und mit blauem Licht.

PS 1: Der Tscherenkow-Effekt hat durchaus auch wissenschaftlich-praktischen Nutzen: Auf einem 1800 Meter hohen Plateau in Namibia etwa suchen Tscherenkow-Teleskope den Himmel nach schwachen blauen Lichtblitzen ab, welche rasend schnelle Teilchen und Gammaquanten, als Botschafter explodierter Sterne in fernen Galaxien, in der irdischen Atmosphäre auslösen. Die Astrophysiker erhoffen sich, dass ihnen das Tscherenkow-Licht etwas über den Ursprung und die Entstehungsmechanismen der kosmischen Teilchen verrät. Denn noch ist weitgehend ungeklärt, wie die Supernovae und andere „Hexenkessel“ aussehen, die solche Hochenergiepakete auf die Reise schicken.

PS 2: Dass Festkörperphysiker gern und oft eine andere Sicht auf die Dinge haben, ist bekannt. In diese Rubrik fällt die Nachricht, dass das Tscherenkow-Licht kürzlich auch bei Unterlichtgeschwindigkeit in einem Medium beobachtet wurde. Aber liebe Festkörperphysiker: Pawel Tscherenkow und den Theoretikern Igor Tamm und Ilia Frank (die den Effekt mit dem Hinweis auf die Überlichtgeschwindigkeit erklärt haben) ist der Nobelpreis (aus dem Jahr 1958) nicht mehr zu nehmen.

Foto: GKSS, Geesthacht

Tscherenkow-Strahlung aus dem Reaktorbecken des Forschungszentrums Geesthacht

Foto rechts oben: Rot, grün, blau – das Licht dreier Laserdioden. Das grüne Laserlicht mit einer Wellenlänge um 520 nm stammt aus einer Zink-Selenid basierten Diode, das blaue Laserlicht (Wellenlänge bei 401 nm) aus einer Gallium-Nitrid-Diode. Beides sind Entwicklungen der Arbeitsgruppe um Professor Detlef Hommel des Instituts für Festkörperphysik, Universität Bremen. Die rote Laserdiode ist eine kommerzielle mit einer Emission bei 670 nm. (Der Lichteffekt auf dem Foto resultiert einfach daraus, dass das Laserlicht auf einem gekrümmten Blatt Papier abgebildet wurde.)

Laser-Blau

Mutter Natur ist etwas geizig gewesen, als sie die Halbleiter gemacht hat – es steckt viel Rot, Gelb und auch Grün in ihnen, aber nur sehr selten Blau. So fanden die Physiker zwar rasch Verbindungen wie Galliumarsenid, die zum Grundmaterial für lichtemittierende Dioden (LED) taugen. Doch aus diesen LED ließ sich nur langwelligeres Licht zwischen Grün und Rot herauskitzeln. Ein technisch interessantes Material, in dem die Elektronen weite Energiesprünge machen und dabei blaues oder violettes Licht aussenden, war dagegen nicht zu finden. Man experimentierte mit unterschiedlichsten Verbindungen und landete immer wieder in Sackgassen aus Materialproblemen. Bis schließlich Mitte der 90er Jahre aus Japan die Meldung einer blauen LED aus Galliumnitrid (GaN) kam, einem Material, das eigentlich als „ungeeignet“ abgeschrieben war. Zunächst leuchtete diese GaN-LED nur wenige Sekunden, doch nach kurzer Entwicklungszeit schon tagelang. Der Durchbruch war geschafft. Mittlerweile stecken LED aller Farben in Computer- und Instrumentenanzeigen und Displays aller Art.

Die blaue LED war das nötige Sprungbrett für eine noch viel größere Herausforderung: eine Halbleiterdiode, die blaue Laserstrahlung emittiert. Ein Laser mit derart kurzer Wellenlänge bietet besonders für die Computer-Branche eine enorm reizvolle Aussicht, ließen sich doch mit blauem Licht viel feinere Strukturen auf CD und DVD schreiben. Eine Informationsmenge von 20 Gigabyte wären so auf einer DVD-Scheibe problemlos unterzubringen. Auch hier ist die japanische Entwicklung weit – in kleiner Stückzahl werden blaue Laserdioden bereits produziert, allerdings zu enormen Preisen (um 2000 Dollar pro Stück) vertrieben. Ein deutsches Verbundprojekt, Ende der 90er Jahre gestartet, will nun die japanische Entwicklung ein- und überholen. Gemeinsam mit Osram Opto Semiconductors in Regensburg arbeiten das Fraunhofer Institut für Angewandte Festkörperphysik und mehrere Universitäten an diesem Projekt. Das vorläufige Ergebnis: Der blaue Halbleiterlaser strahlt mit Wellenlängen zwischen 410 und 420 Nanometern nun auch in hiesigen Laboratorien. Bevor er jedoch als kleiner Laserchip kommerziell angeboten werden kann, müssen noch zahlreiche Hürden genommen werden. So gilt es, die Lebensdauer der Laserdiode zu erhöhen und das Problem der (noch nötigen) Kühlung in den Griff zu bekommen.

Jens Simon

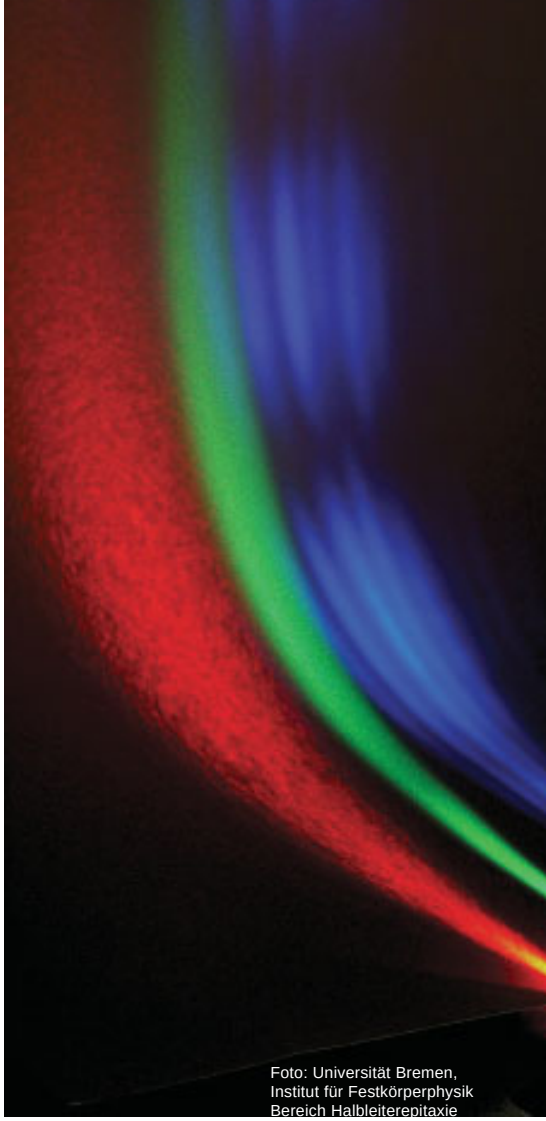


Foto: Universität Bremen, Institut für Festkörperphysik Bereich Halbleiterepitaxie

Wie schnell ist das Licht? Eine recht präzise Antwort gibt **1849** Hippolyte Fizeau mit einem Versuchsaufbau, bei dem er Licht durch die Lücken eines rotierenden Zahnrads schickt und es von einem Spiegel reflektieren lässt. Fällt das reflektierte Licht gerade auf den nächsten Zahn des rotierenden Zahnrades, so lässt sich aus der Umdrehungsgeschwindigkeit die Lichtgeschwindigkeit errechnen. Fizeau kommt derart auf 313 290 km pro Sekunde.

Eine enge Beziehung zwischen Elektromagnetismus und Licht findet Gustav Robert Kirchhoff **1857**: Er erkennt die Lichtgeschwindigkeit *c* im Vakuum als die vermittelnde Konstante zwischen magnetischen und elektrostatischen Kräften.

Erstmals **1858** arbeitet ein Leuchtturm mit elektrischem Licht: Der South-Foreland-Leuchtturm in Kent wird mit Bogenlampen ausgestattet.

Jeder Körper sendet Temperatur- oder Wärmestrahlung aus. Wird er starkt erhitzt, glüht er zunächst rot, dann gelb und schließlich weiß. Gustav Kirchhoff fand **1859** eine grundlegende Gesetzmäßigkeit dieser Temperaturstrahlung: Bei gegebener Temperatur sendet ein Körper nur Strahlung solcher Frequenz aus, die er zugleich auch absorbieren könnte.

In den 60er Jahren bekommen die Erscheinungen der Elektrizität und des Magnetismus ihre endgültige mathematische Gestalt. ...

→ S. 31

„Mehr Rot als nur ein Tropfen“

Ein Interview über Farben und Licht. Erika Schow und Jens Simon sprachen mit Gijs van Tuyl, Kunsthistoriker und Direktor des Kunstmuseums Wolfsburg, einem international bedeutenden Museum für moderne Kunst.

Redaktion: *Herr van Tuyl, welche Farbe hat Kunst für Sie? Und welche Farbe hat Physik?*

van Tuyl: So generell – rein assoziativ? Vielleicht ist Physik weißes Licht. Klarheit. Und Künstler wählen natürlich aus – bestimmtes Licht. Kunst ist vielleicht blau. Das geht bei mir auf eine Jugendliebe zurück: Mein erster großer Eindruck von Kunst waren diese „Collages Découpés“, diese Scherenschnitte von Matisse, die ich im Stedelijk Museum in Amsterdam gesehen habe. Nicht nur blau, aber die blauen haben mich am meisten beeindruckt. Blau hat etwas mit Purheit zu tun, mit Ferne und auch mit Nähe.

Matisse hat einmal gesagt, ein Quadratmeter Blau sei blauer als ein Quadratzentimeter desselben Blaus.

Da hat er absolut Recht. Im 20. Jahrhundert hat man festgestellt, dass Farbe und Form eng zusammenhängen. Das kann man auch mit Rot machen, wie bei Barnett Newman: Wenn man eine Riesenfläche Rot hat, dann ist es mehr Rot als nur ein Tropfen. Die Farbe ändert sich durch die Größe. Wenn man einen Stuhl anstreichen möchte und hat nur ein kleines Farbmuster, dann bekommt man einen ganzen anderen Stuhl, als man sich vorher vorgestellt hat. Die Quantität bestimmt die Qualität.

Was ist die Qualität von Farbe? Was ist überhaupt Farbe?

Farbe ist Wahrnehmung. Wie bei dem Matisse-Spruch: Die Wahrnehmung wird von Farbe konditioniert und umgekehrt. Ohne Wahrnehmung gibt es keine Farbe. Das ist ein altes philosophisches Problem: Wenn niemand eine blaue Frau von Matisse sieht, dann gibt es das Blau nicht. Wenn ich eine Farbe sehe und mir vorstelle, dass das Bild hier im Kopf entsteht – darüber wundere ich mich ständig. Daher ist die bildende Kunst auch so interessant, weil sie mit der Wahrnehmung zu tun hat. Farbe hat eine endlose Geschichte in der Kunst. Es gab ein paar Momente, wo sich Kunstgeschichte und Naturwissenschaft berührt haben. Die Farbenlehre von Newton ist natürlich maßgebend. Es gab Maler, die fast naturwissenschaftlich mit dem Licht umgegangen sind. Ein sehr gutes Beispiel ist Seurat. Diese pointillistische Malerei hat direkt mit neuen Lichttheorien* (*s. Fußnote Seite 31*) zu tun.

Foto: Artothek/Succession H. Matisse/VG Bild-Kunst, Bonn 2003

Foto: Artothek

Foto: Artothek

Hat sich die Darstellung des Lichts in der Malerei gewandelt? Da gab es doch zunächst so etwas wie sakrales Licht – dass die Dinge aus sich selbst leuchten, weil sie göttlich erscheinen sollen und das Licht ihre Heiligkeit symbolisiert. Und später war das Licht eher ein beleuchtendes Licht.

Es gibt Bilder, die haben ein internes Licht. Das kann sakral sein, muss es aber nicht. Nehmen wir Caravaggio oder Rembrandt oder Vermeer, da kommt das Licht von innen heraus. Oft gibt es da einen Lichtbrunnen. Im 16. und 17. Jahrhundert waren es Kerzen, am Ende des 19. Jahrhunderts dann elektrische Lampen oder Gaslampen. Um diese Zeit gab es einen großen Streit darüber, was die Lampen der Zukunft sind, Gaslampen oder elektrische Lampen. Manet hat in dem Bild „Les Folies Bergeres“ auch das elektrische Licht abgebildet. Er wurde stark kritisiert dafür. Elektrisches Licht in einem Bild abzubilden, als Gegenlicht, das war schon ein Abenteuer.

Wie könnte man das Licht in der modernen Malerei verstehen?

Heute ist das Bild der Lichtbrunnen. Das ganze Bild. Das sieht man am besten in der Videokunst. Das ist natürlich ganz neu. Oder diese Riesen-Videoprojektionen am Times Square – der schönste Ort der Welt, was Licht betrifft.

Bilder strahlen – meinen Sie damit nur Videokunst oder auch Gemälde?

Auch Gemälde. Wir haben hier gerade eine Ausstellung über englische Kunst. Da gibt es diese Bilder aus den 60er Jahren, die strahlen richtig nach außen. Nicht so wie früher, wo man einen Raum hat, und der ist beleuchtet, und es gibt Schatten usw. – nein, das Ding ist gleich Licht. Strahlt. Bringt etwas zu uns. Trotzdem ist die Beleuchtung sehr wichtig. Es gab eine sehr interessante Ausstellung im Van-Gogh-Museum in Amsterdam, über Licht. Van Gogh war ja der Maler des Lichts. Er ist dem Licht hinterhergereist, vom dunklen Holland nach Paris und dann noch weiter in die Provence, wo dann all die berühmten Bilder entstanden sind. Und da hat ihn das Licht fast aufgefressen. In dieser Ausstellung hat mich eines besonders beeindruckt: Sie haben ein Bild von Van Gogh, eine Landschaft, 1886 oder 1889, immer wieder anders beleuchtet: Gaslicht, elektrisches Licht, Spotlicht, Neonröhren und Tageslichtsituation. Es war jedes Mal ein absolut anderes Bild. Licht ist das Wichtigste in der Kunst, denn ohne Licht geht nichts. Das war einer der Aspekte dieser Ausstellung: was das Licht mit dem Bild macht. Oft ist das auch von Künstlern thematisiert worden. Zum Beispiel in der berühmten Serie von Monet „Die Kathedrale von Rouen“. Er hat sie einen ganzen Tag lang immer wieder gemalt, morgens, mittags, abends. Ich weiß nicht, wie viele Bilder es geworden sind, vielleicht sechs – und die Kathedrale ist jedes Mal eine andere Kathedrale, weil das Licht sich ständig ändert. Also, Licht wird auch thematisiert, als ständiges Element in der Kunst. In Eindhoven, im Stedelijk Van Abbemuseum, hat mal ein holländischer Konzeptkünstler, Jan Dibbets, in einem kleinen Raum die Projektion des Tageslichts vom Fenster von morgens bis abends festgehalten. Es ist eine räumliche, sinnliche und auch fast metaphysische Erfahrung.

Ist Licht etwas, was einen zum Künstler werden lässt? Bei Physikern ist das manchmal so. Einstein wollte zum Beispiel sein Leben lang wissen, was Licht ist, das war die Triebfeder bei ihm. Ist das bei Künstlern auch so?

Ich würde sagen, indirekt. Ich schätze, eine Triebfeder ist sehr stark die Verwunderung über das, was man sieht. Licht ist ein Transportmittel. Ich glaube nicht, dass sich zuerst das Licht verselbstständigt, das passiert später, sondern dass sie sich erstmal über die Formen- und Farbenvielfalt dieser Welt Gedanken machen.

Wenn ein Physiker sich wundert und sich Fragen stellt, dann sind seine Antworten die Theorien über diese Welt. Wenn ein Künstler sich wundert und sich Fragen stellt, sind dann die Antworten seine Bilder?

Ja.

James Clerk Maxwell stellt **1864** seine Theorie des elektromagnetischen Feldes auf. Die Maxwellschen Gleichungen beschreiben auch, wie durch die Wechselwirkung zwischen Elektrizität und Magnetismus Wellen erzeugt werden – Lichtwellen.

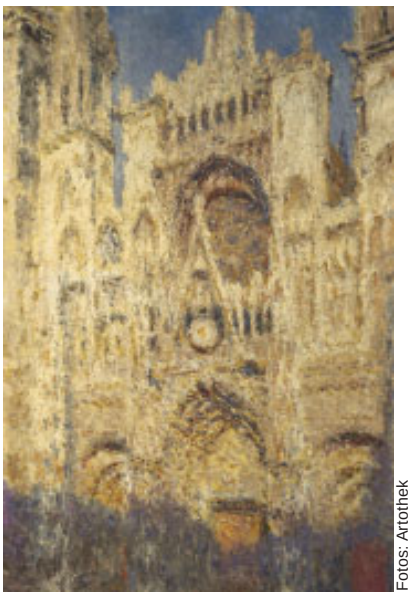
Die Physik bedient sich der Idee des „idealen Schwarzen Körpers“ (eines Körpers, der jede auftreffende Strahlung vollkommen absorbiert), um die Phänomene der Temperaturstrahlung zu verstehen. Ein geschlossener Kasten mit einer kleinen Öffnung (ein Hohlraum) kommt diesem Ideal sehr nahe. Josef Stefan findet **1879** experimentell einen fundamentalen Zusammenhang zwischen der Temperatur eines solchen Schwarzen Körpers und seiner abgegebenen Strahlungsleistung.

