



2019
highlights der **physik**

ZEIG DICH!

**DAS UNSICHTBARE
SICHTBAR MACHEN**
WISSENSCHAFTSMAGAZIN

Dies ist eine Zusammenfassung in „Leichter Sprache“

„Zeig dich!“

Unsere Welt sehen wir mit unseren Augen.



Unsere Augen sind so gut wie Foto-Kameras.

Unser Gehirn verbessert die Bilder, die das Auge sieht. Was Auge und Kamera sehen, ist das Licht.



Aber unsere Welt wird nicht nur mit Licht betrachtet. Zum Beispiel Fleder-Mäuse:

Sie machen ein „Klick“-Geräusch und hören, was als Echo zurückkommt.

Ultra-Schall-Geräte beim Arzt nutzen die gleiche Technik. Sie können damit in den Körper schauen. Zum Beispiel, um Krankheiten zu erkennen oder Babys im Bauch der Mutter zu sehen.



Auch mit Röntgen-Strahlung kann man in Menschen hineinsehen.

Röntgen-Strahlung ist so ähnlich wie Licht, kann aber durch Haut und weiches Material dringen.

Erst Knochen halten die Röntgen-Strahlung auf. Dadurch sind Knochen dann gut zu erkennen.

Man kann Röntgen-Strahlung auch benutzen, um zu erforschen: Woraus besteht ein Gegenstand?

Wie funktioniert das Innen-Leben unserer Körper-Zellen?

Dafür braucht man sehr große Forschungs-Röntgen-Geräte.



Mit Mikroskopen kann man sehr kleine Gegenstände erkennen.

Sogar einzelne Atome kann man so sehen.

Atome sind die Bau-Steine, aus denen alles aufgebaut ist. Sie sind sehr klein.

Wenn man genauer hinschaut, stellt man fest:

Sie bestehen aus noch kleineren Bausteinen.

Sie heißen Quarks und Elektronen. Sie sind sehr klein.

Um sie zu sehen, braucht man die größten Forschungs-Geräte, die je gebaut wurden.



Auch Licht aus dem Weltall kann man betrachten. Dann sieht man Sterne, wie mit dem Auge.

Auch mit Röntgen-Strahlen oder mit Radio-Wellen gucken Forscher in den Himmel.

Er sieht dann immer anders aus. Daraus lernen die Stern-Forscher, woraus die Sterne bestehen:

Sie bestehen aus Wasser-Stoff. Wasser-Stoff verwandelt sich in den Sternen in Helium.

Dabei werden die Sterne heiß und leuchten.



Forscher können auch in die Erde schauen. Sie haben gelernt: Die Erde ist tief innen heiß

und flüssig. Forscher finden auch direkt unter der Erd-Oberfläche verborgene Sachen:

Alte Mauern, manchmal auch alte Schätze.

INHALT

DAS UNSICHTBARE SICHTBAR MACHEN

Was zunächst ein wenig magisch klingt, ist für die Naturwissenschaften schon seit Jahrhunderten ganz alltäglich: Dinge und Vorgänge zu beobachten, die dem Auge verborgen bleiben. Die Natur lässt sich dabei nicht nur mit Licht erkunden: auch Schall, kleine Materieteilchen oder Verzerrungen der Raumzeit werden benutzt, um unsere Welt zu verstehen. Dabei überbrücken die Forschenden die Grenzen zur Mikro- und Nanowelt, indem sie immer bessere Mikroskope, Röntgenlichtquellen und Teilchenbeschleuniger bauen. Auch der Blick in den Kosmos erschließt immer weitere Regionen und immer extremere Materiezustände. Dafür nutzen die Astronominnen und Astronomen gigantische Teleskope für Licht, aber auch für andere Signale aus dem All. Und schließlich gelingt den Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftlern auch der Blick tief in das Innere der scheinbar völlig undurchsichtigen Erde. In diesem Heft nehmen wir Sie mit auf eine Reise durch die verschiedenen Methoden und stellen Ihnen einige spannende und überraschende Entdeckungen aus der Welt des Unsichtbaren vor.

EXTRA:
VOM QUARK
ZUM KOSMOS
\ 16

HINWEIS

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



DIE KAMERA DES MENSCHEN \ 4



**UNSICHTBARES
SICHTBAR MACHEN \ 6**



KLEIN UND KLEINER \ 8



**KNOCHENBILD UND
SPITZENFORSCHUNG \ 10**



DIE BAUSTEINE DER WELT \ 12



**UNIVERSUM –
IN ALLEN WELLENLÄNGEN \ 18**



BUNTER ALS DAS AUGE SIEHT \ 20



**DURCHBLICK IM
FREQUENZ-WIRRWARR \ 23**



**UNSICHTBARE BOTEN
AUS DEM ALL \ 26**



VERBORGENE WELTEN \ 28



DIE KAMERA DES MENSCHEN

▲ Das Auge des Menschen ist eine kompakte Kamera mit Eigenschaften, die technisch nur schwer übertroffen werden können.

DREI KLEINE KAMERAS TRÄGT FAST JEDER MENSCH BEI SICH: ZWEI AUGEN UND EIN SMARTPHONE.

In jedem Jahr bringen die Hersteller eine neue Generation der Taschencomputer auf den Markt. Und mit jeder Generation werden die dort eingebauten Kameras besser. Besaß das erste iPhone im Jahr 2007 nur zwei Megapixel (Millionen Pixel), entsprechend einem HD-Fernsehbild, so hat das neueste Modell zwei Kameras mit 12 bzw. 7 Millionen Pixel zu bieten. Doch es geht noch mehr – einige Hersteller statten ihre Smartphones mit 4 oder 5 Kameras aus, die es gemeinsam auf bis zu 92 Megapixel bringen!

Und unser Auge? Anders als der Fotochip ist die Netzhaut nicht gleichmäßig mit Lichtsensoren bestückt. Im Zentrum, der Sehgrube, befinden sich

dicht gepackt ausschließlich „Zapfen“. Das sind die Sehzellen, die für das Erkennen von Farben zuständig sind. Etwa eine Viertelmillion von ihnen sorgen dort für ein scharfes und farbreiches Bild, der Mitte unseres Sehens. Weiter außerhalb verteilen sich rund 3 bis 7 Millionen der Farbsehzellen. Also hat das Auge nur einige wenige Megapixel?

Für das kontrastreiche Sehen, das bei Tag und Nacht funktioniert, finden sich rund 120 Millionen weitere Sehzellen, die „Stäbchen“, die Licht nur als Hell-Dunkel-Information ohne Farbe wahrnehmen können. Sie sind lichtempfindlicher als die Zapfen: Ein einzelnes Lichtteilchen reicht aus, um eine gut messbare elektrische Spannung von etwa einem Tausendstel Volt zu erzeugen.

Hat das Auge also 125 Megapixel Auflösung? Auch das wäre zu einfach gedacht. Die Sehzellen





sind schon im Auge miteinander verknüpft. So führen weit weniger Nervenbahnen ins Gehirn als es Sehzellen gibt. Besonders die Stäbchen sind schon innerhalb der Netzhaut auf sehr geschickte Weise miteinander verwoben, sodass das Auge große Helligkeitsunterschiede automatisch ausgleichen und Kanten besonders kontrastreich erkennen kann.

Genau darin liegt der große Vorsprung des Auges vor Smartphone und Fotokamera: Das Auge passt seine Empfindlichkeit fortwährend an die Lichtsituation an. Dazu kommt, dass der bewegliche Augapfel die interessanten Bildteile automatisch durch Hin- und Herbewegen abwechselnd in den Bereich des schärfsten Sehens rückt. Daraus werden dann die wichtigen Bildinformationen zusammengesetzt. Der Trend der Smartphone-Hersteller zu immer mehr Einzelkameras guckt sich dieses Prinzip ab: Durch geschickte Kombination der Vorteile der einzelnen Sensoren mit den Linsen unterschiedlicher Brennweite und Empfindlichkeit entstehen Bilder, die kaum noch von professionellen Kameras mit großen Einzelsensoren zu unterscheiden sind.

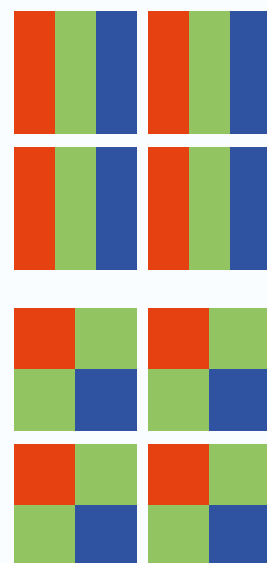
Die Datenmenge, die Auge oder Kamera erzeugen, ist beachtlich: Eine 4K-Videokamera eines Smartphones muss bei Filmaufnahmen pro Sekunde ganze 622 Millionen Rot-, Grün- und Blauwerte verarbeiten. Wenn jeder dieser Helligkeitswerte auf einer Skala von 0 bis 255 gemessen wird

(„8 Bit Farbtiefe“), dann müsste eine solche Kamera 622 Megabyte pro Sekunde abspeichern. Tatsächlich wird durch geschickte Algorithmen die Datenmenge auf 10 bis 25 Megabyte pro Sekunde oder weniger reduziert. Das ist eine Datenreduktion um mindestens den Faktor 25. Unser Gehirn schlägt dabei noch jede Kamera – eine Rechenaufgabe, in die viel Energie unserer grauen Zellen gesteckt wird.

▲ Das Auge hat drei Zapfen-Sorten, die für verschiedenfarbiges Licht empfindlich sind. Im Gehirn werden die Farbinformationen zu einem bunten Bild zusammengeführt.

MILLIONENFACH ROT, GRÜN UND BLAU

Ein Fernseh- oder Computerbild wird aus Bildelementen (Pixel, engl. „Picture Element“) zusammengesetzt. Dabei besteht jedes Pixel aus roten, grünen und blauen Sub-Pixeln (rechts oben). Kameras besitzen meist zwei grüne Sub-Pixel, um Kontraste im wichtigen mittleren Wellenlängenbereich des Lichts besser zu unterscheiden (rechts unten). Würde man den Bildschirm eines HD-Fernsehers mit seinen zwei Millionen Pixeln aus den kleinsten Legosteinen aufbauen, bräuhnte man dafür 15,4m x 8,6m Platz.



▼ Das elektromagnetische Spektrum mit beispielhaften Anwendungen. Sichtbares Licht macht nur einen kleinen Teil aus (bunter Bereich links der Mitte).

Gammastrahlung	Röntgenstrahlung	Ultraviolettstrahlung	Infrarotstrahlung	Terahertzstrahlung	Mikrowellen	Radiowellen	Wechselströme
Strahlentherapie	Röntgenbilder	Banknotenprüfgerät	Fernbedienung	Körperscanner	Mikrowelle	Radio	Stromtransport



UNSICHTBARES SICHTBAR MACHEN

▲ Die Kleine Hufeisennase (lat. *Rhinolophus hipposideros*) sendet und empfängt Ultraschall mit rund 110.000 Hertz – unhörbar für menschliche Ohren. Das Echo der Ultraschallsignale dient der Fledermaus zur Orientierung. Das gleiche Prinzip nutzen Echolot und Radar.