15 Jahre später leitet Ludwig Boltzmann dieses Gesetz mathematisch her. **1893** entdeckt Wilhelm Wien, wie sich das Maximum der Strahlung eines Schwarzen Körpers bei Änderung der Temperatur verschiebt. (1911 wird Wien hierfür den Nobelpreis erhalten.) Um die Jahrhundertwende werden das Stefan-Boltzmann-Gesetz und das Wiensche Verschiebungsgesetz den Anstoß geben zu einer der größten Umwälzungen in der Physik.

In der Geschichte des elektrischen Lichts beginnt **1879** eine neue Epoche: Thomas Alva Edison in den USA und Joseph Swan in England konstruieren beide eine Glühfadenlampe, die weiß leuchtet und mehr als 40 Stunden brennt. ...

→ S. 33

* Zum Beispiel mit der Erkenntnis, dass das menschliche Auge nur Sinneszellen für die drei Primärfarben Rot, Blau und Gelb enthält. Die Pointillisten setzten Farbpunkte und -striche mit reiner Farbe wie Mosaiksteinchen eng nebeneinander auf die Leinwand, wissend, dass im Gehirn des Betrachters daraus Mischfarben entstehen. (Anmerkung der Redaktion)



Fotos: Artothek

Aber dann muss er noch über seine Kunstwerke reden. Wenn er das tut, verlässt er doch eigentlich seine Kunstebene. Dann muss er auch solchen Dingen wie Farben plötzlich Namen geben. Er sagt dann vielleicht, ich habe mit spröden Farben gearbeitet, oder mit milden. Also gibt er sozusagen den Farben und ihren Wirkungen Namen.

Es gibt Künstler, die über ihre Kunst reden. Mondrian und Malewitsch haben sehr viel darüber geredet, oder geschrieben jedenfalls. Van Gogh hat sehr viel geschrieben – das ist wunderbar zu lesen – über Gelb und Rot. Er hat übrigens sehr viel Gelb verwendet – das ist auch an der Grenze des Wahnsinns. Es gibt Künstler, die reden, und welche, die nicht reden. Übrigens glaube ich, dass im Grunde auch die Wissenschaft sehr intuitiv ist. Das ist sehr schön nachzulesen bei Popper. In seinem Buch (ich habe es nur auf Englisch gelesen) „The method of scientific discovery" schreibt er, dass es oft ganz verrückte oder sehr intuitive Vorstellungen gegeben hat – bei Einstein und vielen anderen. Dabei sind die Wissenschaftler natürlich verschieden: Einige haben Vorstellungen und richtige Bilder und andere haben das überhaupt nicht, denken total abstrakt, wie in der Mathematik. Und so gibt es auch Kunst, die abstrakt ist, und Kunst, die mit Vorstellungen arbeitet.

Wie ist das bei Ihnen – sehen Sie eine Form vor sich, wenn Sie einen Farbnamen hören? Welche Form hat Gelb?

Gelb ist flach. Es hat keine bestimmte Form. Bei Gelb denke ich einfach an eine Wand.

Bei welchen Farben ist es unmöglich, sie wiederzugeben – ganz konkret drucktechnisch?

Bei vielen ist es unmöglich, bei den meisten. Am allerschwersten ist es dort, wo man nur ganz subtile Farbunterschiede hat. Zum Beispiel gibt es Maler, die nur Weiß malen. Robert Ryman ist ein amerikanischer Maler, der sehr fundamental und elementar malt; es geht ihm darum, die Farbe selbst zu malen, „painting the paint". Das Bild sieht weiß aus, aber es sind eine Menge Farben darunter: Rot oder Grün oder was auch immer. Wenn man dagegen etwas nur weiß anstreicht, dann ist es ganz tot. Es ist bei monochromen Bildern so wichtig, dass Farbe über Farbe gegangen ist. Das ist der Reiz der Farbe: die Komplexität. Das strahlt mit.

Warum ist das „Monochrom Blau" von Yves Klein so ein berühmtes Blau? Was ist das Besondere, die Symbolik daran?

Es ist das Universum, das Endlose, der Kosmos. Und dann ist es ein ganz besonderes Blau. Etwas Rot darin, etwas in Richtung Violett. Das ist einmalig. Es hat auch mit dem Kontext zu tun: Irgendwann, in einer langen Geschichte der Malerei, kommt ein Blau. Es hat mit der Sprache der Kunst zu tun, dass man das auch so erfährt. Aber es ist nicht nur die Konvention. Man muss nicht die Spielregeln kennen, um das Blau von Yves Klein zu verstehen. Ich bin überzeugt, dass es auch eine absolut direkte Wirkung hat, ohne dass man die Ideen kennen muss – so wie bei dem Rot von Barnett Newman oder dem Gelb, Rot und Blau bei Mondrian.

Mondrian soll ganz bewusst Grün vermieden haben.

Ja. Er hat versucht, die Natur – denn er war ein Landschaftsmaler – zurückzubringen auf das Wesentliche. In der Form waren das für ihn Horizontale und Vertikale, keine Diagonale. Denn eine Landschaft ist horizontal und Bäume sind vertikal. Und in der Farbe hat er ganz bewusst die Primärfarben ausgewählt. Also die Hauptfarben, Gelb, Rot und Blau, aus denen man alle anderen Farben mischen kann. Und Schwarz. Er hat ganz bewusst von der Natur abstrahiert. Darum ist er so ein unglaublich wesentlicher Künstler, der dieses Problem so zusammengefasst hat.

Das führt uns zu der Frage, welche Ordnung die Kunst in der Farbvielfalt sieht. Ein Physiker würde die Farben wahrscheinlich nach den Wellenlängen ordnen: erst Rot, dann Gelb und Grün, und schließlich Blau. Ein Drucker wird vielleicht eine Farbtafel nehmen. Was macht ein

Künstler mit Farben? Hat er gewisse Ordnungsschemata?

Ja. Natürlich wird jeder Künstler nach seiner Fasson selig. Aber es gibt so etwas. Im 16. Jahrhundert entstand die Landschaftsmalerei, in Flandern und in Holland. Und das Schema sah so aus: Immer Braun im Vordergrund, Grün in der Mitte und Blau hinten. Und das ist auch richtig: Das Braun ist einem am nächsten, und das Grün ist etwas weiter weg, und das Blau ist die Ferne. Das war eine Art, die Wirklichkeit zu vertiefen. Im Kubismus öffnete man dann nicht mehr, wie in der Renaissance, ein Fenster auf die Wirklichkeit, sondern eher umgekehrt: Es gibt jetzt eine Form im Raum, die kommt auf den Betrachter zu – das ist natürlich eine Wende. Und die Farben kommen auf den Betrachter zu – statt eine Tiefe zu öffnen. Das ist auch das Geniale bei Yves Klein: Das Blau kommt auf uns zu; es geht nicht weg. Die Tiefe kommt auf uns zu, und wir sind ein Teil der Tiefe.

Will das der Maler auch? Will er mit dem Zuschauer zusammenarbeiten?

Er kreiert einen blauen Raum mit seinen Bildern, und man ist in diesem Raum. Ja, das ist, man kann sagen, ein Einbeziehen der Zuschauer. Und da sind wir wieder bei unserem Thema vom Anfang: Es gibt kein Licht ohne Zuschauer. Diese Rolle des Wahrnehmens wird in der Kunst sehr stark betont. Es war immer Teil der Kunst, aber es ist jetzt extrapoliert. Wahrnehmung der Kunst ist ein ständiges Thema geworden.

Zum Schluss noch eine Frage, deren Antwort wir vielleicht schon ahnen: Welche Farbe würden Sie auf eine einsame Insel mitnehmen, wenn in den Koffer nur eine Farbe hineinpasste. Würden Sie Blau mitnehmen?

Nein, dann würde ich Rot mitnehmen. Blau ist überall. Ja, wirklich, ganz spontan. Rot ist auch fantastisch. Das ist nicht Natur, oder nicht sehr Natur. Es gibt nicht so viel Rot in der Natur. Blumen, natürlich. Ja, ich würde Rot mitnehmen.

Vielen herzlichen Dank.

Gijs van Tuyl:
Geboren 1941 im niederländischen Gameren. Studium der Kunstgeschichte in Amsterdam. Danach (unter anderem) Kurator, Leiter eines Kunstamts, Herausgeber einer Zeitschrift für Kunst und Architektur, Kommissar der Biennale Venedig. Seit 1992 Direktor des Kunstmuseums Wolfsburg.
(Foto: Ute Karen Seggelke, Hamburg)

Die Bilder:

Henri Matisse: Das Haar (La Chevelure) (1952)

Georges Seurat: Ein Sommernachmittag auf der Insel Grande Jatte (1884/1886)

Vincent van Gogh: Sämann bei untergehender Sonne (1888)

Claude Monet: Die Kathedrale von Rouen am Morgen, Mittag, Abend (1894)

Piet Mondrian (1872–1944): Composition II with Red, Blue and Yellow, 1930 (Oil on canvas, 72,6 × 54 cm)

Barnett Newman: Eve (1950)

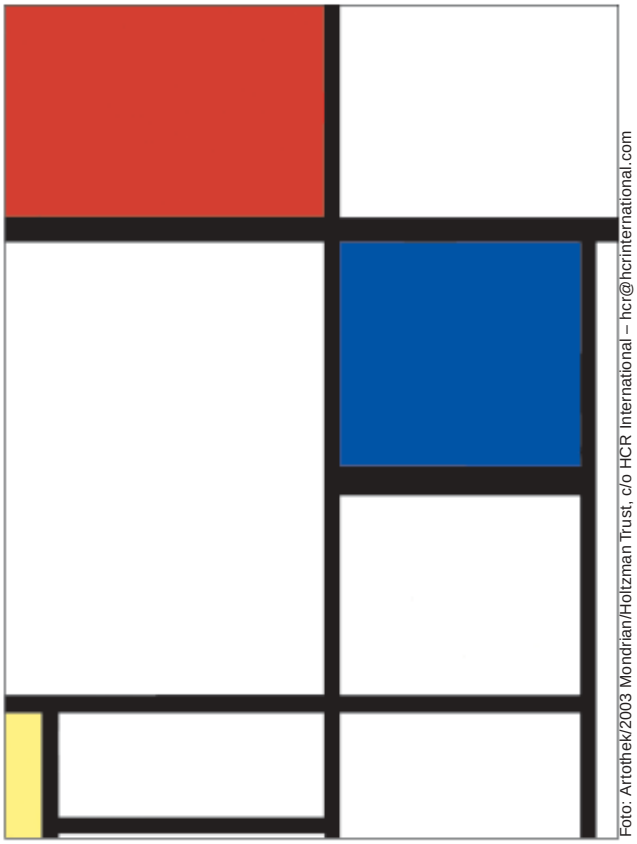


Foto: Artothek/2003 Mondrian/Holtzman Trust, c/o HCR International – hcr@hcrinternational.com

(Heinrich Goebel kam **1854** mit einer Lampe, die knapp 200 Stunden brannte, Edison zuvor. Aber seine Glühlampen-Erfindung ist weit weniger in das Gedächtnis der Physik eingegangen.)

Manchmal kann man dadurch berühmt werden, indem genau das Gegenteil von dem eintritt, was man eigentlich beabsichtigt hat. So ergeht es **1881** dem Physiker Albert Michelson, der sich einen feinsinnigen Versuchsaufbau ausdenkt, um die Geschwindigkeit der Erde durch den allgegenwärtigen Äther zu messen. Michelson baut eine Apparatur, ein Interferometer, mit dem sich mit beispielloser Empfindlichkeit und Genauigkeit durch Überlagerung von Lichtwellen Entfernungen und Laufzeiten messen lassen. Die Geschwindigkeit des Äthers müsste sich in den Versuchsergebnissen niederschlagen. Doch Michelsons Ergebnis: Er kann keine Bewegung der Erde relativ zum Äther messen. Die Lichtgeschwindigkeit erweist sich als konstant. (Der Michelson-Versuch wurde in der Folge, auch mit deutlich verbesserten Apparaturen, beliebig oft wiederholt – immer mit dem gleichen negativen Ergebnis.)

1885 ist das Geburtsjahr der Firma Kodak: Der Amerikaner George Eastman erhält das Patent für eine Maschine, die einen fortlaufenden fotografischen Film produziert. Wenige Jahre später entwickelt er die erste kommerziell nutzbare Rollfilmkamera.

→ S. 35

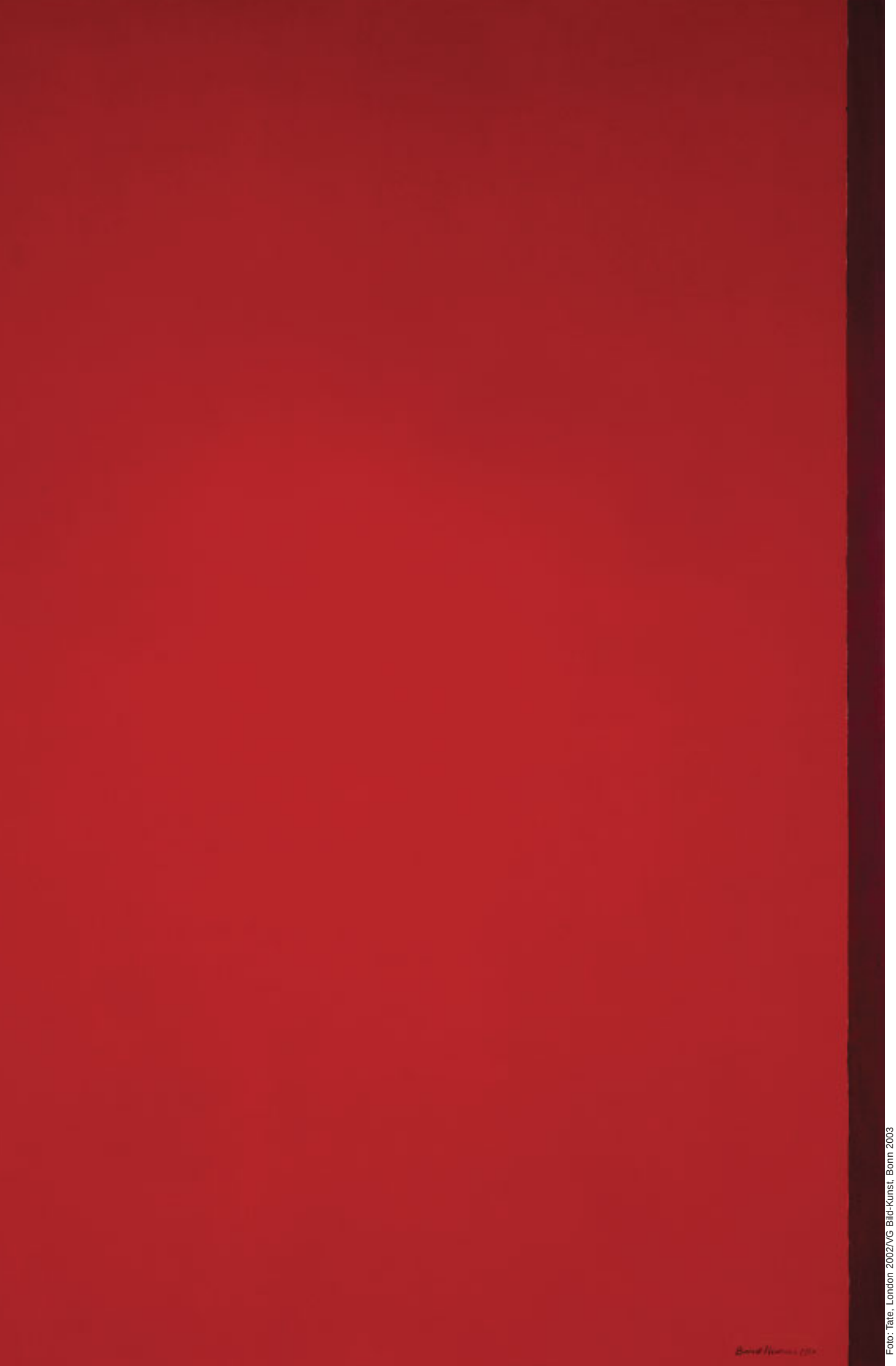


Foto: Tate, London 2002/VG Bild-Kunst, Bonn 2003

Licht-Bilder

Man lasse eine gewisse Menge an Licht für eine gewisse Dauer auf gewisse Materialien fallen – und man erhält ein Abbild der Welt. Nachdem entdeckt war, dass sich das, was wir sehen können, auch tatsächlich einfangen und festhalten lässt, legte die Entwicklung der Fotografie ein gehöriges Tempo an den Tag.

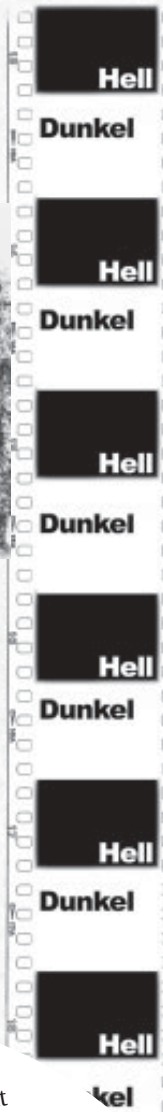
1827 ist es soweit: Für das erste Foto der Welt (oder zumindest das älteste noch erhaltene Foto; siehe rechts) lässt der Franzose Joseph Nicéphore Niépce acht Stunden lang Licht durch die kleine Öffnung seiner Camera obscura auf eine Zinnplatte, mit Bitumen als lichtempfindlicher Schicht, fallen. Louis Jacques Mandé Daguerre gelingt es kurze Zeit darauf, die Lichtempfindlichkeit enorm zu steigern: Das einfallende Licht schwärzt seine mit Jod bedampften Silberplatten bereits nach wenigen Minuten. Sind Niépces Heliographien oder die Daguerreotypien noch jeweils Unikate auf Metallplatten, so werden die Licht-Bilder mit William Henry Fox Talbot reproduzierbar. Talbot erfindet das Negativ-Positiv-Verfahren, bei dem von einem Negativ (noch aus Papier) beliebig viele positive Kontaktkopien hergestellt werden können. Seine Aufnahmen, die er „Photogenic Drawings“ nennt, veröffentlicht er 1844 in dem Buch „The Pencil of Nature“ – es ist das erste Buch überhaupt, das Fotografien enthält. Der Buchtitel hingegen drückt noch die Nähe zur Malerei aus.