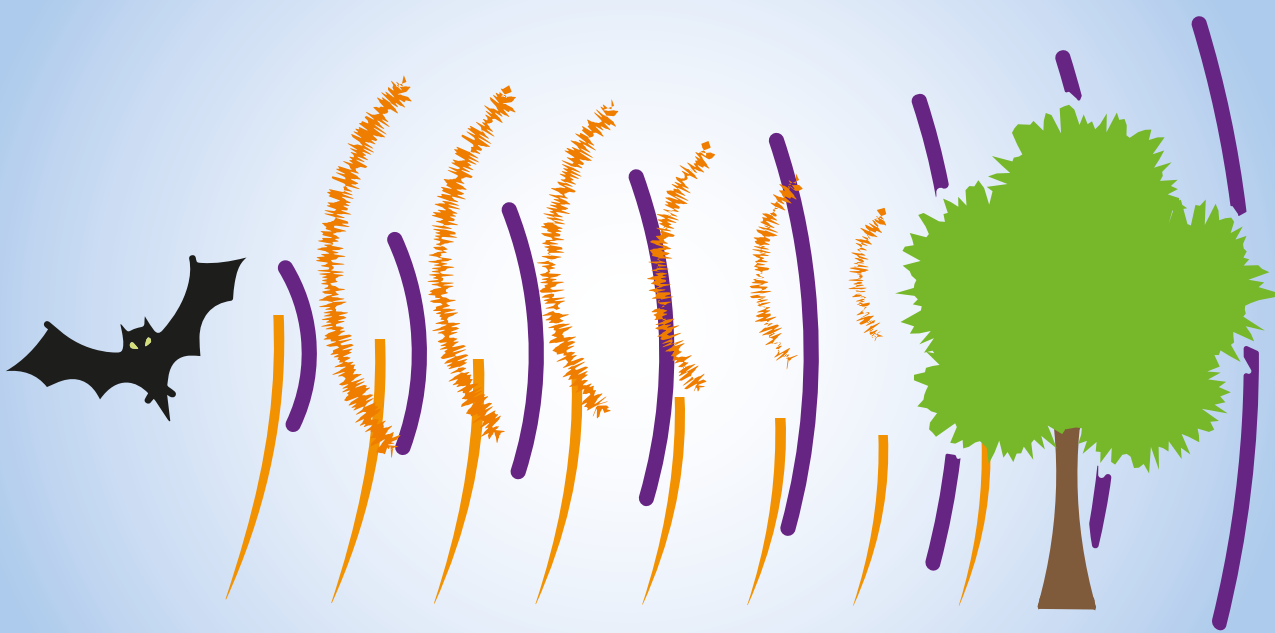


DIE WISSENSCHAFT HAT IM LAUFE DER VERGANGENEN RUND EINHUNDERT JAHRE GELERNT, DIE NATUR NICHT NUR MIT DEN AUGEN ZU UNTERSUCHEN, SONDERN AUCH ANDERE SENSOREN ZU VERWENDEN.

Solche Sensoren erkennen Licht, das „roter“ ist als rot oder „blauer“ als blau, sie bemerken Schall, der selbst für Fledermäuse unhörbar ist, sie signalisieren, wenn die Kreiselrichtung von Atomkernen in Magnetfeldern umkippt. Mit ihnen können wir in das Innere von lebenden Menschen blicken, alte Gemälde Schicht für Schicht durchleuchten, ohne sie zu zerstören oder nach Schwachstellen in der Wärmeisolierung von Gebäuden fahnden.

Schall sind Dichteschwankungen, die sich durch einen Körper ausbreiten. Dabei kann der Schall

durch Gas (wie etwa Luft), Flüssigkeiten oder sogar feste Körper wandern. Einzig im Vakuum gibt es kein Vorankommen: Schall benötigt ein Trägermedium, Atome, die sich gegenseitig anstoßen. Mit den Ohren können wir Schallsignale von rund 20 bis 20.000 Schwingungen pro Sekunde erkennen. Mit zunehmendem Alter verlieren die meisten Menschen einen Teil der Hörfähigkeit bei hohen Tönen. Andere Tierarten können noch weit höhere Frequenzen wahrnehmen und nutzen. Fledermäuse senden Ultraschallimpulse aus, die sie zur Echoortung verwenden: Die Schallpulse werden von Hindernissen reflektiert. Anhand der Dauer, die das Echo benötigt, konstruiert die Fledermaus ein Schallbild ihrer Umgebung. Durch die hohen Frequenzen liegen die Wellenberge und -täler der Schallwellen dicht beieinander: Nur durch die kleine Wellenlänge von drei Millimetern können die Tiere etwa dünne Äste erkennen.



Für die Materialuntersuchung setzen Ingenieurinnen und Ingenieure noch höhere Schallfrequenzen ein. Ein Grund dafür ist die viel höhere Schallgeschwindigkeit in festen Körpern. Während der Schall sich in der Luft mit rund 330 Metern pro Sekunde ausbreitet, sind es in Stahl fast sechs Kilometer pro Sekunde! Daher sind die Schallwellen bei gleicher Frequenz viel länger. Um in Stahl Störstellen von etwas weniger als einem Millimeter Größe zu entdecken, müssen die Schallimpulse daher als sehr kurzer Impuls ausgesandt werden. In modernen Materialprüfungsgeräten können diese bis zu 25 Milliardstel Sekunden kurz sein. Mit solchen tragbaren Ultraschallgeräten werden beispielsweise die Schweißnähte von Rohren in Reaktoren geprüft oder Eisenbahnräder auf Fehler und Verschleiß untersucht.

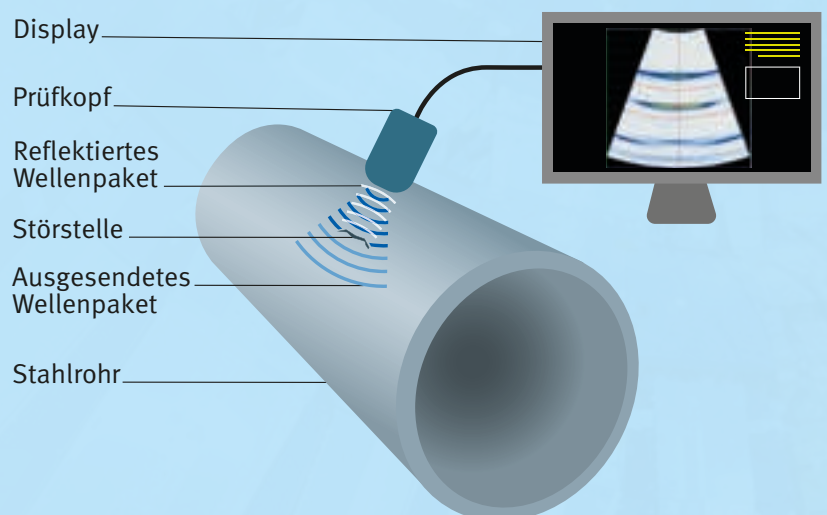
Ein weit bekannteres bildgebendes Verfahren ist der medizinische Ultraschall – die Sonographie. Sie hat sich zum Standardverfahren in der Schwangerschaftsbegleitung entwickelt, aber auch andere Diagnosen etwa des Herzens oder weiterer innerer Organe werden mit ihr möglich, ohne dass der Patient der Strahlenbelastung der Röntgenuntersuchung ausgesetzt werden müsste. Ob allerdings von den Föten im Mutterleib regelmäßig Portraitfotos mit Ultraschall aufgenommen werden müssen, nur weil es technisch möglich ist, ist umstritten. Tatsächlich werden nicht medizinisch notwendige Ultraschallbilder („Baby-Kino“) von Föten ab 2021 nicht mehr erlaubt sein. Auch die Ultraschallwellen beeinflussen nämlich das Gewebe – besonders die noch weichen Knochen können möglicherweise von den starken Schallsignalen bei der 3D-Ultraschalluntersuchung im Wachstum gestört werden.

Dreidimensionale Bilder vom Körperinnern werden auch mit der Kernspinresonanztomographie (NMR)

▲ Fledermäuse erkennen per Ultraschall nicht nur Objekte in ihrer Umgebung, sondern können anhand des Echos auch Rückschlüsse auf deren Beschaffenheit ziehen. Hier unterscheiden sich die Wellen von der durchlässigen Krone und vom massiven Stamm eines Baumes.

gewonnen. Diese Methode nutzt aus, dass die Atomkerne wie kleine Kreisel um eine von außen vorgegebene Magnetfeldrichtung rotieren. Ändert man das Magnetfeld mit passender Frequenz, so schwingen Magnetfeld und Atome im Gleichtakt. Diese sog. Resonanz wirkt auf die Magnetisierung zurück, was vom Gerät gemessen werden kann. Durch geschickte Wahl der Felder und der Frequenzen können dabei sehr hoch aufgelöste Bilder erzeugt werden, auf denen Fachleute kleinste Verletzungen oder Erkrankungen erkennen können. Eine einzelne Aufnahme ist dabei immer eine Schicht, die im Computer zu einem 3D-Bild zusammengesetzt werden kann. Anders als bei der Röntgentomographie tritt bei der NMR keine ionisierende Strahlung auf (→ S. 10/11), sodass die Methode nach heutigem Stand der Forschung ungefährlich ist.

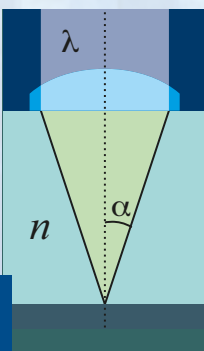
▼ Mit Frequenzen von Millionen von Schwingungen pro Sekunde werden in der Materialprüfung kleinste Fertigungsfehler entdeckt. Die Schallwellen werden dabei in Millionstel Sekunden dauernden Impulsen ausgesandt – daher müssen die Frequenzen im Megahertz-Bereich liegen.



KLEIN UND KLEINER

$$\alpha = \frac{\lambda}{2n \sin \alpha}$$

▲▼ Die Größe der kleinsten Struktur, die man mit einem Mikroskop erkennen kann, lässt sich mit der Abbe-Formel berechnen. Dort gehen die Wellenlänge des Lichts λ (λ), der Brechungsindex n zwischen Linse und Objekt sowie der Öffnungswinkel α (α) ein.



MIT DEN AUGEN KÖNNEN WIR GEGENSTÄNDE ERKENNEN, DIE ETWAS KLEINER SIND ALS EIN MILLIMETER – SAND- UND STAUBKÖRNER ETWA. UM DIE NOCH KLEINEREN OBJEKTE DER MIKRO- UND NANOWELT ZU UNTERSUCHEN, BRAUCHEN WIR OPTISCHE HILFSMITTEL.

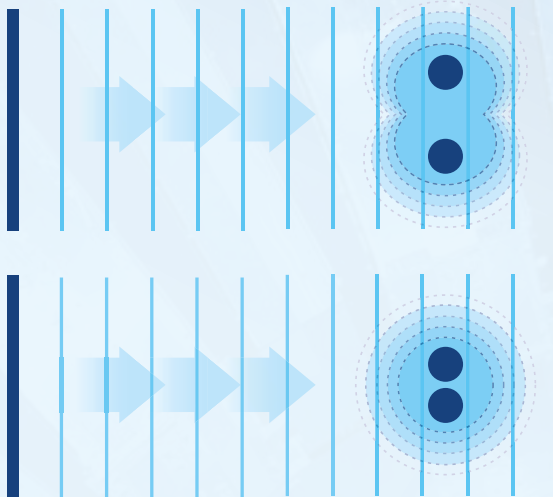
Ein gutes optisches Forschungsmikroskop kann Strukturen sichtbar machen, die hundert Mal kleiner als ein Haar sind. Die Leiterbahn eines Mikrochips mit einem Tausendstel Millimeter Breite wird somit sichtbar. Beim Blick in das Mikroskop erfordert das eine Vergrößerung des Bildes um den Faktor Tausend. Doch sowohl in der Biologie als auch in der Materialforschung ist man an noch viel kleineren Strukturen interessiert. Mitochondrien etwa, die als „Kraftwerke der Zellen“

bezeichnet werden, sind ebenfalls etwa einen Mikrometer groß. Ihr noch kleineres Inneres verschließt sich daher der Untersuchung mit Lichtmikroskopen.

Dass eine Vergrößerung von mehr als tausendfach mit Lichtmikroskopen nicht machbar ist, hat seine Ursache in der Wellennatur des Lichts. Licht ist nämlich elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge von 400 (blau) bis 800 (rot) Nanometern. Aufgrund der Welleneigenschaften ist es nicht möglich, Strukturen zu erkennen, die kleiner sind als diese Wellenlänge.

Allerdings konnte der Physiker Stefan Hell dieser physikalischen Grenze ein Schnippchen schlagen – belohnt mit dem Nobelpreis für Chemie des Jahres 2014. Seine Idee vergegenwärtigen wir uns mit dem Versuch, nachts die beleuchteten Fenster

► Wenn Wellen auf zwei Objekte treffen, dann verschwimmen die reflektierten Wellen. Wenn die beiden Objekte dichter beieinanderliegen als die Wellenlänge, kann man aus der Wellenstruktur nicht erkennen, ob es sich um zwei oder nur um ein Objekt handelt. Das gilt auch, wenn die Objekte beliebige Formen annehmen. Der einfachste Weg zu besserem Auflösungsvermögen führt zu kürzeren Wellenlängen, von optischen Mikroskopen hin zu Röntgen- oder Elektronenmikroskopen. Auch Elektronen besitzen Welleneigenschaften mit ganz kleinen Wellenlängen.



eines am Horizont vorbeifahrenden Kreuzfahrtschiffs zu beobachten. Sind alle Lampen an Bord gleichzeitig angeschaltet, dann sieht man nur eine große leuchtende Wand. Wenn jedoch nur immer eines der Fenster beleuchtet wird, dann kann man mit vielen nacheinander aufgenommenen Fotos sehr genau beobachten, wo sich die einzelnen Fenster befinden.

In biologischen Proben übernimmt das Licht zweier scharf fokussierter Laser die Rolle der Schiffsfenster. Damit kann man ganz gezielt Lichtpunkte von nur wenigen Nanometern Größe erzeugen. Einen solchen Lichtpunkt bildet das Mikroskop zwar weiterhin so ab wie einen hundert Nanometer großen Lichtfleck. Wo aber die Mitte dieses Lichtpunkts liegt, lässt sich sehr genau bestimmen. Rastert man nun die Probe mit den Nanometer-Beleuchtungspunkten ab, dann erhält man ein Bild mit der Auflösung des Beleuchtungspunktes, nicht mit der Auflösung des Mikroskops.

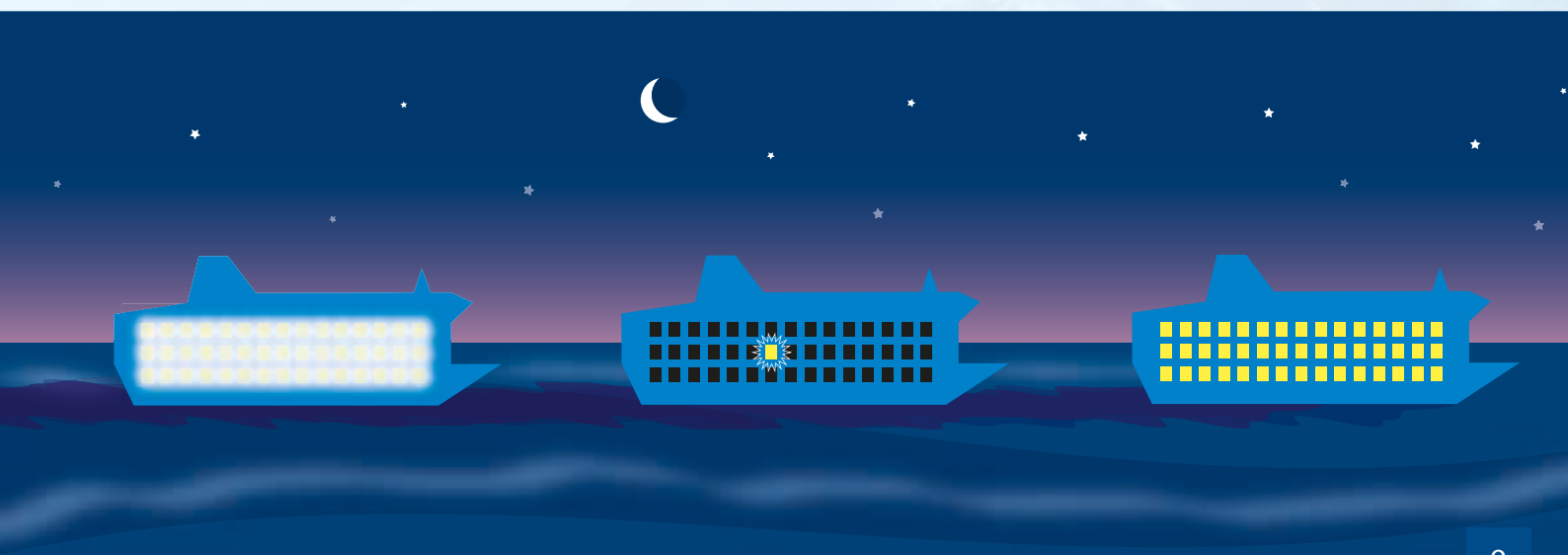
Die Methode, die vor 20 Jahren erstmals experimentell realisiert wurde, hat in der Zwischenzeit Eingang in viele Mikroskope gefunden. Dabei können ultrascharfe Abbildungen in einer Ebene erzeugt werden. Auch in der dritten Dimen-

sion von biologischen Proben gelingt es darüber hinaus, mit einer Auflösung von nur etwa einem Zehntel der Wellenlänge des Lichts bis zu 250 Bilder pro Sekunde zu erzeugen.

Das Prinzip des Abrasterns zur Bildgewinnung ist schon älter. Beim Rasterelektronenmikroskop etwa dient eine feine Nadelspitze als Sonde, von der aus Elektronen die Lücke zwischen Spitze und Probe überwinden können. Mithilfe der Quantenmechanik kann der Abstand zwischen Mikroskopspitze und Probe auf wenige Nanometer konstant gehalten werden. Um wieviel die Spitze in der Höhe korrigiert werden muss, wenn die Probe abgetastet wird, ergibt eine Höhenkarte des Objekts, auf der einzelne Atome sichtbar werden. Dass sogar einzelne Atome sichtbar werden, beruht auf dem quantenmechanischen Tunneleffekt: Von der Nadelspitze können Elektronen zur Probe wandern, obwohl sie dazu einen Bereich überwinden müssen, den sie eigentlich gar nicht erreichen können. Die Quantenphysik erlaubt aber solches „Durchtunneln“ verbotener Zonen. Die Höhe der Probenadel kann so besonders genau der abgetasteten Atomoberfläche angepasst werden, weil die Stärke dieses Tunneleffekts sehr empfindlich von der Größe der verbotenen Zone abhängt.



▼ Die Auflösungsgrenze überlisten: Die Lichtquellen der Schiffsfenster liegen zu nahe beieinander, um getrennt beobachtet werden zu können (links). Werden aber die einzelnen Kabinen nacheinander ein- und wieder ausgeschaltet (Mitte), dann ergibt sich durch Zusammenfügen der Aufnahmen ein detailliertes Bild eines Objekts (rechts).





KNOCHENBILD UND SPITZEN- FORSCHUNG

▲ 3,4 Kilometer lang unter dem Stadtrand Hamburgs verlaufen die Tunnelröhren für den leistungsfähigsten Röntgenlaser der Welt, den European XFEL. Er ist seit Herbst 2017 in Betrieb.

FEST VERBUNDEN MIT DEM BEGRIFF „RÖNTGEN“ SIND GEDANKEN AN KNOCHENBRÜCHE ODER ZAHNARTZBESUCHE. DORT WIRD MAN „GERÖNTGT“, ALSO MIT RÖNTGENSTRAHLUNG DURCHLEUCHTET. WAS GENAU IST EIGENTLICH DIESE RÖNTGENSTRAHLUNG, UND WARUM KANN MAN MIT IHR IN MENSCHEN HINEINSCHAUEN?

Licht, Radiowellen, Infrarotstrahlung, UV-Strahlung und Röntgenstrahlung sind physikalisch die exakt gleichen Phänomene – einzig in ihrer Wellenlänge unterscheiden sie sich voneinander. Wir Menschen sind nur mit Sensoren für einen kleinen Teil der möglichen Wellenlängen ausgestattet: für sichtbares Licht mit Wellenlängen von 400 bis 800 Nanometern (nm).

Kürzere Lichtwellenlängen kennen wir vom Sonnenbrand: Das schädliche UV-Licht schließt sich unterhalb von 400 nm an und reicht per Definition bis hinab zu 10 nm. Elektromagnetische Strahlung mit noch kürzerer Wellenlänge ist die Röntgenstrahlung. Elektromagnetische Strahlung ist nicht nur einfach eine Welle. Sie kommt nur in Paketen vor, den Photonen. Jedes einzelne dieser Lichtteilchen trägt dabei eine feste Energie mit sich, die ausschließlich von seiner Frequenz abhängt: je höher die Frequenz, desto höher die Energie eines einzelnen Photons.

Frequenz, Wellenlänge im Vakuum und Energie sind also drei Arten, Photonen zu beschreiben. Sie lassen sich ineinander umrechnen. Während bei langen Wellenlängen vor allem die Frequenz oder Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung genannt wird, bedienen sich Forschung und Technik

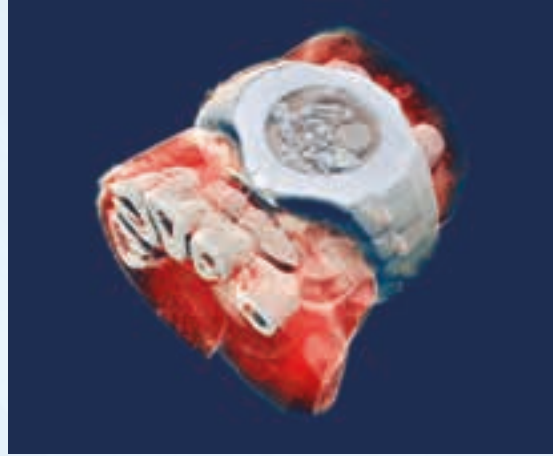


bei kürzeren Wellenlängen meist der Beschreibung in Energieeinheiten. Röntgenstrahlung hat dann pro Photon eine Energie von mehr als 100 Elektronenvolt (eV) – eine Energieeinheit, die speziell im Bereich von Atomen und Kernen verwendet wird. Ab etwa 5 eV ist die Strahlung gefährlich, da sie dann Elektronen aus den Atomen schlagen kann, die Atome „ionisiert“. Das ist der Photoeffekt, der Sonnenbrand und Hautkrebs durch UV-Licht verursacht und auch die medizinische Röntgenaufnahme nur mit Bedacht einzusetzen gebietet.

Chemische Photoplatten für Röntgenaufnahmen in Arztpraxen wurden seit Ende des letzten Jahrtausends durch digitale Detektoren abgelöst, die ähnlich wie die Chips in Smartphone und Digitalkamera die einfallenden Photonen direkt in elektrische Impulse umsetzen. Ganz wichtige Beiträge dazu kommen aus der Grundlagenforschung am Large Hadron Collider (LHC) am europäischen Forschungszentrum CERN in Genf. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziert mit rund 200 Millionen Euro pro Jahr zwanzig Prozent des CERN-Haushalts. Das macht Deutschland zum größten Geldgeber und sichert seine herausragende Position innerhalb der Teilchenphysik. Zusätzlich unterstützt das BMBF Projekte für den Bau und die Entwicklung von Detektorkomponenten der Experimente am LHC.