Foto: Science Photo Library

Die Fotografie blieb bis zum Ende des 19. Jahrhunderts eine Kunst für wenige. Eine Technik für alle wurde sie mit „You press the button, we do the rest“ – so die Werbebotschaft der amerikanischen Firma Kodak, nachdem ihr Firmengründer George Eastman die Rollfilm-Box-Kamera erfunden hatte. Waren alle 100 Aufnahmen „geschossen“, schickte man die gesamte Kamera ein und erhielt seine Bilder, samt frisch gefüllter Kamera, zurück. Die Welt wurde so, für alle in allen Lebenslagen, fotogen.

Mit Licht auf einer Skala zwischen Hell und Dunkel zu zeichnen ist auch mit heutigen Materialien und Techniken möglich. Dies zeigt die folgende Doppelseite, welche die *maßstäbe* den Fotografen und Fotografie-Auszubildenden der PTB verdanken.

Jens Simon

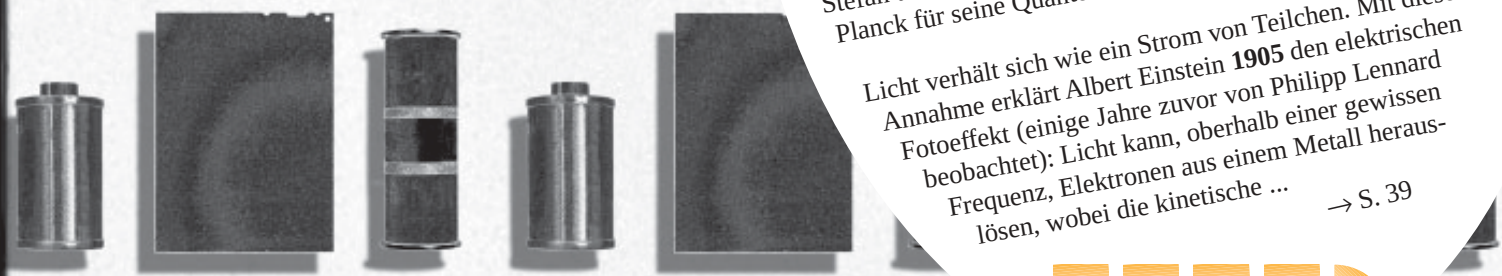


20. Jahrhundert

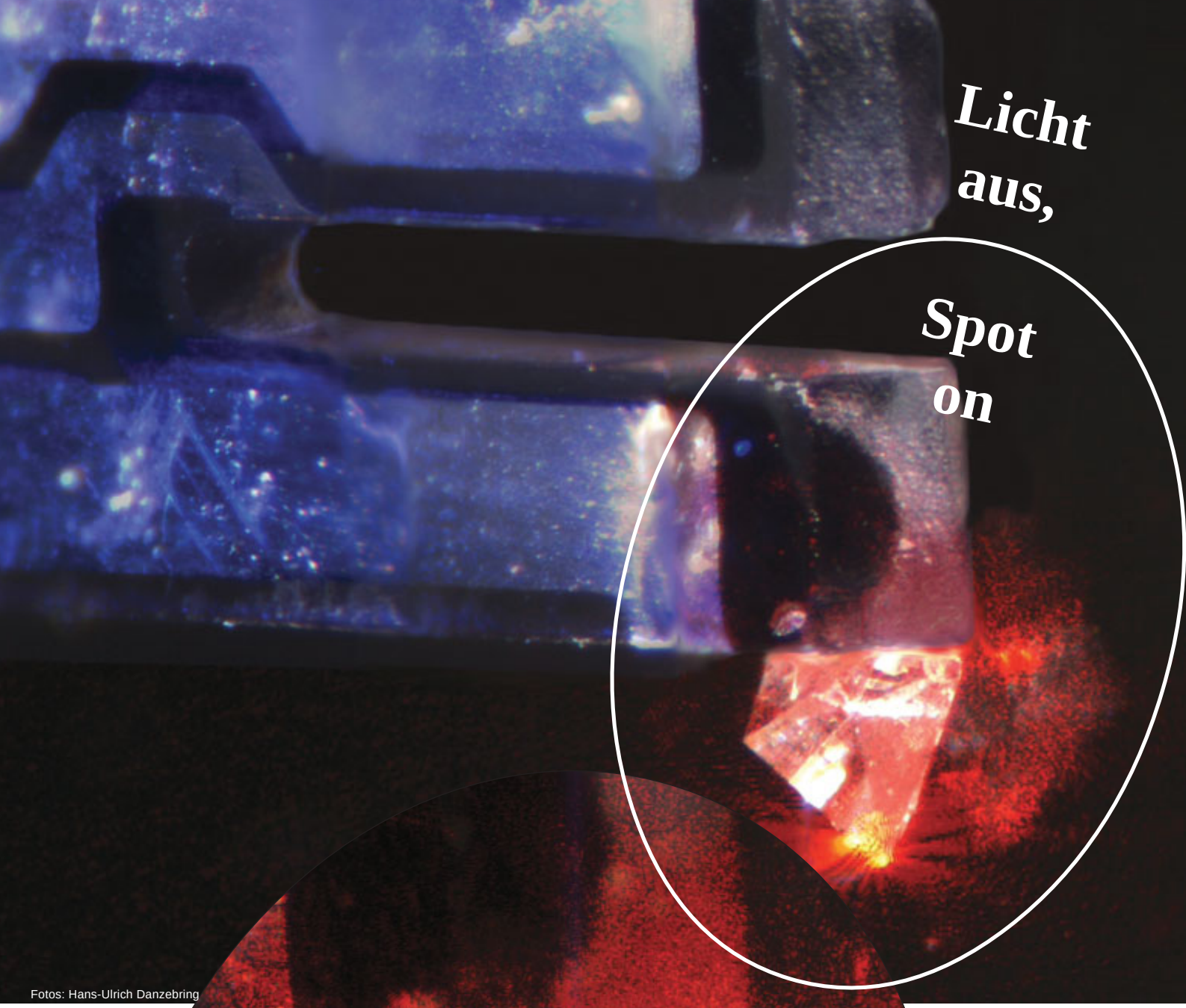
Das 20. Jahrhundert beginnt mit einer Hypothese, welche die gesamte Physik revolutioniert. Max Planck macht **1900** – durchaus widerwillig – den ersten Schritt zur Quantentheorie, indem er annimmt, dass ein strahlender Körper seine Energie nicht kontinuierlich, sondern vielmehr nur in Portionen ganz bestimmter Größe abgeben kann. Die Energie dieser „Quanten“ soll dabei proportional zur Frequenz der emittierten Strahlung sein. Die vermittelnde Konstante nennt Planck *h* – sie wird später als universelle Naturkonstante interpretiert und als Planckscher Wirkungsquantum berühmt. Zu diesen Hypothesen fühlt sich Planck gezwungen, um die Temperaturstrahlung des Schwarzen Körpers richtig zu beschreiben. Zudem hatten Präzisisionsmessungen von Lummer und Pringsheim in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt ganz eindeutig die Grenzen der vorhandenen klassischen Modellvorstellungen gezeigt. Das Plancksche Strahlungsgesetz passt genau zu den vorliegenden Messungen und es enthält die „klassischen Strahlungsgesetze“ von Rayleigh und Jeans, von Wien, von Stefan und Boltzmann als Näherungslösung. (**1918** erhält Max Planck für seine Quantentheorie den Physik-Nobelpreis.)

Licht verhält sich wie ein Strom von Teilchen. Mit dieser Annahme erklärt Albert Einstein **1905** den elektrischen Fotoeffekt (einige Jahre zuvor von Philipp Lennard beobachtet): Licht kann, oberhalb einer gewissen Frequenz, Elektronen aus einem Metall herauslösen, wobei die kinetische ...

→ S. 39



Licht aus, Spot on



Fotos: Hans-Ulrich Danzebring

„Sehr verehrtes Publikum, hier kommt ein weiterer Höhepunkt des Programms. Er stammt aus einer sehr berühmten Familie. Und er kann etwas, was seine Brüder nicht können. Erleben Sie den Star, der seinen Spot selbst mitbringt. Hier kommt SNOM.“

Ungewöhnlicher Name? Nein, nicht in dieser Familie. Seine Brüder heißen STM und AFM und sind weltweite Top-Stars. Fangen wir mit dem Ältesten an, mit STM. Das Kürzel steht für „Scanning Tunneling Microscope“ oder Rastertunnelmikroskop. Eine geniale Entwicklung von Gerd Binnig und Heinrich Rohrer, für die die beiden 1986 den Physik-Nobelpreis bekamen: ein Mikroskop, das die Oberflächen abrastert, also Punkt für Punkt abfährt. Nur wenige Nanometer (millionstel Millimeter) über einem elektrisch leitenden Material bewegt sich eine ultradünne Spitze hin und her. Sie fängt Elektronen ein, die den Zwischenraum „durchtunneln“, wenn an die Probe eine elektrische Spannung angelegt wurde. Das gemessene Signal ändert seine Stärke mit der Entfernung zwischen Nadel und Oberfläche. Auf dem Computerbildschirm entsteht danach ein Bild der Oberfläche – sogar von einzelnen Atomen.

Der Bruder, AFM („Atomic Force Microscope“ oder Rasterkraftmikroskop) braucht nicht einmal eine elektrisch leitende Probenoberfläche. Auch er rastert die Oberfläche mit einer extrem feinen Spitze ab, die aber an einer sehr weichen Blattfeder hängt. Auf die Rückseite der Feder ist ein Laserstahl gerichtet, der jede Bewegung der Feder mitbekommt. Winkeländerungen dieses Laserstrahls zeigen an, ob sich die Spitze nach oben oder unten bewegt. Mit dem Rasterkraftmikroskop kann man sogar lebende Zellen oder Proteine abbilden.

SNOM, der jüngste Spross in der Familie der Rastersondenmikroskope, kann das ebenfalls. Denn auch er braucht keine elektrisch leitende Oberfläche. „Doch anders als das Rasterkraftmikroskop liefert das SNOM auch optische Informationen über das Objekt“, erklärt Hans-Ulrich Danzebrink, der Leiter des PTB-Projekts „Quantitative Rastersondenmikroskopie“. Damit ist er für die Untersuchung biologischer Systeme noch besser geeignet. Aber auch für Fragestellungen in der Halbleitertechnologie ist SNOM ideal. SNOM heißt „Scanning Near-Field Optical Microscope“ oder Optisches Nahfeldmikroskop. Auch hier finden wir wieder die rasternde Sonde. Sie besteht aus Glasfasern oder neuerdings (zum Beispiel bei dem PTB-Projekt) aus Silizium oder Diamant und führt ihre eigene Arbeitsplatzbeleuchtung mit sich: einen extrem kleinen Lichtfleck, der an der Sondenspitze austritt. Die Sonde nähert sich der Probe so weit, bis sich das Licht nicht mehr in seiner gewohnten Wellenform ausbreiten kann. „Das ist der Trick dabei“, sagt Danzebrink. „Wo Wellenlängen und damit Beugungseffekte keine Rolle mehr spielen, haben wir das Abbe-Limit ausgetrickst.“

Das Abbe-Limit, benannt nach Ernst Abbe, einem der Pioniere des Mikroskopbaus im 19. Jahrhundert, ist der Schrecken aller Wissenschaftler, die mit dem Lichtmikroskop arbeiten. Denn wie gut die Vergrößerungslinsen auch immer sind – sobald man ein Objekt untersuchen will, das kleiner als die halbe Wellenlänge des Lichts ist, bekommt man eine unscharfe Abbildung. Mit SNOM kann man dagegen viel kleinere Objekte scharf abbilden. „Ein Zehntel der Wellenlänge und besser ist erreichbar“, sagt Danzebrink. Grund genug, am Ball zu bleiben und den Star weiter zu hegen und zu pflegen – für eine Zukunft im Rampenlicht.

Erika Schow

Fotos auf der linken Seite:
Rotes Laserlicht wird von der feinen Spitze einer Nahfeldsonde abgestrahlt. Das „Herz“ des optischen Nahfeldmikroskops ist in diesem Fall eine Diamantspitze, die an einem Hebelarm aus Quarz befestigt ist (blau). Der Quarz ist vergleichbar mit einem Schwingquarz in einer Uhr und dient hier dazu, den Abstand zwischen Sonde und Oberfläche genau zu messen.

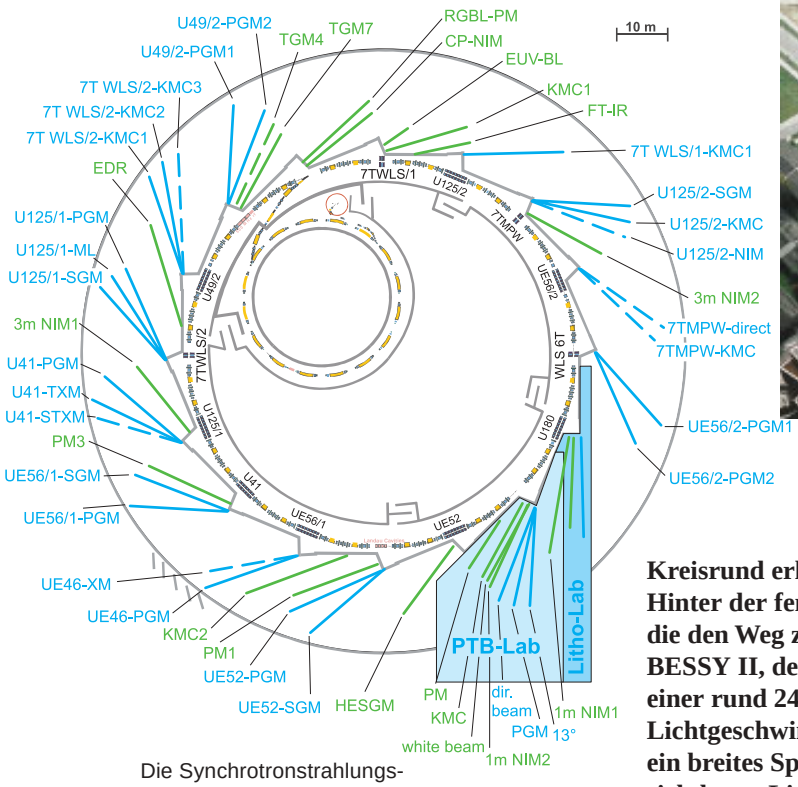
Energie der ausgelösten Elektronen unabhängig von der Lichtintensität ist. Das klassische Lichtmodell versagt hier bei der Deutung. Erst das Lichtquantenmodell Einsteins (der Begriff „Photon“ wird erst 20 Jahre später eingeführt) kann diesen experimentellen Befund aufklären. **1921** erhält Albert Einstein für dieses Erklärungsmodell den Physik-Nobelpreis.

Im selben Jahr (**1905**) veröffentlicht Einstein in den „Annalen der Physik“ seinen ersten Aufsatz zur speziellen Relativitätstheorie. In dieser Theorie setzt Einstein die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit als eine für alle Beobachter absolute Konstante an, unabhängig von den Geschwindigkeiten der Lichtquelle oder des Beobachters. Gleichzeitig postuliert Einstein, dass alle Systeme, die sich relativ zueinander mit konstanter Geschwindigkeit bewegen, vollkommen gleichberechtigt sind. Damit löst sich das Ätherproblem (denn der Äther wäre ein hervorgehobenes Bezugssystem) in nichts auf. Der Äther entpuppt sich als eine Fiktion der Physik.

Der französische Physiker Gabriel Jonas Lippmann erhält **1908** den Nobelpreis für Physik für die Erfindung des ersten Verfahrens der Farbfotografie.

Licht entsteht, wenn Elektronen springen! Niels Bohr entwirft **1913** seine Atomtheorie, nach der die Elektronen auf festen Umlaufbahnen um den Atomkern kreisen. Ganz bestimmte Energieportionen sind dabei notwendig, damit ...

→ S. 41



Die Synchrotronstrahlungsquelle BESSY II in Berlin-Adlershof mit ihren Strahlrohren

Licht-Muster

Kreisrund erhebt sich im Südosten Berlins ein seltsames Ringgebäude. Hinter der fensterlosen Fassade verbirgt sich eine besondere Lichtquelle, die den Weg zu immer kleineren und schnelleren Computerchips ebnet: BESSY II, der Berliner Speicherring für Synchrotronstrahlung. Auf einer rund 240 Meter langen Kreisbahn sausen Elektronen fast mit Lichtgeschwindigkeit durch eine enge Vakuumröhre. Dabei senden sie ein breites Spektrum an Strahlung aus, von der Infrarotstrahlung über sichtbares Licht bis zur UV- und schließlich zur harten Röntgen-Strahlung. Einen kleinen Teil dieser Strahlung nutzen PTB-Wissenschaftler und Ingenieure, damit Hersteller wie Intel, Motorola, Infineon, IBM oder AMD auch bis in das nächste Jahrzehnt die Leistung der Computerchips rund alle 18 Monate verdoppeln können.