Bei den Teilchenkollisionen, die dort erforscht werden, entstehen zahlreiche neue Teilchen und energiereiche Photonen. Zu deren Vermessung wurden hochauflösende Pixeldetektoren auch für Röntgenphotonen entwickelt. Sie sind in ihrer neuesten Generation sogar in der Lage, einzelne Photonen

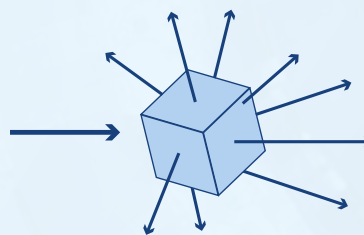
▼ Ein Messplatz für extreme Materiezustände am European XFEL. Hier können Druck, Temperatur oder elektrische Felder erzeugt werden, wie sie sonst nur im Innern von Planeten vorkommen.



◀ Mit Techniken, die am CERN entwickelt wurden, können dreidimensionale Farb-Röntgenbilder erzeugt werden, in denen die verschiedenen Gewebearten klar voneinander unterscheidbar sind.

zu erkennen. So kann man bei geringstmöglicher Strahlendosis in Echtzeit Röntgenaufnahmen machen – etwa um nach Herzinfarkten Katheter zu platzieren oder die Tumorerstörung mit Bestrahlung durch Ionen zu überwachen. Gesundes Gewebe in der Nachbarschaft des Tumors wird bei der Behandlung dadurch weniger in Mitleidenschaft gezogen.

Die kurze Wellenlänge der Röntgenstrahlung ist für eine weitere wichtige Anwendung entscheidend: für die Röntgenstrukturanalyse. Bei diesem Verfahren werden Röntgenstrahlen durch Materialien geschickt, wo sie an den Atomen gebeugt werden. Dabei entsteht ein ganz charakteristisches Bild von Punkten oder Ringen, aus denen sich die Anordnung der Atome in Kristallen und sogar komplizierten Biomolekülen zurückrechnen lässt. An modernen Röntgenquellen wie PETRA III oder dem European XFEL in Hamburg stehen viele Messplätze dafür zur Verfügung.



◀ Prinzip der Röntgenstrukturanalyse: Röntgenstrahlung wird durch die regelmäßige Anordnung der Atome im Kristall in bestimmte Richtungen gelenkt. Aus der Position der Punkte auf dem Detektor lässt sich die Atomanordnung rekonstruieren.



DAS INNERE VON PLANETEN SIMULIEREN

Wie verhält sich Materie bei den hohen Temperaturen und dem gigantischen Druck im Innern von Planeten?

Dieser Frage gehen Forscherinnen und Forscher nach, indem sie mit zwei aufeinander stehenden Diamanten eine kleine Materialprobe unter höchsten Druck bringen und dann noch erwärmen. Sie können dabei Zustände nachstellen, wie sie etwa im Erdkern oder im Kern anderer Planeten wie dem Mars vorherrschen. Mit Röntgenstrukturanalyse lässt sich dann herausfinden, wie sich die atomaren Anordnungen verhalten. Aus den Ergebnissen erhofft man sich zu verstehen, wie sich die Planeten entwickelt haben.



INFO

DIE BAUSTEINE DER WELT



▲ Gigantische Anlagen für die Forschung an kleinsten Teilchen: Am ATLAS-Detektor des Large Hadron Collider des CERN wurde 2012 das lange unentdeckte Higgs-Boson nachgewiesen.

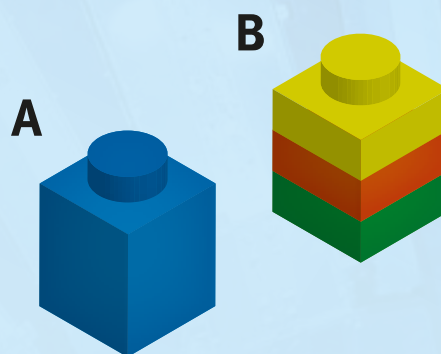
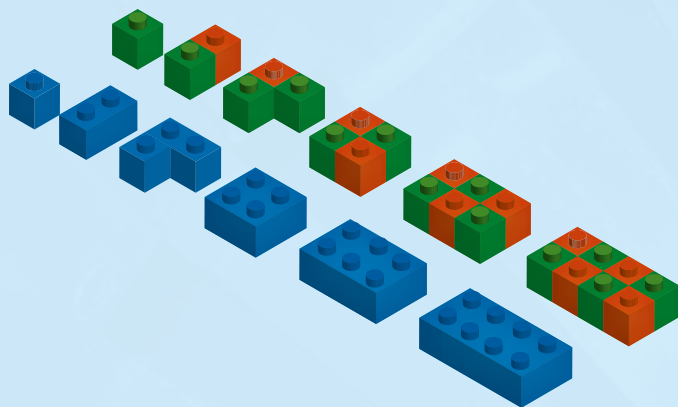
SEIT DER ANTIKE AHNEN DIE GELEHRTEN, DASS DIE WELT UM UNS HERUM AUS ATOMEN, UNTEILBAREN KLEINSTEN EINHEITEN DER MATERIE AUFGEBAUT IST. DOCH SCHON DIE ANORDNUNG DER VERSCHIEDENEN ATOMSORTEN IM BEKANNTEN PERIODENSYSTEM DER ELEMENTE LÄSST AUFHORCHEN: SIE SCHEINEN NACH EINEM BESTIMMTEN ORDNUNGSPRINZIP AUS NOCH KLEINEREN TEILCHEN ZU BESTEHEN.

Würde man statt Atomen kleine aus Legosteinen zusammengesetzte Objekte als „Atome“ annehmen und verschiedene solcher Objekte nach ihrem Gewicht oder der Anzahl ihrer Anknüpfungspunkte sortieren, dann ergäbe sich eine ähnliche Tabelle wie das Periodensystem der Elemente. Bei den Le-

gosteinen wäre uns sofort klar: Offensichtlich sind die Atome nicht unteilbar, sondern basieren auf „kleinsten“ Bestandteilen mit einem Noppen.

Und tatsächlich: Seit ungefähr hundert Jahren hat die Physik Schritt für Schritt herausgefunden, dass die 92 bekannten natürlich vorkommenden Atome aus nur drei verschiedenen Bausteinen aufgebaut sind: aus dem Atomkern aus Protonen und Neutronen sowie den Elektronen, die den Atomkern umgeben. Die Elektronen geben den Atomen ihre chemischen Eigenschaften, in den Protonen und Neutronen steckt der Großteil der Masse der Atome. Ob die Protonen und Neutronen aber die unteilbaren, kleinsten Einheiten der Atomkerne sind, war lange Zeit ungeklärt. Eine gezielte Methode, sie zu zerteilen, gibt es nicht. Das Vorhaben gleicht dem Versuch, einen 1-Noppen-Baustein, der aus drei 1-Noppen-Platten





▲ Atome kann man sich als Bausteine mit 1, 2, 3, 4, 6 oder 8 Noppen vorstellen. Sie sind aus mehreren 1-Noppen-Steinen nachbaubar. Der 1-Noppen-Stein ist die unteilbare Grundeinheit (A). Der 1-Noppen-Bau- stein kann aus drei 1-Noppen-Platten nachgebaut werden. Er entspricht einem Nukleon (Proton oder Neutron), das aus drei Quarks gebildet wird (B). Anders als beim Plastikbausatz können diese Quarks nie einzeln auftreten. Versucht man sie zu trennen, benötigt man so viel Energie, dass aus dieser Energie neue Urbausteine entstehen.

nachgebaut wurde, auseinanderzunehmen, wäh- rend man einen Fausthandschuh trägt: Ein Ding der Unmöglichkeit.

Genauso ging es den Physikerinnen und Physikern in der Mitte des vorigen Jahrhunderts: Sie ahnten, dass Proton und Neutron nicht die kleinsten Bau- steine sind, hatten aber keine „Pinzette“ und kein „Skalpell“, um sie festzuhalten und zu zerschnei- den. In Experimenten schossen die Physiker daher immer wieder ganze Pakete dieser Kernbausteine aufeinander, um ihre Stabilität zu testen. Sie fan- den reichlich Bruchstücke, die jedoch nicht nur einfach Teile der Protonen oder Neutronen waren, sondern ganz andere, neue Teilchen, teilweise so- gar schwerer als ihre Ausgangsteilchen.

Heute kennen wir nach vielen Messungen und theoretischen Überlegungen die Erklärung: Proto- nen und Neutronen bestehen aus kleineren Teil- chen, die „Quarks“ getauft wurden. Quarks sind nach jetzigem Kenntnisstand tatsächlich unteil- bare Elementarteilchen. Es gibt sie in sechs Sor- ten, eingeteilt in drei Familien. Proton und Neu- tron – und damit alle Atomkerne um uns herum – werden nur aus den Quarks der ersten Familie gebildet: Dem Up- und dem Down-Quark. Zwei Up- und ein Down-Quark ergeben ein Proton, zwei Down- und ein Up-Quark bilden das Neutron. Ku- rioserweise können die Quarks aber nicht allein vorkommen. Zwei von ihnen bilden ein Meson, drei Quarks ein Baryon.



TEILCHENPHYSIK STELLT SICH DER ÖFFENTLICHKEIT

Die Erkenntnisse über Quarks, Gluonen und Co. gehen oft weit über den Schulstoff hinaus. Trotzdem sind sie von großer Bedeutung für das Verständnis unserer Welt. Daher hat die Teilchenphysik die In- itiative KONTAKT ins Leben gerufen: „Kommunikation, Nachwuchsgewinnung und Teilhabe der Allgemeinheit an Erkenntnissen auf dem Gebiet der kleinsten Teilchen“.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler berichten darin über ihre Arbeit und ihre Ergebnisse: Sie gehen mit dem „Netzwerk Teil- chenwelt“ in Schulen, wo sie die Schülerinnen und Schüler mit Ori- ginaldaten von LHC oder IceCube (→ S. 26) experimentieren lassen. Darüber hinaus stellen sie Informationen auf der Website weltma- schine.de zur Verfügung und entwickeln gerade ein interaktives Ausstellungsmodul, das in Einkaufszentren und auf Marktplätzen in ganz Deutschland zu sehen sein wird. Auch mit Computerprogram- men, die Virtual-Reality-Möglichkeiten nutzen, soll der Zugang zur Teilchenphysik erleichtert werden. Besonders interessierten jungen Menschen werden in all diesen Aktivitäten die Möglichkeiten auf- gezeigt, sich selbst mit dem Thema zu befassen – vielleicht sogar einmal professionell in einem Studium der Physik.



ZWEI WEGE ZUR MASSE: HIGGS UND EINSTEIN

Es gibt zwei Ursachen für die Masse von Atomen, Atomkernen oder Kernbestandteilen. Die Elementarteilchen selbst, also die unteilbaren Quarks, Elektronen, Neutrinos und die für die schwache Wechselwirkung verantwortlichen Teilchen W und Z erhalten ihre Masse aus dem Higgs-Mechanismus. Sie stehen in Wechselwirkung mit dem Brout-Englert-Higgs-Feld (BEH-Feld), was sich durch einen komplizierten Mechanismus als Masse auswirkt. Dass das BEH-Feld existiert, wurde im Jahr 2012 mit der Entdeckung des Higgs-Teilchens bestätigt, das auch selbst wiederum aus dem Feld seine Masse bekommt.

Der weitaus größere Anteil der Masse wird jedoch aus der sogenannten Bindungsenergie erzeugt. Ein Proton, das aus zwei Up- und einem Down-Quark besteht, ist nämlich viel schwerer als die drei einzelnen Quarks. Die Quarks bringen es zusammen auf nur ein Hundertstel der Masse des Protons. Hier kommt jetzt Einsteins berühmte Formel $E=mc^2$ ins Spiel: Sie besagt, dass Masse und Energie zwei Seiten der gleichen Medaille sind. Im Proton ist reichlich Energie vorhanden, die aus der Bindung der Quarks aneinander herrührt. Sie manifestiert sich als Masse und ist für 99% der Masse der Protonen (und auch der Neutronen und damit praktisch der gesamten Materie) verantwortlich.

Bei Kernreaktionen wie der Fusion im Sonneninnern oder der Kernspaltung in Kernkraftwerken, aber auch in chemischen Reaktionen machen die Unterschiede der Bindungsenergien der beteiligten Stoffe den Energie-Gewinn aus: Tatsächlich sind bei allen Reaktionen, die Wärme erzeugen, die Massen der Endprodukte kleiner als die Massen der Ausgangsprodukte – die Differenz ergibt die Wärmeenergie aus Einsteins Formel.



Mit welchen Messgeräten die Physikerinnen und Physiker den kleinsten Bausteinen unserer Welt bisher auf die Schliche kamen und wie sie weiter nach Lücken in diesem Standardmodell suchen, ist beachtlich: Der weltweit leistungsfähigste Teilchenbeschleuniger (engl. „collider“ – wörtlich „Kollisionsmaschine“) ist der Large Hadron Collider (LHC) am europäischen Kernforschungszentrum CERN in Genf. Er besteht aus einem ringförmigen Tunnel mit 27 km Umfang, in dem in Vakuumrohren Pakete aus Protonen in gegenläufigen Richtungen praktisch auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden.

Stellt man sich die Protonen als kleinste Billardkugeln vor, dann kann bei einem frontalen Aufprall im LHC den Teilchen das 7500-fache der ihrer Masse entsprechenden Energie zugeführt

Quarks

up u	Masse: 2,3 MeV Ladung: 2/3	charm c	Masse: 1,3 GeV Ladung: 2/3	top t	Masse: 173,2 GeV Ladung: 2/3	Photon γ	Masse: 0 Ladung: 0	Higgs-Boson H	Masse: 126 GeV Ladung: 0
----------------	-------------------------------------	-------------------	-------------------------------------	-----------------	---------------------------------------	--------------------	-----------------------------	-------------------------	-----------------------------------

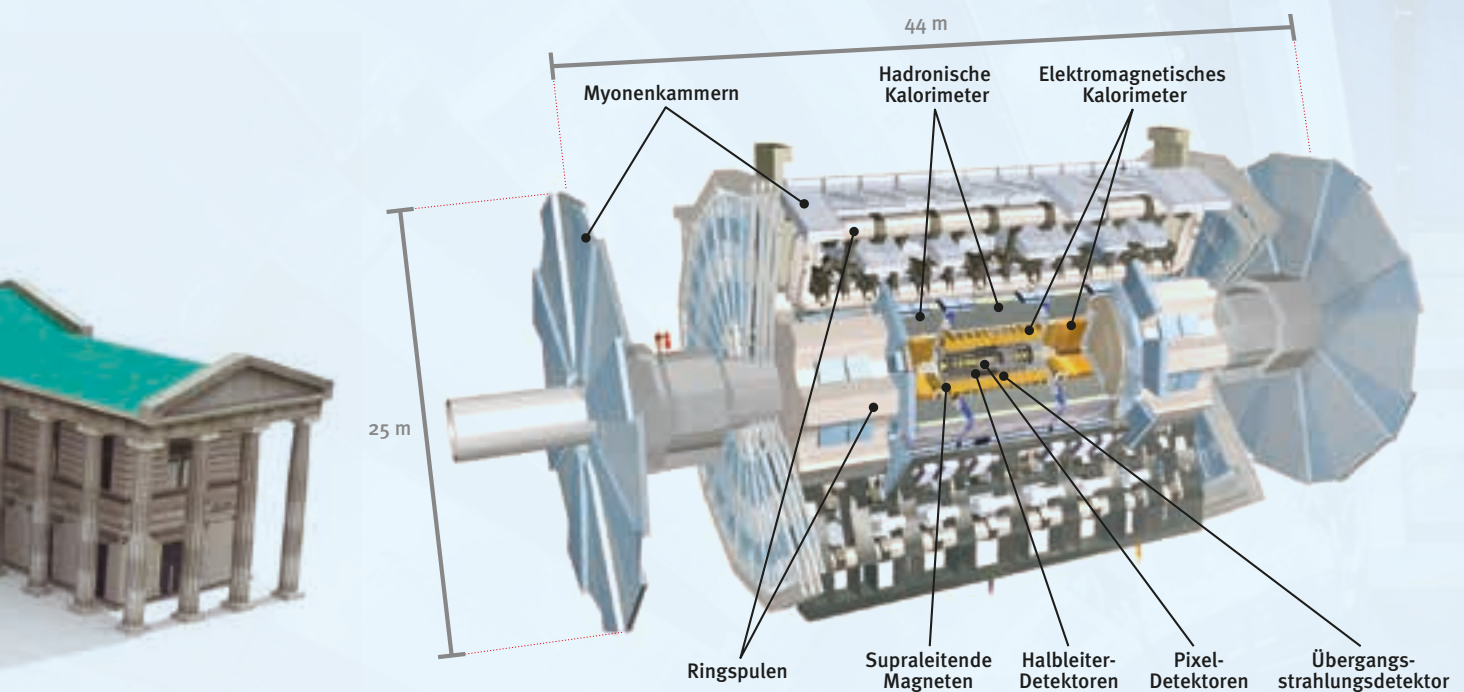
down d	Masse: 4,8 MeV Ladung: -1/3	strange s	Masse: 95 MeV Ladung: -1/3	bottom b	Masse: 4,2 GeV Ladung: -1/3	Gluon g	Masse: 0 Ladung: 0
------------------	--------------------------------------	---------------------	-------------------------------------	--------------------	--------------------------------------	-------------------	-----------------------------

Elektron-Neutrino ν _e	Masse: < 2 eV Ladung: 0	Myon-Neutrino ν _μ	Masse: < 2 eV Ladung: 0	Tau-Neutrino ν _τ	Masse: < 2 eV Ladung: 0	Z-Boson Z ⁰	Masse: 91,2 GeV Ladung: 0
--	----------------------------------	--	----------------------------------	---------------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	------------------------------------

Elektron e	Masse: 0,51 MeV Ladung: -1	Myon μ	Masse: 105,7 MeV Ladung: -1	Tau τ	Masse: 1,78 GeV Ladung: -1	W-Boson W [±]	Masse: 80,4 GeV Ladung: ±1
----------------------	-------------------------------------	------------------	--------------------------------------	-----------------	-------------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------

Leptonen

Austauschteilchen



werden (→ Info-Box S. 14). Diese Energie kann im Kollisionsspunkt zu zahlreichen Wechselwirkungen zwischen Quarks und Austauschpartikeln führen, die einen Trümmerregen erzeugen: Dies sind entweder Elementarteilchen oder zusammengesetzte Teilchen aus allen möglichen Quarks. Sie spritzen vom Kollisionsspunkt in verschiedene Richtungen davon. Einige der Produkte sind sehr kurzlebig, sodass sie sich schon nach kurzer Flugstrecke in andere Teilchen umwandeln, andere sind stabil und können noch weit weg vom Punkt des Zusammentreffens aufgefunden werden.

Um nun mit diesen Experimenten den Aufbau der Materie zu entschlüsseln, müssen die Produkte der Kollisionen akribisch genau vermessen werden. Dazu wurden am LHC große dreidimensionale Kameras um die Kollisionsspunkte gebaut: ATLAS und CMS. Beide bestehen aus verschiedenen Schichten von Teilchendetektoren, die sich wie Zwiebelschalen um den Interaktionspunkt legen. Die innersten Schichten sind dabei besonders darauf ausgelegt, die kurzlebigen Produkte zu erkennen und ihre Positionen ganz genau zu bestimmen. Dazu dienen Pixeldetektoren – im Prinzip hochpräzise und großflächige Digitalkameras, deren Pixel durch die hochenergetischen Teilchen aktiviert werden. Anders als die Photonen (Licht-

▲ Größer als das Brandenburger Tor ist der Detektor ATLAS, der sich in einer künstlichen Höhle in etwa hundert Metern Tiefe an einem der Kollisionsspunkte der Teilchenstrahlen im LHC befindet. In der Mitte treffen Protonen mit 14 TeV (1 Terraelektronenvolt = 1.000.000.000.000 eV) Energie aufeinander. ATLAS ist darauf optimiert, die dabei entstehenden Produkte zu identifizieren und zu vermessen. 40 Millionen Kollisionen pro Sekunde erzeugen dabei Daten. Nach einer ersten Filterung bleiben an ATLAS rund 75.000 Ereignisse pro Sekunde übrig, die genauer analysiert werden.

teilchen) in einer normalen Digitalkamera durchschlagen die Teilchen allerdings den Detektor und können daher auch noch die nächsten Schichten erreichen und dort weiter untersucht werden.

Weiter außen befinden sich große Platten, die Kalorimeter, mit denen möglichst viel der Energie der Bruchstücke eingesammelt und vermessen wird. Eingebettet ist der gesamte Sensor in ein starkes Magnetfeld. Dadurch werden die elektrisch geladenen Teilchen aus der Kollision auf eine Kreisbahn gezwungen. Aus der Bahnkrümmung lässt sich direkt auf das Verhältnis von elektrischer Ladung zu Energie schließen, eine ganz wichtige Größe zur Identifikation der Bruchstücke.

◀ Das Standardmodell baut auf 12 verschiedenen Elementarteilchen, dem Higgs-Teilchen sowie vier Austauschpartikeln auf, die die Kräfte zwischen den Teilchen erzeugen. Die Einheit eV/c² (Elektronenvolt geteilt durch Lichtgeschwindigkeit im Quadrat) ist die Masseinheit in der Elementarteilchenphysik. In „Kilogramm“ wären die Zahlen sonst unhandlich klein. MeV sind Millionen eV, GeV sind Milliarden eV.

ATLAS und der ähnlich aufgebaute Detektor CMS ergänzen sich gegenseitig. Dadurch, dass sie beide gleichzeitig messen, stellen sie sicher, dass etwaige Messfehler in einem Detektor erkannt werden und neu entdeckte Teilchen wirklich neu sind. Der bisher größte Erfolg der gemeinsamen Anstrengungen war die Entdeckung des Higgs-Teilchens im Jahr 2012, die zur Vergabe des Nobelpreises 2014 an Peter Higgs und François Englert geführt hat.