Was haben Computerchips mit Licht zu tun? Sehr viel. Denn die Strukturen auf den Chips sind so winzig, dass man sie nicht mechanisch herstellen kann. Nur Licht, das allerdings für das menschliche Auge unsichtbar ist, ist als Werkzeug fein genug. Um die bis zu rund 100 milliardstel Meter kleinen Transistoren in die Materialschichten ätzen zu können, belichten die Chipproduzenten einen Rohling (Wafer) aus Silizium wie ein Stück Fotopapier. Als Negativ für diesen Lithographie-Prozess dient eine lichtdurchlässige Maske. Und weil die einzelnen Transistoren ständig kleiner werden, muss auch die Wellenlänge des verwendeten Lichts immer noch weiter abnehmen: von heute 243 Nanometern auf 197 oder sogar 153 Nanometer in den nächsten Jahren. Denn grundsätzlich kann eine Struktur, die über die optische Abbildung der Maske entsteht, kaum feiner sein als die Wellenlänge des einstrahlenden Lichts. Mit zahlreichen Finessen reizen die Hersteller die Photolithographie bis zum Äußersten aus: zum Beispiel mit Lichtstempeln aus durchsichtigem Kunststoff, die die Wellenlänge reduzieren, oder mit gedehnten Rohlingen, die sich nach der Belichtung wieder zusammenziehen. Erste Prototypen mit 90 Nanometer feinen Strukturen existieren schon. Doch in vier bis fünf Jahren und bei spätestens 70 Nanometern wird das Ende der Fahnenstange erreicht sein. Eine neue Technologie muss her.

Zuverlässige Strahlungsquelle

„EUV“ heißt die Hoffnung der Chiphersteller. Das Kürzel steht für extrem ultraviolettes Licht mit Wellenlängen zwischen 11 und 13 Nanometern. Es soll die Transistordichte pro Chip mit einem Schlag vervielfachen. „EUV ist die einzige offenkundige Option für die Herstellung von hochdichten Halbleiter-Elementen“, stellt Peter J. Silverman vom Chip-Konzern Intel fest. „Und hier am BESSY haben wir eine zuverlässige Strahlungsquelle, mit der wir optimal bei 13 Nanometern messen können“, sagt Gerhard Ulm, EUV-Experte der PTB in Berlin. Beste Voraussetzungen, um die zahlreichen Hürden der EUV-Technologie in Zusammenarbeit mit der Industrie zu überwinden.

Denn bei 13 Nanometern lässt sich das Licht nicht mehr mit durchsichtigen Linsen auf die Chipmaske und den Siliziumrohling lenken. Die extreme UV-Strahlung wird von allen bekannten Linsenmaterialien einfach verschluckt. Statt dessen braucht man nun Spiegel, die bis auf den Bruchteil eines Nanometers exakt geschliffen und mit Silizium und Molybdän beschichtet sind. Ein ganzes System aus solchen asphärischen Reflexionsflächen kann das EUV-Licht wie gewünscht fokussieren. Ulm und seine Kollegen prüfen zusammen mit der Firma Zeiss im EUV-Lichtstrahl am BESSY die Reflexionseigenschaften solcher Spiegel. Ihr Ziel ist es, die viellagigen Beschichtungen weiter zu verbessern, damit das Licht mit höherer Intensität für einen schnellen Belichtungsprozess fokussiert werden kann. „Die Anforderungen der Industrie sind ausgesprochen hoch“, berichtet Ulm von einem EUV-Symposium vor wenigen Wochen in Dallas, auf dem neben vielen Wissenschaftlern auch die führenden Chiphersteller vertreten waren. Die Manager fordern kurze, zuverlässige und vor allem kostengünstige Prozesse. „Mindestens 100 Wafer mit 300 Millimetern Durchmesser pro Stunde“, auf diese knappe Formel bringt es der Intel-Experte Silverman. Vorher sei der milliardenteure Aufbau einer EUV-Chipfabrik nicht wirtschaftlich. (*Fortsetzung S. 42*)

Grafik und Foto: Bessy GmbH

CD, DVD, Hologramm

Auf einer CD (700 Megabyte Kapazität) sind die Datenspuren nur 1,6 µm (tausendstel Millimeter) voneinander entfernt. Um Musikstücke, Texte oder Tabellen auszulesen, tastet ein Laser mit rotem Licht von etwa 780 Nanometern die Hügel (so genannte Lands) und ihre Zwischenräume (Pits) ab. Bei einer einseitigen DVD (Datenvolumen bis zu 4,7 Gigabyte) sind die Datenpunkte deutlich kleiner als bei der CD und liegen etwa doppelt so eng zusammen. Die Informationen werden durch kurzwelligeres Laserlicht (bei 650 Nanometern und 635 Nanometern) ausgelesen.

Während bei nur lesbaren Scheiben ein lichtempfindlicher Farbstoff für die Speicherschicht genutzt wird, müssen sich die Datenträger bei wiederbeschreibbaren Medien beliebig verändern lassen. Dazu dient ein Material, das zwischen geordnetem, kristallinem und ungeordnetem, amorphem Zustand wechseln kann. Ein schwacher Lichtstrahl wandelt das ursprünglich amorphe Material zu kristallinen Datenpunkten um. Zum Löschen schmilzt ein stärkeres Licht den Kristall wieder auf. Nach dem Abkühlen nimmt das Material wieder die amorphe, ungeordnete Struktur ein – und die Scheibe ist wieder leer.

Mit Hilfe von blauen Lasern soll die Kapazität demnächst auf bis zu 50 Gigabyte erhöht werden. „BluRay“ nennt sich der Scheibenstandard, auf denen sich viele Hersteller von Matsushita über Philips bis Sony geeinigt haben. Schon in wenigen Jahren, spätestens wenn die potenziellen Käufer die meisten CD-Leser gegen DVD-Laufwerke ausgetauscht haben, werden die „BluRay“-Geräte auf den Markt kommen.

Der nächste Kapazitätssprung könnte dann in die dritte Dimension reichen. Hologramme aus lichtempfindlichen Kunststoffen speichern die Datenpunkte nicht nur nebeneinander auf einer platten Scheibe, sondern auch in einigen Schichten übereinander. Ohne dass eine solche Holo-Disk viel dicker wäre als eine CD, könnten bis zu 1000 Gigabyte gespeichert werden. Zum Schreiben, Lesen und Löschen bräuchte man zwei Laserstrahlen, deren Wellenberge und -täler aufeinander abgestimmt sind. Durch einen solchen Phasenunterschied entsteht ein Interferenzmuster, das als Datenspeicher die Pits und Lands einer DVD ersetzt. Die Lesegeschwindigkeit könnte auf das 30-fache einer „BluRay“-Scheibe hochschnellen. Spätestens dann könnte es eng werden für magnetische Speicher, wie sie heute in der normalen Festplatte zu finden sind. Licht hat damit das Potenzial, sich bei Massenspeichern endgültig gegen Magnetfelder durchzusetzen.

jol

Foto: Artografica/ETW

ein Elektron seine Bahn wechseln kann. Fällt ein Elektron etwa von einer „hohen“ Bahn auf eine „tiefere“, dann sendet es die Energiedifferenz dieser beiden Bahnen in Form eines Lichtquants aus. Kurze Zeit später bestätigen Experimente von James Franck und Gustav Hertz das Bohrsche Modell. Niels Bohr wird für seine Arbeit **1922** mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.

1913 verbessert Irving Langmuir entscheidend die Technik der Glühlampe: Diese wird mit einem Edelgas gefüllt, so dass der Wolframglühfaden (der einige Jahre zuvor entwickelt wurde) langsamer verdampft.

Wenn das Licht in Teilchenform daherkommt, wie verhält es sich dann statistisch? Der indische Physiker Satyendranath Bose beantwortet diese Frage **1924** mit einer speziellen Statistik, der eine spezielle Abzählregel ununterscheidbarer Teilchen (Bosonen) zu Grunde liegt.

Die Quantenmechanik bekommt in den 20er Jahren ihren vollständigen theoretischen Unterbau. Auch das Planncksche Strahlungsgesetz, das Max Planck selbst noch „erraten“ hatte, erhält sein theoretisches Fundament. Paul Adrien Maurice Dirac leitet es **1926** aus prinzipiellen Symmetrie- und Statistik-Überlegungen ab.

→ S. 43

Von diesem Ziel sind die Forscher in aller Welt noch weit entfernt. Es fehlt vor allem an leistungsstarken Strahlungsquellen für das EUV-Licht. „Das ist noch ein ganz großes Problem“, sagt Ulm. Da ist es ganz wichtig, die Möglichkeiten der Spiegel voll auszureizen. „Jedes Promille bei der Reflektivität schlägt sich auf die Anzahl der belichteten Wafer pro Stunde nieder“, weiß Ulm. Denn im gesamten Fokussier- und Belichtungssystem summiert sich der Lichtweg auf mindestens zehn Reflexionen.

Foto: Carl Zeiss AG

Kein Atom Schmutz erlaubt

Auch die Belichtungsmaske, die die Chipstruktur vorgibt, kann nicht mehr wie ein Fotonegativ durchleuchtet werden. Hier unterstützen die PTB-Forscher die Firmen SchottLithotec und Infineon, die am BESSY ihre Prototypen mit der 13-Nanometer-Strahlung überprüfen lassen. Diese perfekten Masken müssen möglichst ohne jeden Fehler ihr Muster auf den Silizium-Rohling reflektieren. Damit nicht genug: Trotz Hochreinräumen und Vakuum-Anlagen können Spiegel und Masken nach und nach verdrecken. Obwohl dieser „Schmutz“ nur aus wenigen Atomlagen – beispielsweise von Kohlenstoff- oder Oxidschichten – besteht, schränkt er die optischen Eigenschaften der Spiegel empfindlich ein. Daher müssen die Forscher elegante Reinigungsmethoden entwickeln, um die perfekten Oberflächen äußerst sanft zu säubern.

Am BESSY-Ring selbst werden nie massenhaft Computerchips mit EUV-Lithographie hergestellt werden. Doch die Synchrotron-Strahlung liefert unverzichtbare Daten und die weltweit beste Kalibrierung für die Messung der Lichtmengen, die beim EUV-Prozess eine zentrale Rolle einnehmen. „Wenn die PTB ein wertvoller Partner sein will, muss sie für die Industrie stets messbereit sein“, sagt Ulm. „Wir müssen dazu vorausschauend planen und rechtzeitig einen Trend erkennen.“

Jan Oliver Löfken

Bild oben: Bei Wellenlängen von 13 nm ist jede Linse undurchsichtig. Jetzt müssen Spiegel her. In diesem Gerät, das zukünftig zur Belichtung von Wafern dienen soll, steckt ein noch unbeschichteter Spiegel.

Bild unten: Silizium-Wafer

Foto: Stephan Grohe, Corbis

Foto: Marc Steinmetz, Visum

Eine Paarbeziehung anderer Art

Ein Gedankenexperiment von Einstein und seine Folgen in Wien und anderswo

Wien, 9. Bezirk, Boltzmanngasse 5, das Universitätsinstitut für Experimentalphysik. Ein altehrwürdiges, Geschichte atmendes Gemäuer, im Treppenhaus die Inschrift: „Gebaut unter der Regierung seiner kaiserlichen und königlichen apostolischen Majestät des Kaisers Franz-Josef der Erste in den Jahren 1910–1912“. Vor dem geistigen Auge zaubern gestrenge Professoren mit Doktorhüten wundersame Phänomene aus monströsen Versuchsapparaturen hervor. Doch der Schritt durch die Glastür im zweiten Stock bläst alle nostalgischen Anwandlungen hinfort. Frisch renovierte Büros, Labors mit Computern, metallischen Versuchsapparaturen und verwirrenden Arrangements aus Lasern, Linsen und Spiegeln. Sekretariat Arbeitsgruppe Professor Anton Zeilinger, steht an der Bürotür. Zeilinger, Jahrgang 45, ist der wohl prominenteste zeitgenössische Erforscher der Quantenwelt. Was Werner Heisenberg und Albert Einstein einst erdachten, setzt er in Experimente um. 1997 hat er – frei nach Enterprise-Manier – Lichtquanten gebeamt: Er teleportierte die Eigenschaften eines Lichtteilchens quer über den Labortisch – und zwar instantan, ohne jede Zeitverzögerung.

„Hello. How are we?“ Zeilinger klopft an die Tür des Laserlabors, um kurz nach dem Rechten zu schauen. In dem abgedunkelten Raum justieren drei seiner Mitarbeiter mit winzigen Schraubendrehern an einem Laser herum. Ohne Umschweife beginnt eine lebhafte Diskussion: Warum nur geht ein Kernstück des Teleportations-Experiments, ein kleiner optischer Kristall, immer wieder kaputt? Die Debatte läuft auf Englisch, Zeilingers Team ist international – eine Italienerin, ein Australier, ein Chinese. „Die Idee zur Quantenteleportation kam 1993 von einer internationalen Gruppe von Theoretikern. Damals hielt ich es für unmöglich, das jemals zu verwirklichen“, erinnert sich Zeilinger. „Doch zufällig hatten wir schon an den dafür notwendigen Bausteinen gearbeitet, und nach zwei Jahren sahen wir, dass das eigentlich eine ganz klare Entwicklungsrichtung ist. Dann dauerte es weitere zwei Jahre, bis das Experiment klappte.“

„Wir müssen mit der spukhaften Fernwirkung leben“

Grundlage der Quantenteleportation sind zwei Lichtteilchen, die erzeugt werden, wenn ein Laserstrahl in den Spezialkristall eindringt. Auf Grund ihrer Simultangeburt sind die beiden Photonen „verschränkt“, sind auf rätselhafte Weise miteinander verknüpft. „Als wenn ich zwei Würfel hätte, die, wenn ich sie beide gleichzeitig werfe, immer die gleiche Zahl ergeben“, beschreibt Zeilinger, „ganz egal, wie weit sie voneinander getrennt sind. Sie bilden eine Einheit, sind also keine getrennten Würfel, sondern ein Würfelpaar.“ Die Verschränkung der beiden Lichtquanten hat merkwürdige Folgen. Wird eines der beiden Photonen von einem Detektor eingefangen und auf seine Eigenschaften hin untersucht, so stehen gleichzeitig auch die Eigenschaften des anderen Lichtteilchens fest. Ein Beispiel: Misst der Detektor die Polarisation, die Schwingungsrichtung eines Lichtteilchens, so ist im selben Augenblick klar, welche Polarisation das andere Photon besitzt. Für Quantenverhältnisse eigentlich ein Unding: An sich befindet sich jedes Quantenteilchen

Der Inder Chandrasekhara Venkata Raman entdeckt **1928** die nach ihm benannte Lichtstreuung an Molekülen. Das gestreute Licht verrät, um welche Moleküle es sich dabei handelt. Raman erhält dafür 1930 den Physik-Nobelpreis.

Das blaue Leuchten, das – in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts – etwa aus den Wasserbecken von Kernreaktoren dringt, wird schon **1934** entdeckt und verstanden. Pawel Tscherenkow beobachtet, dass ein geladenes Teilchen, das sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit in einem Medium bewegt, Licht aussendet. (Genauer: Die Teilchengeschwindigkeit muss dafür größer sein als die Phasengeschwindigkeit von Licht in diesem Medium.)

Eine weitere Möglichkeit, Licht zu machen, ist, Elektronen auf einen schnellen Kreisverkehr zu schicken. Physiker der General Electric Company wundern sich über eben dieses Licht, das aus ihrem Elektronenbeschleuniger dringt (**1947**): Je schneller die Elektronen im Kreis flitzen, um so energiereicher ist das Licht und ändert seine Farbe von rötlich bis zu bläulich-weiß. Dass diese Synchrotronstrahlung keine Radiowelle, sondern eine hochfrequente Strahlung ist, ist ein Effekt der Relativitätstheorie, da die Elektronen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit durch das Synchrotron laufen. (Dieser 1947 noch unerwünschte Nebeneffekt wird heute gezielt ausgenutzt und Synchrotronstrahlungsquellen werden zu eben dem Zweck ...

→ S. 45

in einer Art Schwebe zwischen allen möglichen Zuständen, und erst durch das Nachsehen, den Messprozess, wird es auf einen bestimmten Zustand festgenagelt. Aber ihre gemeinsame Geburt macht die beiden Photonen zu verschränkten „Zwillingen“, von denen der eine stets weiß, was der andere tut – egal wie weit beide voneinander entfernt sind.

Bereits 1935 hatte Albert Einstein dieses merkwürdige Phänomen gemeinsam mit den Physikern Boris Podolsky und Nathan Rosen vorausgesagt. Ihre Prophezeiung ging als „EPR-Paradoxon“ in die Geschichte ein – als obskures Gedankenexperiment, das eigentlich die Absurdität der Quantenphysik vor Augen führen sollte. „Einstein hat das als spukhafte Fernwirkung bezeichnet“, erzählt Zeilinger. „Er hat die Quantentheorie deshalb Zeit seines Lebens kritisiert und war sich sicher, dass in Wirklichkeit irgendwelche verborgene Größen für das Treiben verantwortlich sind. Doch Einstein hatte unrecht, die Quantenphysik ist korrekt. Wir müssen mit dieser spukhaften Fernwirkung leben.“

Dass das EPR-Paradoxon harte Realität ist, beweisen Zeilinger und seine Leute mit ihrem Teleportationsexperiment. Sara Gasparoni, Doktorandin aus Neapel, zeigt auf einen Riesentisch, vollgestellt mit diversen Lasern und unzähligen Linsen, Spiegeln und optischen Filtern: „Aus diesem Laser kommt ein ultravioletter Lichtstrahl. Er wird auf den Kristall gelenkt, der das UV-Licht in ein verschränktes Photonenpaar aufspaltet. Die beiden Zwillings-Photonen fliegen in verschiedene Richtungen davon.“ An einem Spezialspiegel überlagern die Wiener einen der Zwillinge dann mit einem weiteren, einem dritten Photon – dem zu teleportierenden Passagier. „Dadurch verschränken wir den Passagier mit dem anderen Zwilling, obwohl dieser einen Meter weit entfernt ist“, erläutert Gasparoni. „Genau das ist die Teleportation. Auf Grund der Verschränkung nimmt der zweite, entfernte Zwilling die Eigenschaften des Passagiers ohne jede Zeitverzögerung an.“ Gebeamt werden also nicht die Lichtteilchen an sich, sondern ihre physikalischen Eigenschaften.