VOM QUARK ZUM KOSMOS



Atomkern



Atom

Sichtbares Licht

Erbinformationen



Eizelle

Sandkorn

Gegenstände des Alltags



Hochhaus

10^{-18}m

10^{-15}m

10^{-12}m

10^{-9}m

$1\mu\text{m}$

1mm

1m

1km

10^{-15}m Der einfachste **Atomkern**, das Proton, besteht aus drei Quarks. Da Quarks nicht einzeln vorkommen, kann man ihnen keine Größe zuschreiben. Das Proton besitzt einen Durchmesser von $1,7 \cdot 10^{-15}\text{m}$. Der Durchmesser ist dabei – vereinfacht gesagt – der Bereich, in dem die drei Quarks des Protons sich hin- und herbewegen können. Einen harten Rand wie etwa eine Stahlkugel besitzen Atomkerne nicht. (→ S. 12–15)

10^{-10}m Auch bei einem Atom sollte man sich keine Kügelchen mit einem festen Rand vorstellen. Als Größe eines **Atoms** gibt man meistens an, wie weit zwei gleichartige Atome voneinander entfernt sind, wenn sie eine chemische Bindung eingehen. Die kleinsten Atome wie Wasserstoff oder Helium sind dann rund 60 Picometer, also $6 \cdot 10^{-11}\text{m}$ groß, größere Atome mit vielen Elektronen rund um den Kern sind hundert Mal größer. (→ S. 12–15)

10^{-7}m **Sichtbares Licht** hat eine Wellenlänge von 400–800 Nanometern. Die kleinsten Strukturen, die mit Licht beobachtet werden können, sind daher ungefähr in dieser Größe. Kleinere Dinge nennt man daher auch „submikroskopisch“. (→ S. 8–9)

$1\mu\text{m}$ **Erbinformationen** menschlicher Zellen sind in den langkettigen DNA-Molekülen kodiert. Diese sind so aufgewickelt, dass sie einen Mikrometer groß sind. Würde man sie auseinanderziehen, ergäbe sich eine Doppelhelix mit 2 nm Breite und rund 2 m Länge!

$0,1\text{mm}$ Die größte Zelle des menschlichen Körpers ist die **Eizelle**. Sie hat einen Durchmesser von 0,15 mm und ist damit sogar mit bloßem Auge gerade so zu erkennen.

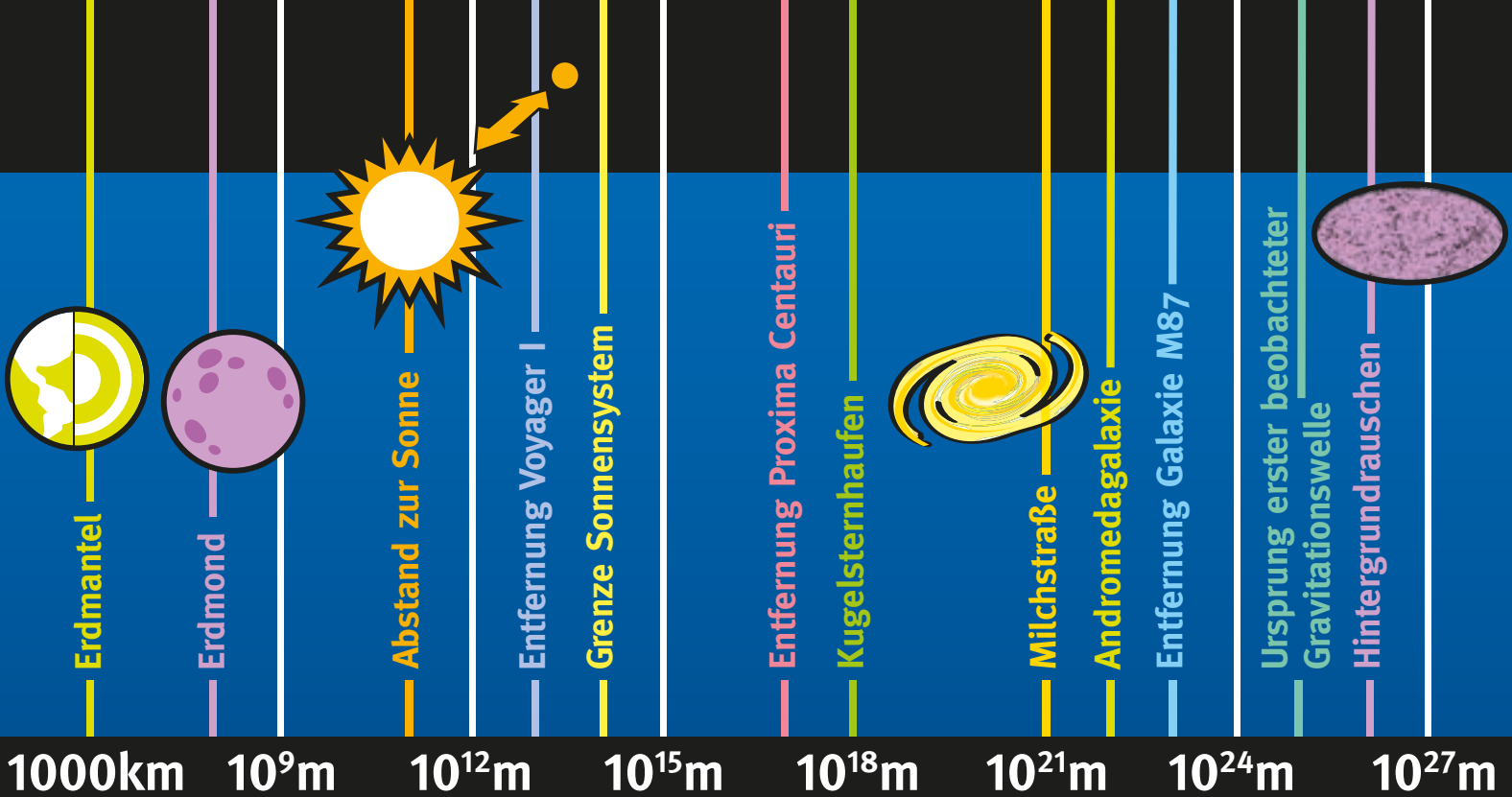
1mm Das Material, aus dem der Erdboden besteht, ist aus vielen kleinen Körnern zusammengesetzt. **Sandkörner** sind bis ungefähr 2 mm groß, größere Steinchen nennt man Kies. (→ S. 28–30)

1m Die meisten **Gegenstände des Alltags** sind zwischen einem Zentimeter und einigen Metern groß.

1000m Die größten, von Menschen errichteten Objekte, sind in der Größenordnung von Kilometern: Brücken, Schiffe oder **Hochhäuser**.

1000km Die Kontinente der Erde bewegen sich auf Kontinentalplatten mit wenigen Millimetern bis Zentimetern pro Jahr über den flüssigen Erdmantel. Der **Erdmantel** reicht von einer Tiefe von rund 35 bis zu etwa 2900 Kilometern, darunter befindet sich der Erdkern. (→ S. 28–30)

10^8m Der **Erdmond** ist im Mittel 384.000 km von der Erde entfernt, etwas mehr als eine Lichtsekunde.



10^{11} m Der Abstand Erde–Sonne wird „Astronomische Einheit“ genannt und beträgt 149,6 Millionen Kilometer. Das Licht braucht für diese Strecke 8 Minuten.

10^{13} m Die Raumsonde **Voyager 1** ist die am weitesten ins All vorgedrungene Weltraummission der Menschheit. Im September 2019 ist sie 147 Astronomische Einheiten oder 22 Milliarden Kilometer von der Sonne entfernt – das sind etwas mehr als 20 Lichtstunden.

10^{14} m Die äußersten Objekte, die zu unserem **Sonnensystem** gehören, sind bis zu 1000 Astronomische Einheiten von der Sonne entfernt. Das Licht der Sonne ist bis dorthin schon fast eine Woche unterwegs.

10^{16} m Der nächstgelegene Stern zu unserem Sonnensystem ist **Proxima Centauri** in 4,22 Lichtjahren Entfernung. Seit 2016 weiß man, dass um ihn ein Planet kreist, der verhältnismäßig erdähnlich ist. Ein Lichtjahr ist die Strecke, die das Licht in einem Jahr zurücklegt. Das sind $9,461 \cdot 10^{15}$ oder rund 10^{16} m .

10^{18} m **Kugelsternhaufen** – Ansammlungen von einigen hunderttausend Sternen in der Umgebung von Galaxien – haben einen Durchmesser von einigen hundert Lichtjahren.

10^{18} m Ganze Galaxien wie unsere **Milchstraße** bringen es auf einen Durchmesser von etwa 200.000 Lichtjahren oder $2 \cdot 10^{21}\text{ m}$.

10^{22} m Etwas größer noch als unsere Milchstraße ist der Nachbar „**Andromedagalaxie**“ in 2,5 Millionen Lichtjahren Entfernung.

10^{23} m Die **Galaxie M87** ist 55 Millionen Lichtjahre von uns entfernt. In ihrem Zentrum befindet sich das erste direkt sichtbar gemachte Schwarze Loch. (→ S. 24–25)

10^{23} m Die erste direkt beobachtete Gravitationswelle entstammte der **Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher** in 1,3 Milliarden Lichtjahren Entfernung. (→ S. 26–27)

10^{26} m Die Kosmische **Hintergrundstrahlung** kommt aus der entferntesten sichtbaren Region des Universums in $4 \cdot 10^{26}\text{ m}$ Entfernung. (→ S. 18–21)

10^{-15} – WIESO MIT EXPONENT?

Im alltäglichen Längenbereich nutzen wir verschiedene Vorsätze an die Längeneinheit Meter: Ein Kilometer (1 km) sind eintausend Meter, ein Zentimeter (1 cm) sind 0,01 m. Um jedoch noch größere oder kleinere Längen bequem schreiben

zu können, bedient man sich der Exponentialschreibweise. 1000 m sind $10 \cdot 10 \cdot 10$ oder kurz 10^3 m , 10^9 m sind entsprechend 1.000.000.000 m oder eine Milliarde Meter. Im Kleinen Bereich sind $10^{-3}\text{ m} = 1\text{ m}/(10 \cdot 10 \cdot 10) = 0,001\text{ m}$ oder 1 mm. Vereinfacht gesagt, gibt der Exponent die Anzahl der Nullen an.

UNIVERSUM – IN ALLEN WELLENLÄNGEN

▲ Bunt es Universum: Damit auch Wellenlängenbereiche sichtbar werden, die unserem Auge eigentlich verborgen blieben, werden Aufnahmen wie diese von unserer Milchstraße eingefärbt. Hier von oben nach unten: Gammastrahlung, Röntgenstrahlung, Infrarotstrahlung und Radiowellen.



MIT UNSEREN AUGEN UND EINFACHEN FOTOGRAFISCHEN AUFNAHMEN KÖNNEN WIR DAS UNIVERSUM NUR IM WELLENLÄNGENBEREICH VON 400 BIS 800 NANOMETERN BETRACHTEN. NICHT DER SPEKTAKULÄRSTE BEREICH DES ELEKTROMAGNETISCHEN SPEKTRUMS, WIE SICH ZEIGT.

Im sichtbaren Licht zeigt der Nachthimmel hauptsächlich Sterne – mit lichtsammelnden Teleskopen sogar Abermilliarden. Doch der direkte Blick auf viel gewaltigere Prozesse im Weltall wurde erst erschlossen, als andere Wellenlängenbereiche beobachtbar wurden. Die Messgeräte können nämlich elektromagnetische Strahlung längerer oder kürzerer Wellenlänge erfassen. Damit wir sie sehen können, werden sie in Abbildungen

aus Licht umgewandelt – am Computer oder auf Papier. Die Farbwahl ist dabei weitgehend eine Geschmacksfrage.

Licht mit kürzester Wellenlänge – also Photonen mit höchster Energie (→ S. 10) – werden durch die Erdatmosphäre abgeschirmt. Erst aus dem Weltall lassen sich die Gammastrahlen erfassen. Mit Messungen über einen Zeitraum von fünf Jahren kartierte das Weltraumteleskop Fermi den Gammahimmel bei Energien über 1 GeV je Photon. Auffälligster Bestandteil ist die helle Linie entlang der Ebene unserer Milchstraße. Die hochenergetischen Photonen kommen von elektrisch geladenen Teilchen, die mehrfach in den expandierenden Gaswolken von Sternexplosionen beschleunigt wurden. Außerhalb dieser Zone dominieren zahlreiche punktförmige Strahlungsquellen das Bild.

Über die Hälfte von ihnen sind aktive Galaxienkerne, in denen Materie auf ein supermassereiches Schwarzes Loch stürzt (→ S. 25). Ein Teil der Materie entgeht dem schwarzen Loch und fliegt mit hoher Energie als gerichteter Strahl in zwei entgegengesetzte Richtungen davon. Bei diesen Strahlungsquellen, den Blazaren (→ S. 27), befinden wir uns genau in Richtung eines solchen Strahls. Weitere Objekte, die wir hier finden, sind Pulsare. Das sind Reste massereicher Sterne nach ihrer finalen Explosion: Neutronensterne. Sie rotieren sehr schnell und schleudern Elektronen von ihrer Oberfläche, die durch ihre Magnetfeldlinien geführt werden und so gerichtetes Licht vom Radiobereich bis in den GeV-Bereich abstrahlen.

Etwas weniger energiereich sind die Röntgenphotonen, die mit dem deutschen Röntgenteleskop ROSAT in den 1990er-Jahren am ganzen Himmel systematisch beobachtet wurden. Da auch Röntgenstrahlung nicht durch unsere Erdatmosphäre kommt, müssen Röntgenteleskope als Satelliten die Erde umkreisen. Am 13. Juli 2019 startete eROSITA an Bord eines russisch-deutschen Satelliten ins All. Das Teleskop wird erneut eine Himmelsdurchmusterung durchführen – fast 30 Jahre nach ROSAT und mit deutlich verbesserten Teleskopen. Im Röntgenlicht sind heiße Objekte besonders gut zu erkennen: Materie, die in Doppelsternen von einem Stern auf den anderen strömt und dabei gelegentlich zu Nuklearexplosionen führt (Novae), aufgeheiztes Gas in Galaxienhaufen oder Supernova-Überreste. Das hellste Objekt ist der Vela-Pulsar, ein Supernova-Überrest, der auch im Gammabereich schon gut zu erkennen ist.

Im optischen Bereich sehen wir neben Sternen Staubwolken, die das Sternenlicht blockieren. Besonders in Richtung Zentrum der Milchstraße blockiert interstellarer Staub die Sicht, sodass wir optisch keine Chance haben, in die Mitte der Galaxis zu blicken. Bei etwas längeren Wellenlängen wird der Staub fast überall durchsichtig. Das Infrarotbild zeigt, dass wir in der Ebene einer flachen Sternscheibe leben, die zu ihrer Mitte hin eine kugelförmige Verdickung aufweist.

Gehen wir zu noch größeren Wellenlängen, dem fernen Infrarot, müssen wir wieder die Erdoberfläche verlassen. In den Daten des europäischen Planck-Satelliten sind Emissionen aus unserer Milchstraße nicht sichtbar, dafür aber weit entfernte Mikrowellensignale. Was wir hier beobachten, ist tatsächlich das älteste Licht des Universums!



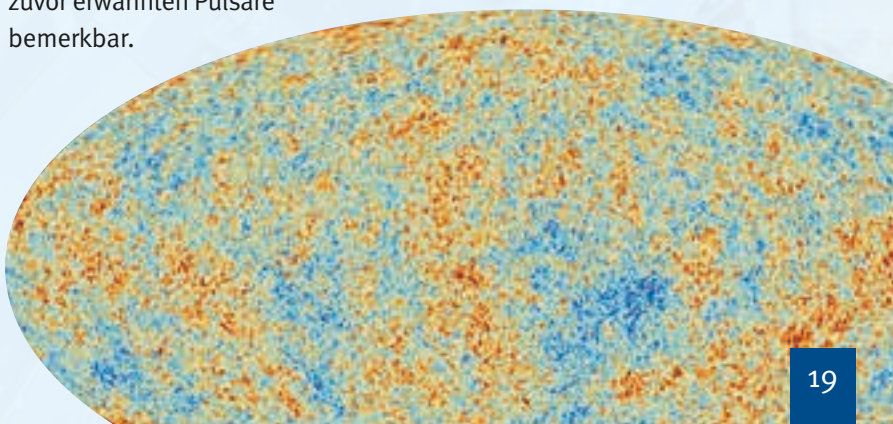
▲ In klaren Nächten lassen sich auch mit bloßem Auge Tausende Sterne am Himmel ausmachen. Mit passender Technik offenbaren sich dort noch weit gewaltigere Vorgänge.

Etwa 380.000 Jahre nach dem Urknall vor 13,8 Milliarden Jahren kühlte das sehr junge Universum soweit ab, dass die Elektronen sich an die Protonen binden konnten – der Kosmos wurde durchsichtig. Die Photonen aus dieser Zeit sind durch die Ausdehnung des Universums stark zu größeren Wellenlängen verschoben (Dopplereffekt), was auch als Abkühlung interpretiert werden kann: Wir sehen das Licht einer fast gleichförmigen Strahlung von 3 Kelvin (-270°C) Temperatur. Die Abweichungen (im Bild unten durch die Farbgebung verdeutlicht) erlauben Rückschlüsse auf die Zusammensetzung des ganzen Universums.

Noch langwelligere Strahlung nutzen die Radioteleskope. Der Radiohimmel bei der Frequenz 408 MHz (Megahertz – Millionen Schwingungen pro Sekunde) zeigt die Verteilung von Materie und Magnetfeldern, Überreste von Sternexplosionen und Rohmaterial neuer Sterne. Wasserstoff entstand beim Urknall und wird in Sternen zu anderen Elementen fusioniert – allerdings nicht vollständig. Wenn ein sterbender Stern expandiert oder explodiert, wird der Wasserstoff wieder an das All abgegeben. Die sternreiche Ebene der Milchstraße ist daher gut im Radiolicht zu erkennen, aber auch zahlreiche kreisförmige Strukturen, die auf Sternexplosionen in unserer Nachbarschaft zurückgehen. In anderen Radiofrequenzen machen sich die zuvor erwähnten Pulsare bemerkbar.



▼ Die Karte des europäischen Forschungs-satelliten Planck zeigt die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung, die ihren Ursprung 380.000 Jahre nach dem Urknall hatte. Aus der Form kleiner Schwankungen lässt sich ableiten, wie das Universum zusammengesetzt ist: Es besteht zu 5 Prozent aus gewöhnlicher Materie, zu 27 Prozent aus Dunkler Materie und zu 68 Prozent aus Dunkler Energie, die das Universum expandieren lässt.



BUNTER ALS DAS AUGE SIEHT

WENN MAN IN EINER KLAREN, DUNKLEN NACHT – FERNAB DER STÖRENDE LICHTER EINER STADT – DEN BLICK AUF DEN STERNENHIMMEL RICHTET, DANN ERKENNT MAN NICHT NUR WEIßE LICHTPUNKTE UNTERSCHIEDLICHER HELLIGKEIT, SONDERN KANN SOGAR EINIGE ETWAS RÖTLICHER ODER BLÄULICHER LEUCHTENDE STERNE AUSMACHEN.

Im Sternbild Orion, das im Winter hoch über dem Südhorizont steht, findet sich links oben der deutlich rot leuchtende Stern Beteigeuze. Seine rote Farbe zeigt an, dass er verhältnismäßig kühl ist. Seine sichtbare Oberfläche hat eine Temperatur von 3720 °C. Zum Vergleich: Das Licht der Sonne kommt aus einem Plasma mit 6050 °C. Andere Sterne bringen es bis zu einigen Zehntau-

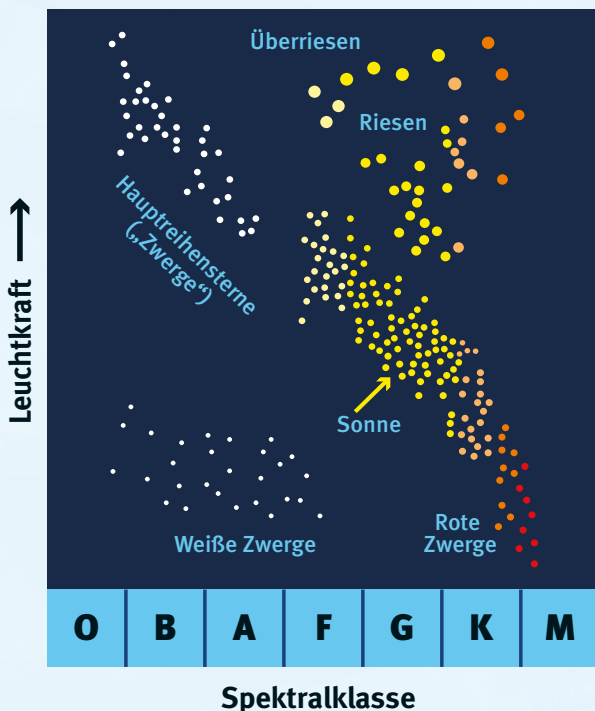
send Grad an ihrer Oberfläche – so ist der rechte Gürtelstern des Orion – Mintaka – rund 30.000 Grad heiß. In ihrem Innern sind die Sterne übrigens weit heißer. Die Kernfusionsreaktionen, die für das Sternenlicht sorgen, finden bei dutzenden bis hunderten Millionen Grad statt.

Doch nicht nur die Temperatur eines Sterns bestimmt, welches Licht auf der Erde von den Teleskopen aufgefangen wird. Die Atome und Moleküle in den äußeren Schichten der Sterne prägen dem Licht ihre Signatur auf. Je nach Zusammensetzung der Sternatmosphäre, Temperatur, Druck oder Rotationsgeschwindigkeit fehlen bei verschiedenen Wellenlängen des Spektrums breitere oder schmalere Bereiche des Lichts. Vor etwas mehr als 200 Jahren entdeckten William Hyde Wollaston und Josef Fraunhofer unabhängig voneinander diese Linien erstmals im Spektrum des uns nächsten Sterns – der Sonne.



◀ Die Farben der Sterne geben einen Hinweis auf ihre Temperatur. Wenn man das Licht in seine Bestandteile zerlegt, lässt sich auch viel über ihre Masse, ihre Magnetfelder, ihre Rotationsgeschwindigkeit und andere Eigenarten lernen.

▼ Das Hertzsprung-Russel-Diagramm. Trägt man die Leuchtkraft (Helligkeit eines Sterns) über der Spektralklasse (Farbe) auf, findet man die meisten Sterne auf der „Hauptreihe“. Am Ende ihrer Lebenszeit verlassen die Sterne die Hauptreihe und werden zunächst „Riesen“ und „Überriesen“, bevor sie explodieren und als „Weiße Zwerge“ oder „Neutronensterne“ nur noch schwach leuchten. Die allerschwersten werden zu einem Schwarzen Loch.



Die Analyse von Sternspektren ist eine der wichtigsten Methoden der Astrophysik. Um möglichst rauschfreie und hochauflösende Spektren zu gewinnen, werden immer neue Spektrographen für die größten Teleskope der Welt entwickelt. Und auch die Teleskope selbst werden immer größer. Die Europäische Südsternwarte ESO betreibt seit Anfang der 1990er Jahre die vier 8-m-Teleskope des „Very Large Telescope“ (engl. „sehr großes Teleskop“) auf einem Berg in der Atacama-Wüste in Chile. Die Größenangabe gibt dabei den Durchmesser des Hauptspiegels an – das Lichtsammelvermögen ist nämlich oft ein weit wichtigerer Maßstab für die Leistungsfähigkeit eines Teleskops als seine Vergrößerung. Mit den 8-m-Spiegeln können Spektren von Sternen gewonnen werden, die in den größten Teleskopen der Vorgängergeneration gerade eben als Lichtpunkte auf fotografischen Aufnahmen zu erkennen waren.