Zeilingers Versuchsanordnung zur Teleportation einzelner Photonen: Energiereiches Laserlicht (hier rot gefärbt) wird in drei Strahlen aufgeteilt. Links außerhalb werden die teleportierten Photonen registriert.

Das Bild auf Seite 43 zeigt Prof. Anton Zeilinger mit der von ihm und seiner Arbeitsgruppe entwickelten Versuchsanordnung zur Teleportation einzelner Photonen.

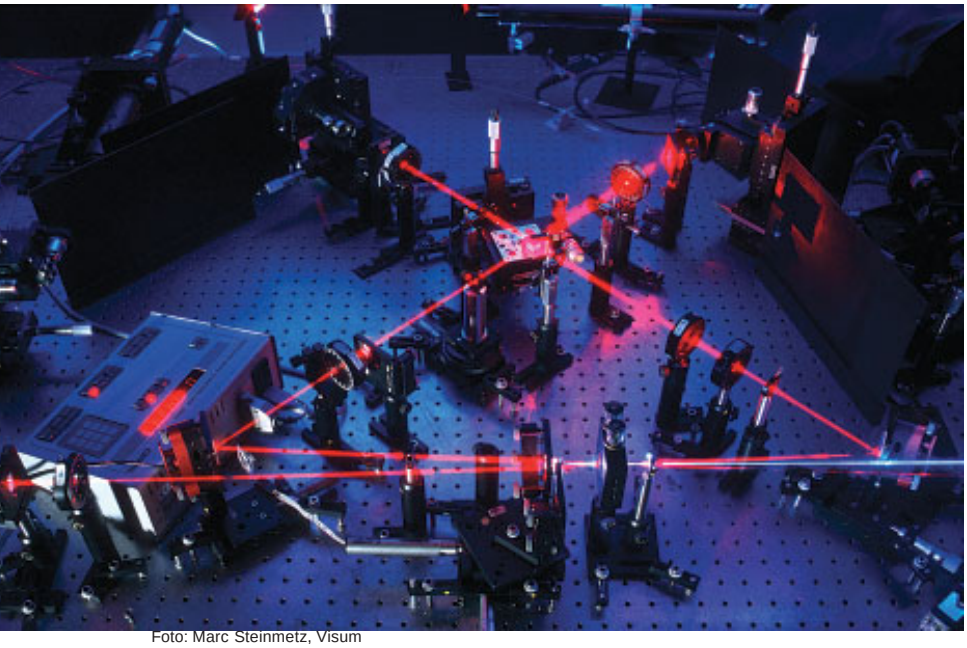


Foto: Marc Steinmetz, Visum

„Schlüssel-Technologie“ der Zukunft?

Zeilingers Teleportationskünste haben nicht nur die Quantentheorie eindrucksvoll bestätigt, sondern versprechen inzwischen auch lukrative Anwendungen, insbesondere für die abhörsichere Telekommunikation der Zukunft. „Quantenkryptografie“ nennt sich das Prinzip: Dabei wird die Botschaft vom Absender zum Empfänger teleportiert, ohne dass ein Unbefugter die Möglichkeit hat, die Nachricht abzufangen. Zwar muss, um die Botschaft entschlüsseln zu können, der Absender dem Empfänger zusätzlich noch den richtigen Code über einen konventionellen Kommunikationskanal übermitteln, beispielsweise per Telefon oder E-Mail. Diesen Code könnte der Datendieb zwar abfangen, aber herzlich wenig damit anfangen, denn die eigentliche Nachricht wird ja teleportiert. Datensicherheit ist also durch die Naturgesetze gewährleistet; auch mit noch so großer Mühe vermag niemand die Geheimbotschaft zu entschlüsseln.

Im Labor ist Zeilinger die Quantenverschlüsselung bereits gelungen. Nun arbeitet er an der praktischen Umsetzung: Gemeinsam mit dem Forschungszentrum Seibersdorf und der Siemens AG basteln die Wiener Physiker an einem industriellen Prototypen und versuchen, die Einzelteile zu miniaturisieren und die Qualität der Verschränkung zu verbessern. Außerdem versuchen sie, die Signale deutlich weiter zu beamen als einmal über den Labortisch. Letzteres will Zeilinger in einer überraschend anmutenden Allianz bewerkstelligen: Die Wien Kanal Abwassertechnologien GmbH, so der Name des Kooperationspartners, weiß bestens, wie man Glasfaserkabel in Abwasserkanäle verlegt. Eine der Hightech-Strippen hat die WKA bereits in einen Tunnel unterhalb den Donau untergebracht; durch sie versuchen die Physiker eine Botschaft von einem Flussufer zum anderen zu beamen. Klappt das Experiment, könnte damit – so die Hoffnung – der Grundstein gelegt sein für ein internationales Quantenkommunikationsnetzwerk.

FRANK GROTELÜSCHEN

Die Welt ist verrückt

Das Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon

„Sein ist Wahrgenommensein.“
George Berkeley (1685 bis 1753), Philosoph

Ist die Welt verrückt, muss sie wieder ins Lot gebracht werden. Nichts weniger wollte Albert Einstein Mitte der 30er Jahre, als er gemeinsam mit seinen jungen Kollegen Boris Podolsky und Nathan Rosen am Institute for Advanced Study in Princeton, New Jersey, eines seiner berühmt-berüchtigten Gedankenexperimente auf seinen Lieblings-Gegner, die Quantenmechanik, losließ. Die Wirklichkeit, so Einstein, könne nicht so unbestimmt sein, wie die Quantenmechanik sie interpretiere. Und tatsächlich geht die quantenmechanische Unbestimmtheit so weit, dass sie unseren „gesunden Menschenverstand“ auslacht. Denn bildlich übertragen passiert folgende Geschichte, die allerdings voraussetzt, dass keine der handelnden Personen Fehler macht oder schummelt: Von einem Ort, sagen wir: Frankfurt/M., schickt Herr K. zwei Päckchen auf die Reise, eines nach Flensburg im Norden, eines nach Passau im Süden. Der Inhalt dieses Päckchenpaares ist ein kilogrammschweres Buch. Öffnet der Adressat in Passau das Päckchen und findet das Buch darin, so ist scheinbar klar, was der Flensburger vorfindet – nichts. Ist es andersherum und der Passauer findet sein Päckchen leer, so ist das Buch in Flensburg gelandet. So weit ist alles in logischer Ordnung. Doch das Merkwürdige: Herr K. musste für jedes der Päckchen das Porto für einen Kilogramm-Transport bezahlen. In welches Päckchen hat er nun das Buch gesteckt? In das Passau-Päckchen? Warum dann das hohe Porto für das Flensburg-Päckchen? Oder war in jedem Päckchen ein Buch? Das erklärte zwar, denn die Post macht keine Fehler, das doppelte Porto. Herr K. hatte aber eigentlich nur ein Buch. Verrückte Welt!

Freilich spricht die Quantenmechanik nicht von Päckchen und Büchern und Portokosten. Aber in der Welt der Elementarteilchen, und aus diesen besteht ja auch die „große Welt“, in der wir leben, geschieht genau das: Die Möglichkeiten überlagern sich zu einem gemeinsamen Konglomerat und erst die Messung, das Nach-Schauen im Bilde des Päckchens, greift aus diesem Feld der Möglichkeiten eine heraus. Die Wirklichkeit ist unbestimmt bis zu dem Zeitpunkt, in dem sie gemessen wird.

Allein die Tatsache, dass erst der Akt des Messens eine Wirklichkeit erzeugt, scheint verrückt. Jedoch lässt sich dies noch steigern, wenn sich die Messung, wie in dem Päckchenbeispiel, auf ein Teil eines Systems, die eine Hälfte eines Pärchens, bezieht. Wenn in jedem der Päckchen der Inhalt objektiv unbestimmt ist, warum wirkt sich dann das Öffnen des einen Päckchens sofort auf den Inhalt des zweiten Päckchens aus? Dieser Zustand, den die Quantenmechanik „verschränkt“ nennt, bleibt ein solcher auch über beliebige Entfernungen hinweg, so dass sich keinerlei Informationsaustausch, keinerlei Wechselwirkung zwischen den Päckchen denken lässt. Wenn wir an unserer Alltagslogik festhalten, kann dies alles nur möglich sein, wenn es so etwas wie unsichtbare, verborgene Informationskanäle zwischen den Päckchen gibt.

Genau dies haben in der Folge des EPR-Paradoxons Theoretische Physiker auch versucht: Theorien mit „verborgenen Variablen“ aufzustellen, welche diese „spukhafte Fernwirkung“ erklären. In diesen „lokalen realistischen Theorien“ erzeugen die Messungen nicht die Ergebnisse, sie entdecken die Messwerte lediglich und das klassische, deterministische Weltbild ist gerettet. Doch leider sprechen alle Experimente eine andere Sprache: Sie bestätigen das Unbestimmtheitsprinzip. Auch wenn Einstein sich nicht mit einer derart unbestimmten Welt anfreunden wollte, leben wir doch in einer solchen.

jes

Wer nichts über Päckchen und doppeltes Porto, sondern etwas über Wellenfunktionen, lokale Theorien und verborgene Variablen lesen möchte, kann dies – mit etwas Mut – hier tun:

A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen: Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? Physical Review, Volume 47, S. 777–780 (1935)

Bernard d'Espagnat: Quantentheorie und Realität, Spektrum der Wissenschaft, Heft 1, S. 69–79 (1980)

John Horgan: Quanten-Philosophie, Spektrum der Wissenschaft, Heft 9, S. 82–91 (1992)

Philip Yan: Das zähe Leben von Schrödingers Katze, Spektrum der Wissenschaft, Heft 11, S. 56–62 (1997)

gebaut, Licht – einschließlich Röntgenlicht – zu machen.

Bilder brauchen nicht nur flach zu sein, sie können auch als echte dreidimensionale Objekte im Raum stehen. Die Grundidee dieser Holographie entwickelt **1948** der ungarisch-britische Physiker Dennis Gábor, eine Idee, die Gábor **1971** den Nobelpreis für Physik beschert. Wirklich praktikabel wird seine Erfindung allerdings erst nach der Erfindung des Lasers.

Dreißig Jahre alt sein und eine der exaktesten Theorien aller Zeiten aufstellen! Das gelingt Richard Feynman **1948** mit seiner Quantenelektrodynamik (QED). Die QED verbindet die ursprünglich für die Atomphysik formulierte Quantenmechanik mit dem Elektromagnetismus, also auch mit allen Erscheinungen der Optik. Das Teilchen- und das Wellenbild des Lichts (oder allgemeiner: von elektromagnetischer Strahlung überhaupt) sind innerhalb der QED „miteinander versöhnt“ und sind jeweils einzeln als Grenzfälle aus ihr ableitbar. **1965** erhalten Richard Feynman, Julian Schwinger und Sin-Itiro Tomonaga für ihre Beiträge zur QED den Nobelpreis für Physik.

Die drei Wissenschaftler Chapin, Fuller und Peterson von Bell Telephone entwickeln **1954** die Photozelle, die elektrischen Strom aus Sonnenlicht erzeugen kann.

→ S. 47

Es war einmal ... Es wird einmal

Wie sieht sie aus, die Welt der Lampen und Lichter in ein paar Jahrzehnten? Eine Zukunftsvision im Rückblick

Ach nö. Ich soll Dir wirklich von damals erzählen? Von Lampen? Leuchten?? Kannst du dir doch auch samt Videos im Wandlexikon vorspielen lassen. Nicht? Aha, auf die alte Art, wie damals, als runzlige, strickende Omas ihren Enkeln im Ohrensessel erzählten. Pass nur auf, dass du nicht auch zum Romantiker wirst ... Ein Referat mit Technik-Info, so so. Ein Erfahrungsbericht? Ohne Bild- und Ton-Schnipsel? Alsdann: Es war einmal ... Damals, um die Jahrtausendwende ...

Stell dir einfach mal vor, Wände und Decken im Haus wären nicht mehr interaktiv. Keine Leuchtflächen, keine Displays, keine Farbwechsel – einfach nur blanke Fläche. Vielleicht bunt tapeziert oder angemalt, mit ein paar Bildern dran. Erinnerst du dich noch, so vor drei Jahren, als der Strom ausfiel? Also, keinen tropischen Palmenstrand live an die Wand zaubern lassen, wenn dir kalt ist, oder Frühlingslandschaft mit Vogelmusik gegen Traurigkeit. Auch keine Telefonate mit Leuten, die du im 3-D-Holographen fast anfassen kannst. Noch nicht einmal das Beleuchtungssystem, das dir Tageslicht einstellt oder romantische Stimmung. Oder Punktlicht über dem Lesesessel, oder was du gerade haben willst. Stell dir vor: einfach blanke Fläche. Und neben der Tür ein Lichtschalter.

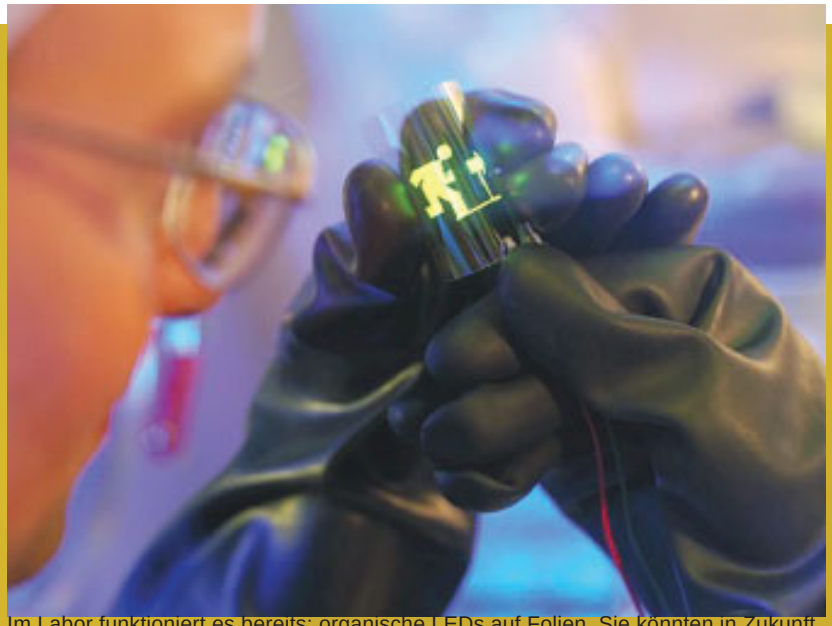
Anschalten und Ausschalten war damals Standard. Modern waren Dimmer. Ganz Moderne hatten sogar Funkschalter oder welche, die auf Klatschen reagierten. Und für jede Anwendung gab's eine Lampe: Glühwendellampen, Leuchtstoffröhren mit oder ohne Hochdruck, Xenonlampen, Halogenstrahler und so weiter. Glühlampen nutzte man für warmes Licht im kleinen Bereich, meist zu Hause. Weißt du, für den Schreibtisch oder überm Lesesessel – so ähnlich, wie wenn das Lichtsystem dir heute den Warmlichtstrahler direkt überm Sessel simuliert. Die Röhren nutzte man für alles, was großflächig hell ausgeleuchtet werden musste, etwa im Büro. Die gab's in verschiedenen Farbtemperaturen für unterschiedliche Lichtstimmungen, oder als simuliertes Sonnenlicht für Pflanzen oder Bräunungsstudios. Jede Lampe musste man damals per Hand austauschen, wollte man andere Lichtfarben haben. Für Licht an anderen Orten platzierte – oder montierte – man die Leuchten eben um. Nix mit Beleuchtungssystem, das solche Änderungen auf Sprachbefehl ganz alleine hinkriegt ...

Als das letzte Jahrtausend zur Neige ging, waren auch die Energiesparlampen aufgekommen, gefaltete Leuchtstoffröhren im Kleinformat. Die, die man wie Glühlampen in die Fassung schrauben konnte – hast du mal Bilder gesehen? Immerhin brauchten sie viel weniger Energie und hielten länger. Oder Halogenlampen – dafür zogen sich manche Leute die Kabel quer von einer Wand zur anderen. Also statt am Deckendisplay Himmel mit Schäfchenwolken in Echtzeit zu genießen, guckte man auf blanke Kabel, zwischen denen die Leuchten klemmten. Sollte modern sein. Sehr klein, sehr hell, sehr punktförmig, sehr langlebig, aber eben Glühlampen. Glühdrähte, was für eine Energieverschwendung war das damals! Die Leuchtdioden heute, LEDs und OLEDs, und was man sonst noch alles entwickelt hat, die sparen nicht nur viel mehr Energie – man kann auch viel mehr Vielfalt bieten. Guck' dir's genau an: In einem einzigen Display große oder kleine Flächen ansteuern, heller oder dunkler, warm oder kalt, je nach Stimmung, die man gerne hätte. Oder als Monitor jede Woche 'ne andere Tapete simulieren. Oder eben als Fernsehschirm, als Lexikon, als Ölgemälde. Aber wem sag' ich das, das kennt ja heute jeder ...

Wenn's um Lichttechnik geht, muss ich wohl noch weiter zurück. Du wolltest doch Geschichte hören, oder? So ungefähr die Steinzeitmenschen, die nutzten als Erste das Prinzip: Wer Licht will, braucht

Bald serienreif: Displays aus organischen LEDs. Im kalifornischen San Jose baut die Firma Osram gerade eine Pilotanlage auf. Und in Penang, Malaysia, entsteht für das deutsche Unternehmen eine Firma zur Serienproduktion.

Fotos: Siemens (Hintergrund: Osram)



Im Labor funktioniert es bereits: organische LEDs auf Folien. Sie könnten in Zukunft den aufrollbaren Monitor oder die elektronische Zeitung möglich machen.

Feuer. Klar, in der Steinzeit ein Riesenfortschritt, sozusagen die Sonne für drinnen. Und das blieb über Jahrtausende so, bei Fackeln, Kerzen, Petroleumlampen und Gaslaternen. Dann kam der angeblich so große Schritt zum modernen Licht, die Erfindung der Glühbirne, kurz vor dem 19. Jahrhundert. Dabei war das gerade mal ein halber Schritt! Klar, jetzt gab's keine offene Flamme mehr und eine einzige Energiequelle konnte unzählige verteilte Lichter speisen. Auch mit dem Qualm war's vorbei. Trotzdem blieb das Prinzip dasselbe: Etwas Glühendes gab Licht ab. Und mehr als 90 Prozent der reingesteckten Energie verpuffte als Wärme. Auch die Halogenlampen waren nur eine leichte Verbesserung, man konnte sich an ihnen immer noch gehörig die Finger verbrennen.

Na, und dann waren da noch die Gasentladungslampen, die nutzten ein anderes physikalisches Prinzip: Die elektrische Spannung zwischen zwei Punkten bringt das Gas dazwischen zum Leuchten. Wie beim Blitz die Luft zwischen Himmel und Erde. Erst gab's die Neonröhren und ihre Verwandten, in denen das Gas selber in seiner typischen Farbe leuchtete. Neon strahlt rot, wusstest du das? Und dann kam die Lumineszenz ins Spiel, das indirekte Leuchten: Man merkte, dass manche Gase hohe UV-Strahlung abgaben. Die wiederum konnte eine Beschichtung an der Röhrenwand zum Leuchten bringen. Je nach Leuchtstoff unterschiedliche Farben, das bot viel mehr Möglichkeiten. Doch auch die Röhrenlampen waren ziemliche Energieschleudern: Stell dir vor, noch um die Jahrtausendwende wurde ein Drittel der Energie weltweit nur für die Beleuchtung produziert! Manche Leute finden das ja heute noch toll, hast du mal was gesehen über Sammler und Romantiker? Die leisten sich manchmal ein Stündchen mit Glühbirne. Dabei könnte ihnen das System einfach ein paar Kerzen in die Zimmerecken projizieren. Oder vielleicht 'n Kaminfeuer, samt Holzraucharoma ...

Aber gut, so um 2000 herum war die Forschung dann schwer mit Leuchtdioden beschäftigt. LEDs waren nicht mehr nur bunte Blink- und Signallichter, sondern konnten auch ernstzunehmende Lichtquellen sein. Hier sind Elektronensprünge in Halbleitern für das Licht verantwortlich, deshalb leuchten sie immer nur in einer Farbe. Endlich hatte man auch blaue Leuchtdioden konstruiert und konnte mit Tricks richtig weißes Licht erzeugen. Blau und gelb zusammen wirkten fürs Auge weiß, und viele kleine Einzeldioden gebündelt ergaben die ersten starken Strahler. Die Bundesbahn stellte 2001 ihre Signalleuchten direkt von Gasbrennern auf LED-Strahler um! Und dann, langsam, konnte man mit organischen LEDs auch günstige Flächenstrahler herstellen. Wie Sandwichscheiben ließen sich die Leuchtschichten und durchsichtigen Elektroden auf Kunststoff aufdrucken oder aufdampfen – die ersten Lichttapeten und biegsamen Paneele wurden möglich. Man konnte sie sogar schon ansteuern, in Einzelbereichen. Aber testweise und teuer war das noch, vergleich' das mal

Ende **1957** kommt der Physikstudent Gordon Gould von der Columbia-Universität, USA, auf eine technische Idee, wie sich Licht verstärken ließe. Gould erfindet den Laser. Allerdings ist es drei Jahre später Theodore Harold Maiman, der den ersten funktionstüchtigen Laser – einen rot leuchtenden Rubinlaser – konstruiert. Schon 1962 werden Laser dann erstmals als „Werkzeuge" in der Augenchirurgie eingesetzt. Das dem Laser zugrunde liegende Prinzip der stimulierten Strahlungsemission hatte bereits **1916**/**1917** Albert Einstein gefunden. Die erste Anwendung für diesen Effekt wurde allerdings nicht der Laser (für: Light amplification by stimulated emission of radiation), sondern der **1953** von Charles Townes erfundene Maser (für: Microwave amplification ...). Townes erhält dafür **1964** den Nobelpreis für Physik.

Die Erfindung des Lasers ist eine technische Revolution, deren Folgen bis heute andauern. Laser trennen, schweißen, bohren und reinigen Werkstücke in der Industrie. Musik ist heute kaum noch in Schallplattenrillen codiert, die ein Diamant abtastet – Musik ist eine Abfolge von Vertiefungen auf einer CompactDisc, die ein Laser ausliest. In der Medizin sind Laser Skalpelle oder heften abgelöste Netzhäute wieder an. Laserlicht transportiert Information: durch die Glasfaserkabel rund um den Globus. In jedem Computer liest ein Laser die Daten von der CD-ROM und ein Laserdrucker schreibt sie auf Papier. Im Supermarkt scannt ein Laser die Strichcodes der Waren an der Kasse. Laser sind allgegenwärtig.

→ S. 49

Lampentyp	Farbspektrum	Lichtausbeute lm/W	Funktionsweise
Thermische Strahler			
Kerze, Gasbrenner, Petroleumlampe	breites Spektrum mit Schwerpunkt im Gelb-Orangen	0,1	Kohlenwasserstoffmoleküle verbrennen mit Luftsauerstoff zu Kohlendioxid und senden Licht aus.
Glühlampe	breites Spektrum, am stärksten im orangen Bereich, aber auch als infrarote Wärmestrahlung	10 bis 20	Ein Draht aus schmelzbarem Material (meist Wolfram, früher Kohlefaden) glüht im Glaskolben, umgeben von chemisch neutralem Gas (Stickstoff, Krypton, Argon), damit der Draht nicht oxidiert oder verdampft.
Halogenlampe	etwas näher am Sonnenspektrum, weniger gelblich	bis 35	Sehr helle Glühlampen. Halogen in der Gasatmosphäre das bei höheren Temperaturen verdampfende Wolframatome abfängt. Lange Lebensdauer, konstanter Lichtstrom, sehr kleine Abmessungen.
Gasentladungslampen			
Neonröhre	„bunte“ Basisfarben, je nach Füllung	farbabhängig	Mit Neon bzw. anderen Edelgasen gefüllte Leuchtstoffröhre. Elektronenfluss zwischen Elektroden regt die Gasatome an, die dann Licht definierter Wellenlänge abgeben.
Leuchtstoffröhre (Niederdruckentladungslampe)	eng begrenzte Spektralfarben, je nach Leuchtstoff (Typ Tageslicht, Universalweiß, Warmton, Flora u. ä.)	40 bis 100	Ein Zündgerät erhitzt Elektroden, die langwellige UV-Strahlung erzeugen. Diese regt Leuchtstoffe (Phosphore) an der Innenwand der Röhre an, ein kontinuierliches Lichtspektrum auszustrahlen.
Energiesparlampe	s. Leuchtstoffröhre	50 bis 70	Kompakte Leuchtstofflampe mit gebogenen Entladungsröhren samt Vorschalt- und Zündgerät im Sockel, in gewöhnliche Glühlampenfassungen zu schrauben.
Metalldampfhochdrucklampe	je nach Füllung dem Sonnenlicht ähnlich oder rötlich bis bläulich	70 bis 100	Enthält neben Edelgasfüllung verschiedene Metallzusätze, die bei Erwärmung verdampfen und bei Anregung Licht abgeben.
Xenonlampe	tageslichtähnlich breites Spektrum, auch im Infraroten und weit bis ins Ultraviolett reichend	25	Höchstdruckentladungslampe mit dem Edelgas Xenon als Leuchtstoff, dank der tageslichtähnlichen Farbtemperatur geeignet für Farbbeurteilung, Projektoren, Scheinwerfer und Mikroskopie.
Elektrolumineszenz			
LED (Leuchtdiode)	„einfarbig“, jeweils nur ein schmaler Wellenlängenbereich	farbabhängig	Halbleiterdiode, in der Elektronen in niedrigere Energiebänder wechseln und dabei Energie als sichtbares oder infrarotes Licht abstrahlen. Die Wellenlänge ist materialabhängig. Weißes Licht entsteht, indem ein Teil des blauen Lichts in gelbes gewandelt wird; die Mischung erscheint dem menschlichen Auge weiß.
	„weiß“	15	
OLED (organische Leuchtdiode)	rot, blau, grün	farbabhängig	Flächige Dioden aus organischen Riesenmolekülen (Polymeren), deren Elektronen durch elektrische Spannung angeregt und bei Rückkehr in den Grundzustand sichtbares helles Licht abgeben. In hauchdünnen Schichten auf flexiblen Trägern zu verarbeiten, für Hintergrundbeleuchtung und Lichttapeten, durch gezieltes Ansteuern einzelner Pixelbereiche auch für Digitalanzeigen und Großbildschirme.
Leuchtfolie	sehr schmalbandig, weißes Kaltlicht	farbabhängig	Gelartige Leuchtpaste zwischen durchsichtigen Flächenelektroden, in welcher Elektronen des Phosphor-Atoms hochfrequent schwingen und dabei Lichtenergie abgeben. Millimeterflach und flexibel, stufenlose Helligkeitsregelung, schneid- und durchlochbar.
Biolumineszenz			
Leuchtbakterien, -quallen, -käfer	nur sichtbare Wellenlängen, blau, blaugrün oder weiß	unbekannt	Bakterien (Gattungen Photobacterium, Vibrio) leben frei im Meer oder in den Leuchtorganen von Tiefseefischen. Leuchtvorgang: Oxidation regt eine Verbindung an, die in den Grundzustand zurück fällt und blaugrünes Licht abgibt. Biolumineszenz kommt auch bei Insekten wie „Glühwürmchen“ vor, bei Kopffüßern, Fischen oder einigen Muscheln, zur Tarnung, Paarung oder Nahrungssuche.

Nicht näher behandelte Lampentypen, obwohl ebenfalls im Gebrauch: Lichtbogen-, Quecksilberdampf-, Edelgas-Hochdruck-, Metalldampfniederdruck-, Natriumdampf-, Schwefel-, Induktionslampen, Plasma- und Leuchtkristalldisplay

ds

mit heute, wo man alle Wände damit auskleiden kann, wo sie Lichtsystem und Display in einem sind.

Aber eins ist wenigstens gleich geblieben: Irgendeiner muss ein Auge drauf haben, dass die Technik verlässlich ist. Und dass die Hersteller die richtigen Produktdaten angeben. Die Leute von der Physikalisch-Technischen Europa-Anstalt – damals waren sie nur für Deutschland zuständig. Ich weiß noch, wie ich vor so ein paar Jahrzehnten mal die PTB besuchte. Da hüteten sie ein paar große alte Glühlampen aus Japan wie einen Schatz. Jedes Jahr wurden sie immer nur für ein paar Minuten angeschaltet, bloß nicht zu lange, weil sonst ja die Glühwendel zu schnell kaputt ging. Die Messgeräte wurden damit abgeglichen, um Prototypen von neuen Lampen zu vermessen.

Aber die Zeiten, dass man nur mit diesen Dingern genaue Lichtdaten von Birnen, Röhren und Co. bekam – die waren damals schon vorbei. Sie hatten gerade einen Neubau geplant, darin ein Goniophotometer, und waren stolz wie Oskar. Denn das Ding konnte mit drei ausfahrbaren Roboterarmen erstmals kugelförmige Lichtquellen genauso gut vermessen wie flächige. Jetzt konnte man immer neue und verschiedene Messgrößen messen. Weltspitze war das – hat sich ja bis heute gehalten. Schließlich braucht man irgendwas Verlässliches, wenn die Welt sich immer weiter dreht, um die ganzen neuen Entwicklungen überhaupt vergleichen zu können. Und bedenkt man, dass es immer Jahrzehnte dauert, bis die internationalen Gremien sich auf neue Standards einigen ... Na klar gibt's das Modernste noch nicht in jeder Hütte in Afrika. Aber hierzulande – wenn die Sonne wüsste, wie wenig man sie heute noch braucht. Die hol' ich mir doch einfach aufs Display. Oder was? Ja ja, dann geh' schon. Ich weiß, deine Leuchtquallen brauchen wieder Futter.

Dörte Sasse

Dünn und leicht wie Papier, darauf immer die aktuellsten Meldungen, die über Satellit aktualisiert werden – so könnte die elektronische Zeitung aussehen. Eine Zeitlang wird man darauf aber noch warten müssen.

Mit Licht kühlen! Die Laserkühlung von eingefangenen Ionen wird **1978** demonstriert. Durch Laserstrahlen „tiefgefrorene Teilchen" werden – zwei Jahrzehnte weiter – die Taktgeber in so genannten Springbrunnen-Atomuhren. Die Sekunde kann dann auf 15 Stellen hinter dem Komma genau gemessen werden.

Das Sonnenkraftwerk Solar One wird **1981** fertiggestellt. Es kann Strom mit einer Leistung von 10 Megawatt erzeugen (und tut dies bis 1988).

Das Kommunikationsnetz der Welt ist aus Glas: **1985** entwickeln die AT&T Laboratories eine Glasfaser, bei der gleichzeitig 300 000 Telefongespräche übertragen werden können.

Eine sehr spezielle, neue Laser-Generation wird der Freie-Elektron-Laser (FEL), der seine Lichtverstärkung aus freien Elektronen bezieht, die in einem Magnetfeld zu wellenförmiger Bewegung gezwungen werden. Der FEL liefert nicht nur Strahlung einer bestimmten Wellenlänge, sondern ist theoretisch vom Mikrowellen- bis in den Röntgenbereich durchstimmbar. Eine 300 Meter lange FEL-Anlage firmiert als ein externes Projekt der Weltausstellung Expo 2000 in Hannover und wird in Hamburg am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) gebaut.

→ S. 51

Fotos: Keystone (unten); MEV (oben)

Sonnige Aussichten

Geheimnisvolle Photosynthese: Noch ist die Natur als Energieerzeugerin ungeschlagen. Aber die Solar-Techniker holen auf.

Der Kalender zeigt Herbst, doch in Freiburg knallt die Sonne vom wolkenlosen Himmel. Verschwenderisch verteilt sie ihr unerschöpfliches Energieangebot auf die Dächer der Stadt und zaubert südliches Flair. Exakt 1846 Sonnenscheinstunden hat der Deutsche Wetterdienst hier im letzten Jahr gemessen – rund 300 Stunden über dem deutschen Mittel. Was Besuchern aus dem kühleren Norden den Schweiß aus den Poren treibt, sorgt in Deutschlands südlichster Großstadt für Strom, warmes Wasser und – man mag es gar nicht glauben – Kühlung. Das städtische Umweltschutzamt hat nachgezählt: Aktuell verwandeln 362 über die Stadt verteilte Photovoltaik-Anlagen Sonnenlicht in elektrische Energie. Dazu kommen mindestens 6744 Quadratmeter Sonnenkollektoren, die Warmwasser produzieren.

Solarenergie hat in Freiburg Konjunktur – und nicht erst seit dem „Erneuerbare-Energien-Gesetz“, das seit über zwei Jahren bundesweit Strom aus regenerativen Quellen fördert. Schon 1986 hatte sich der Gemeinderat entschieden, künftig auf alternative Energieversorgung zu setzen. Die Folgen prägen heute

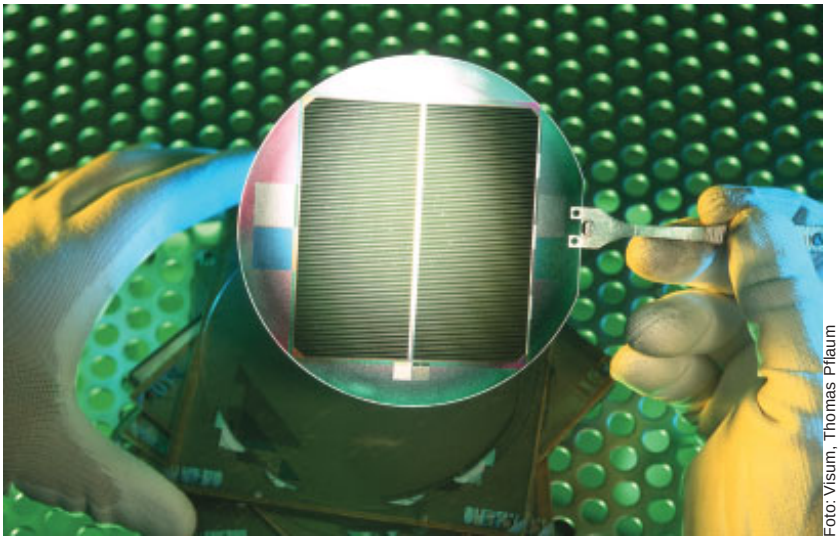


Foto: Visum, Thomas Pflaum

das Stadtbild: zum Beispiel der 60 Meter hohe, bläulich glitzernde „Solartower“ am Hauptbahnhof. Rund 240 Solarstrommodule, verteilt auf 19 Stockwerke, liefern Elektrizität für das technische Innenleben des Gebäudes. Reichlich paradox erscheint dagegen eine Technologie am Klinikum der Albert-Ludwigs-Universität: Solare Kälteerzeugung heißt das Verfahren, mit dem aus sonnenerwärmtem Wasser über eine Adsorptionskältemaschine kühle Luft für Labors wird.

Bei der Solarthermie, der Wärmeerzeugung mit Hilfe von Sonnenkollektoren, hat Freiburg inzwischen seinen Spitzenplatz eingebüßt; Ulm verfügt mittlerweile über mehr Kollektorfläche pro Einwohner. Nach wie vor glänzt Freiburg aber bei der Photovoltaik, der Erzeugung von Strom durch Solarzellen, mit derzeit 11,74 Watt Leistung je Einwohner. Der Bundesdurchschnitt liegt bei mageren 1,34 Watt. Zur wahren „Solar-Region“ wird die Gegend durch die vielen Firmen und Forschungseinrichtungen, die sich vor Ort dem Thema Sonnenenergie widmen. Zum Beispiel das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE). Vor rund 20 Jahren gegründet, ist es heute Europas größtes Solarforschungsinstitut. Über 120 Mitarbeiter entwickeln Systeme und Komponenten für die Bereiche Photovoltaik, Solarthermie, Solares Bauen und Energietechnik.

Bild links (Montage): Solarkraftwerk Wald und kleiner Ausschnitt des Solarkraftwerks auf dem Dach des Messegeländes in Freiburg

Bild oben rechts:
Herstellung einer herkömmlichen Siliziumzelle unter Reinraumbedingungen

Einige Licht-„Quellen“

Zahlreiche Informationen dieser kleinen Chronologie des Lichts entstammen dem leider nur noch antiquarisch zu beziehenden Buch: *Alexander Hellemans, Bryan H. Bunch: Fahrplan der Naturwissenschaften. Ein chronologischer Überblick. München 1990 (aus dem Amerikanischen: The Timetable of Science. 1988)*

Unterhaltsam, wenn auch mit erzählerischen Längen, kommt eine spezielle Licht-Chronik daher. Ein amerikanischer Physiker gibt einen – durchaus auch persönlich gefärbten – Eindruck von der Rolle des Lichts in Wissenschaft, Technik und (!) Kunst: *Sidney Perkowitz: Eine kurze Geschichte des Lichts. Die Erforschung eines Mysteriums. dtv, München 1999 (aus dem Amerikanischen: Empire of Light. New York 1996)*

Naturwissenschaftliche Begriffe – nicht nur zum Licht – klärt ein Lexikon, das zum ausgiebigen und intellektuell nahrhaften Schmökern verführt: *Michel Serres, Nayla Farouki (Hrsg.): Thesaurus der exakten Wissenschaften. Zweitausendeins, Frankfurt 2001. (Aus dem Französischen: Le Trésor. Dictionnaire des Sciences.)*

Licht ist etwas für das Auge. Dies belegt ein phantastisch bebildertes, großformatiges Buch aus der Reihe der WWF-Dokumentationen: *Pro Futura Verlag (Hrsg.): Reflexionen. Licht – Medium der Zukunft. Umweltstiftung WWF-Deutschland, München 2000*

Tüfteln an den Energiequellen der Zukunft

In einem Flügel des dreigeschossigen ISE-Gebäudes tüfteln Andreas Hinsch und etwa ein Dutzend Kollegen, darunter Wissenschaftler vom Freiburger Materialforschungszentrum (FMF), an den Solarzellen der Zukunft. Eine ihrer Visionen: Flexible „Plastik"-Solarzellen, die sich auf Kleidung, Geräten und Fahrzeugen anbringen oder integrieren lassen. Die biegsamen Zellen könnten auch Architekten zu ganz neuen Gebäude-Designs inspirieren. Bisher schaffen die organischen Solarzellen aus elektrisch leitenden Kunststoffen allerdings nur kärgliche drei Prozent Wirkungsgrad. Denn die dünnen organischen Schichten absorbieren noch nicht genug Licht. Mittels spezieller Nano-Strukturen, raffinierter „Lichtfallen" auf der Oberfläche der Zellen, wollen die Fraunhofer-Forscher die Leistung steigern. „Von einer technologischen Umsetzung sind wir aber noch weit entfernt", sagt Rainer Kern, Physiker und Mitarbeiter im Forschungsteam.

Schon weiter gediehen ist dagegen das zweite Projekt der Wissenschaftler: Solarzellen, die kein teures Silizium benötigen, sondern mit Hilfe von Farbstoff Strom produzieren. Pate steht dabei ein umweltfreundlicher, aber höchst komplizierter Vorgang: die Photosynthese. Bei diesem Prozess wandelt Chlorophyll, der grüne Blattfarbstoff, Sonnenenergie in Zucker, also chemische Energie, um. „Salat oder Osterglocke – jede grüne Pflanze führt uns eindrucksvoll vor, wie mit Licht und Farbstoffen Energie erzeugt werden kann", sagt Andreas Hinsch. Schon lange träumen Wissenschaftler davon, die Photosynthese für die Energiegewinnung nutzbar zu

Foto: ISE Freiburg

machen. Ob in der Natur oder im Labor – damit sich Sonnenenergie einfangen lässt, bedarf es geeigneter Moleküle. Bei den Pflanzen absorbieren die Blattpigmente, die sich konzentriert in den Chloroplasten – kleinen Körperchen, quasi natürlichen Sonnenkollektoren – befinden, Licht verschiedener Wellenlängen. Das erhöht den Energiegehalt der Chlorophyllmoleküle, regt sie gewissermaßen an, und setzt eine Vielzahl von nützlichen Folgereaktionen in Gang, die dann auch im Dunkeln ablaufen können.

Paradebeispiel der Bionik

Was in der Natur seit Jahrmillionen klappt, ahmen die ISE-Forscher nun mit Hilfe der Technik nach – ein Paradebeispiel der Bionik, noch dazu mit kostengünstigen Materialien und einfachen Herstellungsschritten: Die Aufgabe des Chlorophylls übernimmt in den Solarzellen eine extrem dünne Lage eines farbigen Edelmetallkomplexes. Die aktiven Schichten machen zusammen nur 20 Mikrometer aus – das entspricht einem Drittel der Dicke des menschlichen Haars. Um mit der Nano-Solarzelle eine möglichst hohe Energieausbeute zu erzielen, muss das Schlüsselelement, der eingesetzte Farbstoff, wie in der Natur, ein breites Spektrum des Sonnenlichts nutzen und der stattfindende Elektronentransfer möglichst rasch vor sich gehen. Die Forscher bauen ihre „künstlichen Blätter" daher aus Glasplättchen, die zuerst mit einer transparenten und leitenden TCO(Transparent Conducting Oxide)-Schicht versehen worden sind; sie dienen als Elektrode. Da umso mehr Licht eingefangen wird, je größer die verfügbare Oberfläche ist, bedrucken Hinsch und sein Team die Glasplättchen anschließend mit Titandioxid (TiO_2), einem kostengünstigen Allerweltsmaterial, das sich auch als Pigment in Sonnenschutzmitteln und Farben findet. Sie schaffen so eine nano-poröse Oberflächenstruktur, die tausendmal größer ist als eine glatte Fläche, was die Aufnahme von Lichtteilchen, den Photonen, verbessert. Diese Oberfläche überziehen sie dann mit Farbstoffmolekülen. Chlorophyll eignet sich dafür jedoch nicht, denn es ist nicht stabil genug und zerfällt nach einiger Zeit. Bei der Photosynthese stellt dies kein Problem dar, da die Chloroplasten das Chlorophyll optimal schützen und die Natur ständig für unerschöpflichen Blattwuchs sorgt. In der Technik haben sich inzwischen

Bild oben: Der Natur auf der Spur: Andreas Hinsch mit der eingefärbten Photoelektrode eines Solarzellen-Moduls

Ruthenium-Komplex-Verbindungen als lichtstabil bewährt und durchgesetzt. Damit die Solarzelle richtig arbeitet, bedarf es noch einer Gegenelektrode – ein platiniertes TCO-Glasplättchen übernimmt diese Funktion. Den Zwischenraum zwischen beiden Elektroden füllt ein leitender, flüssiger Elektrolyt.

Trifft nun ein Photon auf die Solarzelle, bringt es – ähnlich wie in den Chloroplasten – ein Farbstoffmolekül in einen energetisch angeregten Zustand, von dem aus ein Elektron ungeheuer schnell in das Leitungsband des Halbleiters Titandioxid injiziert wird. Dieser extrem rasche Elektronenfluss dauert – wie ein internationales Forscherteam vor kurzem herausgefunden hat – nur drei Billiardstel Sekunden. Das angeregte Elektron bewegt sich durch das poröse Titandioxid zur TCO-Elektrode, gibt seine Energie an ein elektrisches Gerät ab, gelangt zur Gegenelektrode und über den Elektrolyten wieder zum Farbstoff. Noch ganz klappt die Imitation von Mutter Natur jedoch nicht. Probleme macht die Abdichtung der Solarzellen über einen längeren Zeitraum hinweg, denn die darin enthaltene Flüssigkeit könnte eventuell auslaufen. Im Mittelpunkt der Forschungsarbeiten des ISE-Teams steht daher die langzeitstabile Versiegelung der Zellen, der eventuelle Ersatz des flüssigen Elektrolyten durch einen festen und die Entwicklung einer Technologie, mit der auch großflächige Solarkomponenten hergestellt werden können.

Mit den Farbstoffsolarzellen lässt sich zurzeit ein Wirkungsgrad von 8 % erzielen. Die Wissenschaftler wollen ihn noch auf 12 % steigern. Zwar schaffen konventionelle Siliziumzellen mehr als das Doppelte, aber dennoch könnten die innovativen Solarzellen schon bald konkurrenzfähig werden. Denn sie lassen sich mit herkömmlichen Techniken aus dem Siebdruck – zum Aufbringen des Titandioxids – und der Glasherstellung fertigen und benötigen keine aufwendige und teure Reinraum-Technik. Auch geht der Trend inzwischen zu möglichst vielfältigen Zellenvarianten, um allen denkbaren Anwendungsbereichen gerecht zu werden. „Farbstoffsolarzellen werden Siliziumzellen nie ersetzen, sondern die Palette einfach erweitern“, bestätigt Rainer Kern. Sie werden farbige Fassaden und Fenstermodule bilden oder, eingebaut in preisgünstige Solar-Home-Systeme, Häuser auch abseits von Siedlungen mit Strom versorgen. Noch zwei bis fünf Jahre, schätzt der Physiker, dann könnten die Farbstoffsolarzellen des ISE auf den Markt kommen. Und der boomt. Nach einer Studie aus der Schweiz gehört die Photovoltaik-Industrie weltweit inzwischen zu den wachstumsstärksten Branchen. Global nimmt die Solarzellen-Produktion um durchschnittlich 17 % pro Jahr zu, in den kommenden fünf Jahren sollen es gar bis zu 20 % sein.

Almut Bruschke-Reimer

Foto: MEV

Ein Blatt – die Farbstoffsolarzelle der Natur

Auf Herz und Nieren prüfen

Wer eine Solaranlage kauft, will sich darauf verlassen können, dass die Leistung nicht enttäuscht. „Damit es in der Praxis keine unangenehmen Überraschungen gibt, tun Hersteller gut daran, die Qualität von Solarzellen und -modulen schon während der Entwicklung und bei der Produktion mit passenden Referenzzellen zu sichern“, sagt Jürgen Metzdorf vom Fachbereich „Licht und Strahlung“ der PTB in Braunschweig. Referenz-Solarzellen sind besonders genau gemessene Solarzellen, die als so genannte „Normale“ dienen, als „Urmaß“. Sie müssen allerhand elektrische, thermische, optische und mechanische Kriterien erfüllen. Maßgebend ist dafür ein international gültiger Standard, die Regeln im Rahmen der so genannten World Photovoltaic Scale (WPVS). Forschungslabore (unter anderem auch das Fraunhofer ISE in Freiburg) und Unternehmen lassen ihre Referenzzellen freiwillig in der PTB kalibrieren, also sozusagen auf Herz und Nieren prüfen. Gesetzlich vorgeschrieben ist dies nicht. Mit Hilfe der kalibrierten Zellen können sie dann den Wirkungsgrad der von ihnen hergestellten Solarzellen genau bestimmen und kontrollieren. Um die Übereinstimmung der Kalibrierungen auch global zu sichern, veranstalten die vier weltweit führenden Photovoltaik-Messlabore, darunter das der PTB, regelmäßig internationale Vergleichsmessungen. Einem rasanten Wachstum der Photovoltaik-Branche sollte damit – zumindest messtechnisch – nichts im Wege stehen. abr

Unscheinbarer Zwerg der Klasse G2 Römisch Fünf

Sie ist völlig gewöhnlich, aber ohne sie wären wir nicht. Unsere Sonne strahlt schon fünf Milliarden Jahre und wird es noch einmal so lange tun. Jetzt, in der Mitte ihres Daseins, herrschen tief in ihrem Innern unvorstellbare Temperaturen von 15,5 Millionen Grad Celsius und ballen sich die Wasserstoffkerne zu einer Dichte von 155 Gramm pro Kubikzentimeter zusammen. Die Atomkerne in dieser Zone sind energiegeladene Pakete und nichts als hüllenlose, nackte Kernbausteine – die „zarten“ Elektronenbindungen sind alle zerrissen. Temperaturgetrieben donnern Kerne auf Kerne und verschmelzen in thermonuklearen Reaktionen. Die Kollisionen von vier Protonen, also Wasserstoffkernen, erzeugen letztlich jeweils einen Heliumkern und – als entscheidenden Zusatz – überschüssige Energie. Dieses „Wasserstoffbrennen“ dominiert im momentanen Lebensabschnitt der Sonne alle anderen Prozesse, es produziert 99 % der solaren Energie. Doch irgendwann geht dieser Brennstoff aus, die Wasserstoffkerne werden zur Neige gehen. Nun sind größere Kerne an der Reihe, es beginnt das Heliumbrennen, in dem Helium zu Kohlenstoff fusioniert. Für die Sonne beginnt der Lebensabschnitt eines Roten Riesen: Langsam kühlt sie sich ab – ihre Oberflächentemperatur sinkt von jetzt 6000 Kelvin auf Werte zwischen 2000 Kelvin und 4000 Kelvin; und ebenso langsam bläht sie sich auf, frisst irgendwann den ersten Planeten, Merkur, den zweiten, die Venus, und dann wahrscheinlich auch noch die Erde.

Doch bis zu diesem Endzeit-Szenario ist Zeit. Zeit auch dafür, das Wasserstoffbrennen ganz irdisch zu nutzen. Immerhin kommt von diesem mittelprächtigen Stern in der fünften und damit vorletzten aller Leuchtkraftklassen eine Strahlungsleistung von 175 000 000 000 000 Kilowatt (bzw. 175 Petawatt) bei der Erde an. Jeden Quadratmeter Erdoberfläche bestrahlt die Sonne üppig mit Energie – mit einer Leistung von rund einem Kilowatt. Genug Energie für alles. Wenn wir sie nutzen.

PS: Nach dem Harvard-Spektralklassifikationssystem gehört unsere Sonne zum Sterntyp G mit charakteristischen Spektrallinien des Elements Eisen und von ionisiertem Calcium. In welche Spektralklasse ein Stern fällt, entscheidet seine Oberflächentemperatur. Nach fallender Temperatur sortiert sind die Sternentypen benannt nach der Sequenz O, B, A, F, G, K und M. Als eine kleine Merkhilfe gilt der Satz: „**O**h, **b**e **a f**ine **g**irl. **K**iss **m**e.“ Die arabische 2 (nach dem G) bedeutet eine Dezimalteilung zwischen den Elementen der Sequenz (G2 ist also näher an G als an K). Die anschließende römische Ziffer gibt die Morgan-Keenan-Leuchtkraftklassifikation. So sind Sterne der Klasse I Überriesen und Sterne der Klasse VI Unterzwerge.

JENS SIMON

Bild: Die Sonne verschwendet sich an das Universum – in riesigen Ausbrüchen von Sonnenmaterial. Diese Protuberanzen erreichen Höhen von einigen hunderttausend Kilometern und schießen teilweise mit Geschwindigkeiten von 200 Kilometern pro Sekunde ins All. Die Aufnahme wurde mit dem „Extreme ultraviolet Imaging Telescope“ (EIT) der Raumsonde SOHO am 15. Mai 2001 aufgenommen – sie zeigt, eingefärbt in Rottönen, die Emissionen der Sonne im tiefen Ultraviolett bei einer Spektrallinie von 304 Å (Emissionslinie des zweifach ionisierten Heliums). Die heißesten Stellen der Sonnenoberfläche, der Chromosphäre, erscheinen weiß, die kühleren rot.

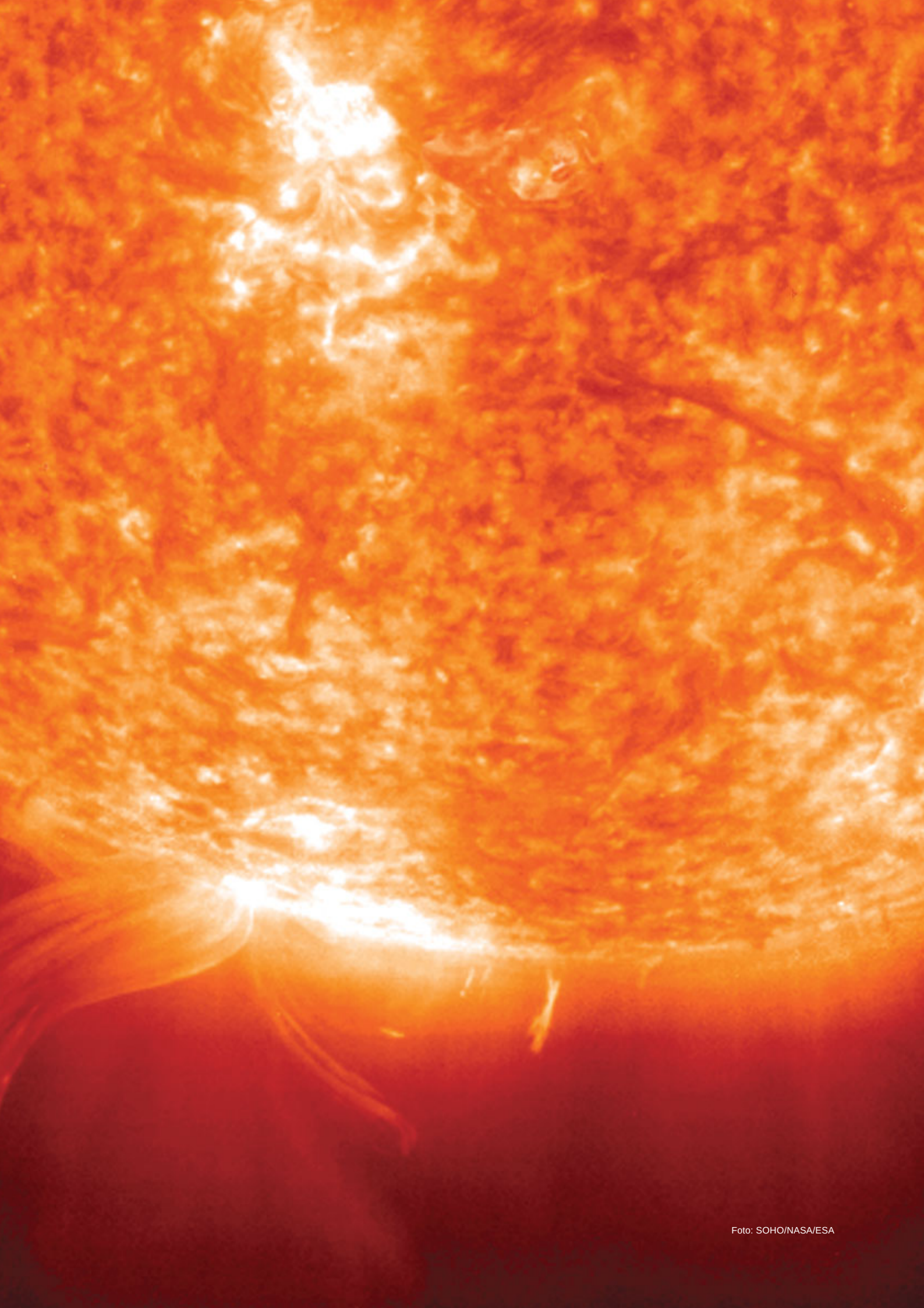


Foto: SOHO/NASA/ESA

Das Letzte

Foto: Copyright W. T. Sullivan III &Hansen, Planetarium/Science Photo Library

Wie gut, dass wir die dunklen Zeiten hinter uns haben. Zeiten, als wir in muffigen Höhlen leben mussten, in ständiger Angst vor Säbelzahntigern und den Keulenhieben der Nachbarn. Oder das Mittelalter: Schwefelstinkende Alchimistenkammern, von farbigen, wabernden Rauchschwaden durchzogen. Wie gut, dass es seit der Aufklärung ständig aufwärts gegangen ist mit der Erleuchtung der Menschheit. Einer unserer größten Träume hat sich erfüllt: Wir haben die Dunkelheit ausgelöscht. Licht, oh Licht! Du vertreibst unsere Angst, minderst unsere Schwermut, verscheuchst den nächtlichen Einbrecher (wenn auch nicht Nachbars Katze, die zum wahren Fan des Bewegungsmelders geworden ist). Licht, du lässt uns noch auf dem dunkelsten Parkplatz unser Auto wiederfinden (vorausgesetzt, die Diodentaschenlampe ist in der Handtasche zu finden). Unser nächstes Auto wird Scheinwerfer haben, die um die Kurve leuchten. Und gerade ist es Ärzten gelungen, auch den hintersten Winkel des menschlichen Körpers, den Dünndarm, zu erhellen: Der Patient schluckt eine kleine Kapsel, die ständig ihren Aufenthaltsort nach außen funkt – und das Innere des Körper öffnet sich wie ein Buch. Nichts mehr liegt im Dunklen, alles ist licht und klar. Die Welt ist in Ordnung.

Nur einige wenige Geschöpfe wagen es noch, sich menschlicher Lichtherrschaft zu widersetzen. Glühwürmchen sind es, die ungerührt ihr Licht an- und ausknipsen. Und die Winzlinge arbeiten dabei auch noch sagenhaft energiesparend. Gelänge es uns, ähnlich elegant und effizient Licht zu erzeugen, dann könnten auch die letzten dunklen Flecken von der Weltkarte verschwinden. Aber leider denken die Glühwürmchen gar nicht daran, uns ihr Geheimnis zu verraten. Sind verschlossen, die Kleinen. Wollen uns nicht teilhaben lassen. Uns so lächerlich dastehen zu lassen! Aber ein Feldzug ist nicht nötig, denn die Tiere werden sowieso aussterben. Kleiner Nebeneffekt der zunehmenden Beleuchtung. Glühwürmchen brauchen nämlich Dunkelheit, um einen Partner zu finden. Apropos: Unter den Menschen, den Zweisamen, soll es auch so Altmodische geben, die es nachts dunkel haben wollen ... – Aber das kriegen wir noch in den Griff. Ebenso wie das Problem mit den Leuten, die plötzlich so viel von „Lichtverschmutzung“ reden. Zugegeben, ein paar Anfangserfolge haben sie. Ein Würstchenbudenbesitzer aus Oberforstbach musste seinen „Skybeamer“ wieder abschalten. Viele Diskothekenbesitzer, die auch mit Laserstrahlen ihre Werbung in den Himmel fingern, fürchten nun um ihre Existenz. Keine Werbung mehr – das kann heute den Kopf kosten. Und das alles nur, weil sich ein paar alte Leute an Flakscheinwerfer erinnert fühlen. Schwieriger ist schon die Sache mit den Astronomen. Die behaupten, sie könnten vor lauter Licht den Himmel nicht mehr sehen. Aber was soll uns der Himmel? Wir haben den Himmel auf Erden. Malen ihn uns auf Computerbildschirme. Stecken alles, was wir wissen, in Daten und jagen sie als Lichtblitze – eingesperrt in unterirdische Fasern – um den Globus. Und in unseren Höhlen leuchten fahl die Monitore.

Erika Schow

Wenn Sie hier keine Karte mehr vorfinden, können Sie die „maßstäbe“ als kostenloses Abonnement bei der Redaktion direkt bestellen. (Adresse: siehe Impressum)

Ich möchte die *maßstäbe* kostenlos abonnieren. Bitte schicken Sie sie mir ab

☐ dieser Ausgabe (Heft 3)
☐ kommender Ausgabe (Heft 4)

an die umseitig angegebene Adresse.

Bitte schicken Sie mir zusätzlich die ersten Hefte der *maßstäbe*

☐ 1. „Dimensionen der Einheiten“
☐ 2. „Größen des Sports“

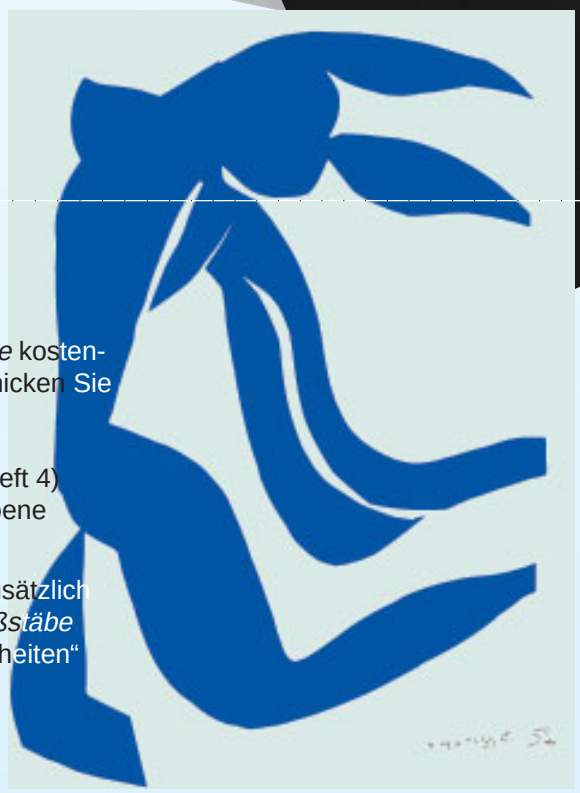
Ich möchte die *maßstäbe* kostenlos abonnieren. Bitte schicken Sie sie mir ab

☐ dieser Ausgabe (Heft 3)
☐ kommender Ausgabe (Heft 4)

an die umseitig angegebene Adresse.

Bitte schicken Sie mir zusätzlich die ersten Hefte der *maßstäbe*

☐ 1. „Dimensionen der Einheiten“
☐ 2. „Größen des Sports“



Ich möchte die *maßstäbe* kostenlos abonnieren. Bitte schicken Sie sie mir ab

☐ dieser Ausgabe (Heft 3)
☐ kommender Ausgabe (Heft 4)

an die umseitig angegebene Adresse.

Bitte schicken Sie mir zusätzlich die ersten Hefte der *maßstäbe*

☐ 1. „Dimensionen der Einheiten“
☐ 2. „Größen des Sports“

bitte frankieren

Absender

Name/Vorname

Straße/Hausnummer/Postfach

PLZ/Ort

Land

Telefon

Fax

Antwort

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Postfach 3345
38023 Braunschweig

bitte frankieren

Absender

Name/Vorname

Straße/Hausnummer/Postfach

PLZ/Ort

Land

Telefon

Fax

Antwort

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Postfach 3345
38023 Braunschweig

bitte frankieren

Absender

Name/Vorname

Straße/Hausnummer/Postfach

PLZ/Ort

Land

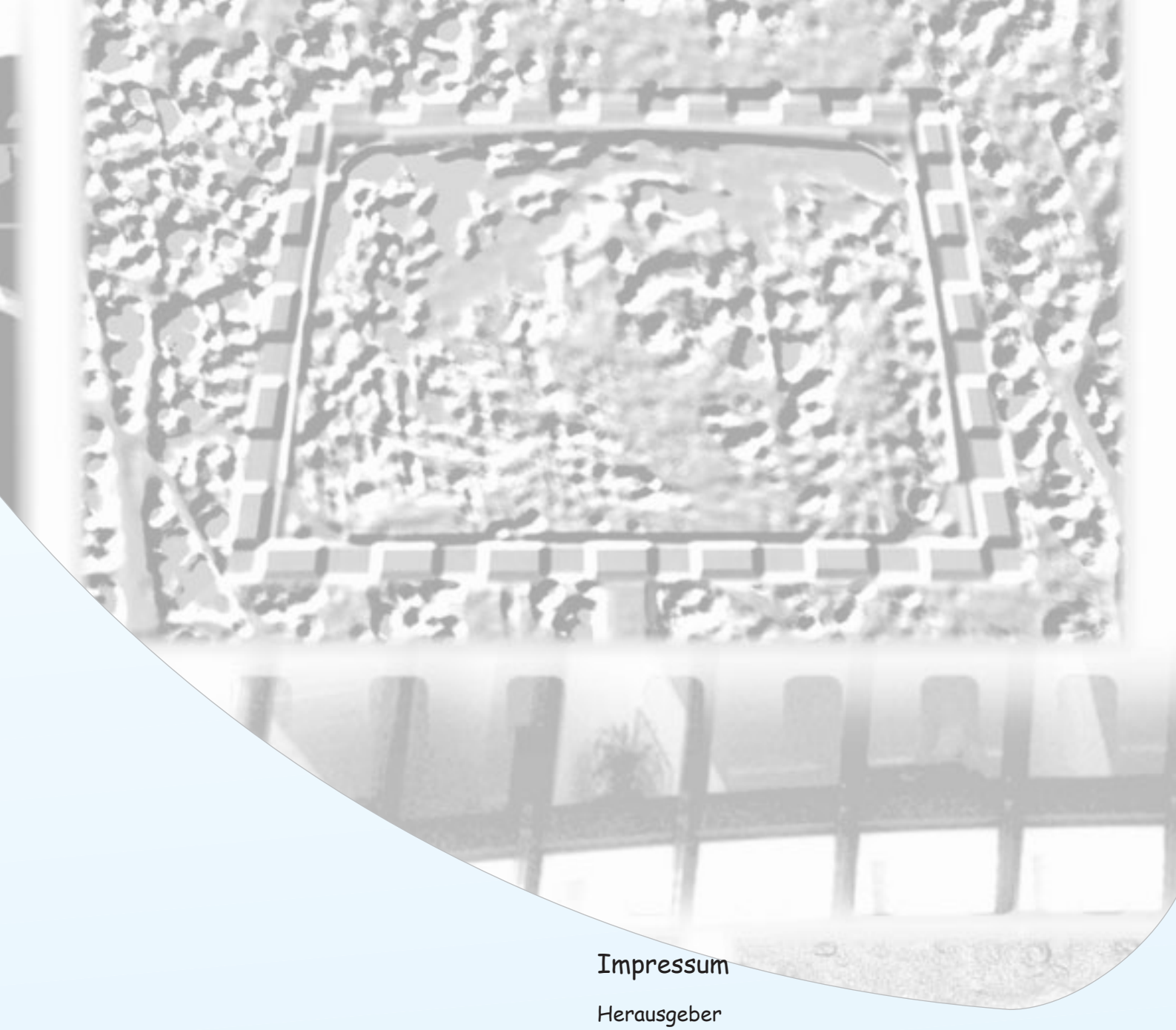
Telefon

Fax

Antwort

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Postfach 3345
38023 Braunschweig

Wenn Sie hier keine Karte mehr vorfinden, können Sie die „maßstäbe“ als kostenloses Abonnement bei der Redaktion direkt bestellen. (Adresse: siehe Impressum)



Impressum

Herausgeber

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin

Redaktion

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB
Postfach 3345, 38023 Braunschweig
Telefon: (05 31) 592-30 06
E-Mail: presse@ptb.de
Redakteure: Jens Simon (jes, verantwortlich), Erika Schow (es),
freie Autoren: Almut Bruschke-Reimer (abr), Birgit Ehlbeck,
Julia Förster, Frank Frick, Nicole Geffert, Frank Grotelüschen,
Ute Kehse (uk), Jan Oliver Löfken (jol), Dörte Saße (ds)
Layout: Jörn-Uwe Barz
Grafik: Björn Helge Wysfeld
Bilder ohne Quellenangabe: PTB

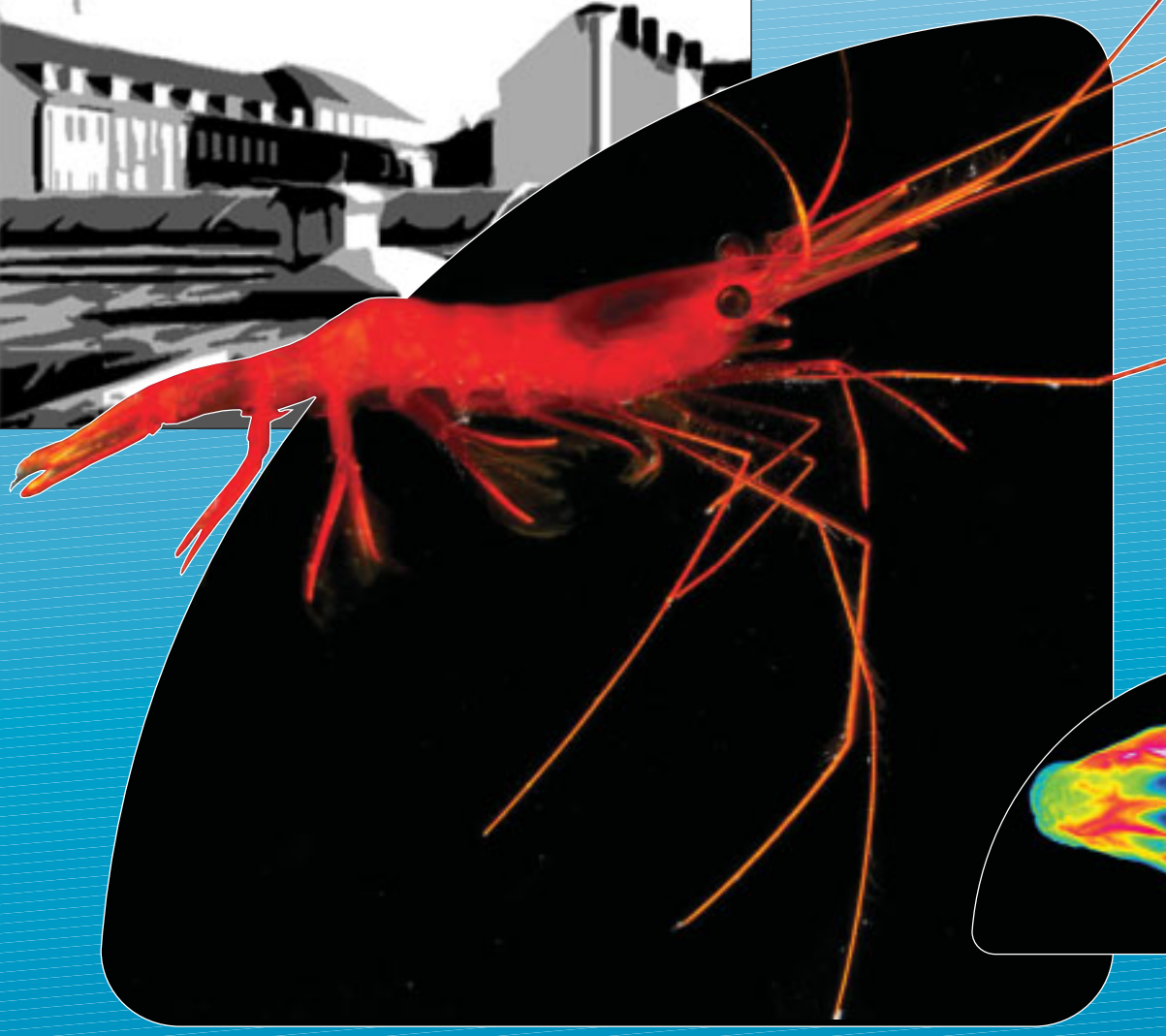
Druck

Fischer Druck, Peine

Auszüge der „maßstäbe" im Internet unter www.ptb.de

© PTB. Alle Rechte vorbehalten.
Bei Nachdruck bitte Quellen- und Autorenangabe
sowie Information an die Redaktion.

Braunschweig, Februar 2003



ISSN 1618-1999