DER VERLUST DER NACHT

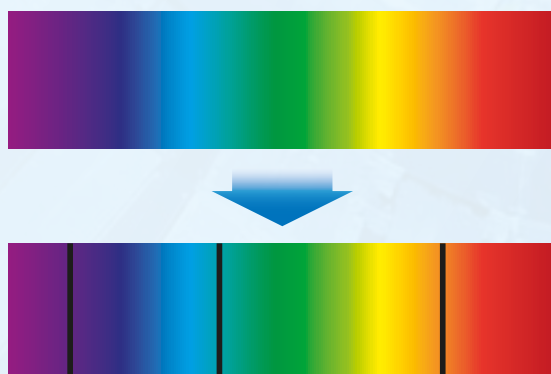
Einen wirklich dunklen Nachthimmel zu sehen, ist für Stadtbewohner schwierig. Straßenbeleuchtung, angestrahlte Kirchen oder öffentliche Gebäude und leuchtstarke Lichtreklame erzeugen eine Glocke von Störlicht, die sich bis hoch in die oberen Schichten der Atmosphäre ausbreitet. Vom hellen Himmelshintergrund können sich schwächere Himmelsobjekte nicht mehr abheben und werden so unsichtbar. Die Milchstraße etwa, das helle Band der hundert Millionen Sterne unserer Heimatgalaxie, kann man nur noch fernab der großen Städte erkennen.

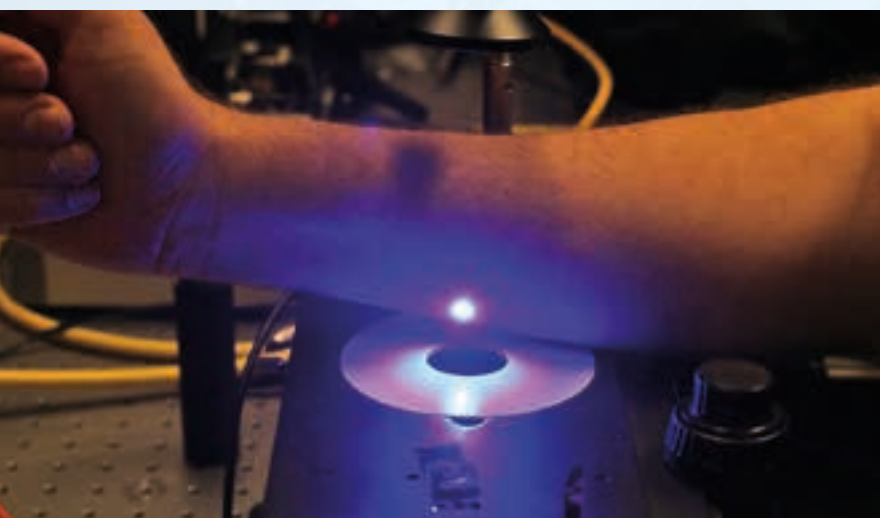
Doch nicht nur die astronomische Beobachtung wird durch den Verlust der Dunkelheit erschwert. Die Forschung zeigt, dass der lichtgesteuerte Biorhythmus vieler Tierarten und des Menschen durch die fehlende Nacht aus dem Tritt gerät. Krankheiten wie Bluthochdruck oder Depression werden damit in Verbindung gebracht.

Am Forschungsprojekt „Der Verlust der Nacht“ am Helmholtz-Zentrum Potsdam können sich auch Laien mit ihren Beobachtungen beteiligen.



▼ Das von der Oberfläche eines Sterns ausgesendete Licht beinhaltet alle Farben, die in ihrer Intensität nur von der Temperatur abhängig sind (oben). Diese Schwarzkörperstrahlung wird beim Durchgang durch die Sternatmosphäre stark verändert. Hier werden zum Beispiel Wasserstoffatome angeregt. Diese Wellenlängen fehlen dann im Spektrum des Sterns und sind als dunkle Absorptionslinien sichtbar (unten).

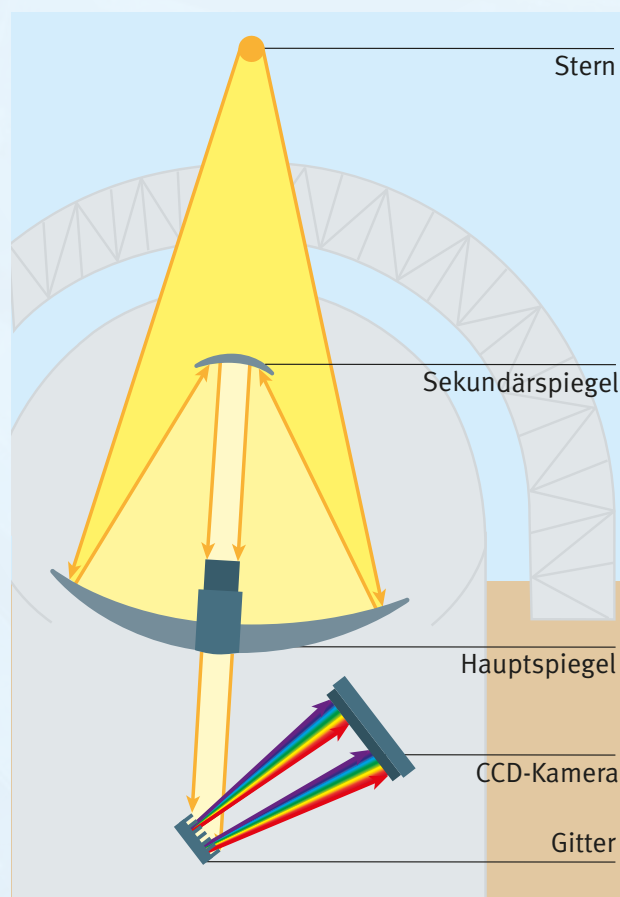




◀ Bei 38 Metern Spiegeldurchmesser des ELT ist es unerlässlich, die Form des Hauptspiegels aktiv anzupassen. Dazu werden mit Laserstrahlen künstliche Sterne in die Atmosphäre projiziert. Mit ihrer Hilfe wird genau berechnet, wie die 798 Einzelspiegel positioniert werden müssen, damit sogar atmosphärische Störungen aus dem Bild entfernt werden können.

Doch mit acht Metern Spiegeldurchmesser ist nicht Schluss: Zurzeit wird unweit des VLT das „Extremely Large Telescope“ (ELT, „extrem großes Teleskop“) errichtet, dessen Hauptspiegel 38 Meter durchmessen wird. Damit sammelt das ELT ab Beobachtungsbeginn voraussichtlich von Jahr 2024 an zwanzig Mal so viel Licht wie eines der VLT-Teleskope. Das ELT wird zu Beginn mit einem Spektrographen, einer Kamera und einem Kombiinstrument bestückt sein. Die Beobachtungsziele des ELT werden Planeten und andere Sterne sein, von denen man hofft, die Zusammensetzung ihrer Atmosphären zu bestimmen. Außerdem werden die ersten Galaxien im Universum gesucht, um die Entstehung der Sternensinseln im Weltall zu verstehen.

▼ Prinzip des Spektrographen: Möglichst viel Sternenlicht wird vom Hauptspiegel auf ein Gitter gelenkt. Das Gitter zerlegt das Licht in verschiedene Wellenlängen. Das so aufgesplante Licht wird mit einer hochauflösenden CCD-Kamera aufgenommen.



VOM TELESKOP IN DIE MEDIZINTECHNIK

Am Teleskop VISTA der ESO, nahe dem VLT, wird zurzeit einer der leistungsstärksten Spektrographen der Welt entwickelt: 4MOST (4-Meter Multi-Object Spectrographic Telescope). 4MOST kann mit Hilfe von Glasfasern das Licht von 2436 astronomischen Objekten gleichzeitig in einen Spektralapparat leiten. Dort wird das Licht dann nach seinen Wellenlängen sortiert. Mit 4MOST sollen Millionen Objekte des gesamten Südhimmels in wenigen Jahren spektroskopiert werden – die Daten werden danach öffentlich zur Verfügung stehen. Dadurch, dass so viele Objekte gleichzeitig beobachtet werden können, potenziert sich die wertvolle Teleskopzeit. Pro Jahr werden so fünf Millionen Stunden Beobachtungszeit zusammenkommen!

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Potsdam, die die Glasfasern für 4MOST und das Vorgängerinstrument MUSE am VLT entwickeln, haben früh erkannt, dass sich mit dieser Methode auch ganz andere Aufgaben lösen lassen. Auch in der Medizin werden nämlich spektrographische Aufnahmen verwendet, um etwa Tumorgewebe von gesundem Gewebe unterscheiden zu können. Bisher jedoch konnte immer nur ein Spektrum von einem Punkt aufgenommen werden. Mit einem zweidimensionalen Spektrographen der Potsdamer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler kann nun ein „spektrographisches Foto“ einer unter Tumorverdacht stehenden Hautpartie aufgenommen werden, das die genauen Umrisse der kritischen Bereiche erkennen lässt.

DURCHBLICK IM FREQUENZ- WIRRWARR



WARUM RAUSCHT EIN KURZWELLEN-RADIO, WENN ES NICHT AUF DIE FREQUENZ EINES RUNDFUNKSENDERS EINGESTELLT IST? KOMMT DIESES STÖRGERÄUSCH AUS DER ELEKTRONIK DER RADIOEMPFÄNGERS? NICHT NUR!

Das Weltall ist eine Quelle von Radiostrahlung, die Rauschen, Knacken und Brummen in einer ganzen Bandbreite von Radiofrequenzen aussendet. Vor noch nicht einmal hundert Jahren, im Jahr 1932, suchte Karl Guthe Jansky nach Störsignalen im Kurzwellenbereich bei einer Wellenlänge von 14,5 Metern. Das entspricht einer Frequenz von 20,7 Megahertz. Und tatsächlich machte er eine Quelle aus, die sich bei genauer Analyse als ein Objekt außerhalb des Sonnensystems herausstellte. Heute wissen wir: Die kräftigen Radio-

signale, die er entdeckte, kommen aus dem Zentrum unserer Milchstraße und werden von einem Schwarzen Loch verursacht.

Radiostrahlung aus dem Weltall kann die Erdatmosphäre nur in einem Frequenzbereich von 10 Megahertz bis 100 Gigahertz durchdringen. Niedrigere Frequenzen werden an elektrisch geladenen Teilchen in der Ionosphäre reflektiert, während höhere Frequenzen von der Erdatmosphäre absorbiert, also aufgenommen werden. In dem sogenannten „Radiofenster“ zwischen den natürlichen Filtern lassen sich eine ganze Reihe von kosmischen Phänomenen beobachten. Allerdings nutzt unsere technische Zivilisation immer mehr der Frequenzbereiche, sodass die astronomischen Beobachtungen immer stärker gestört werden: etwa durch WLAN- oder Mobilfunkbetrieb, ganz so, wie die optische Astronomie durch

▲ ALMA, das „Atacama Large Millimeter/Sub-millimeter Array“ besteht aus 66 Antennen, die je nach Anwendungszweck an unterschiedlichen Positionen auf einem Hochplateau in Chile aufgestellt werden.



▼ Nur sichtbares Licht und Radiostrahlung erreichen den Erdboden. Im Millimeter bis Infrarotbereich müssen die Teleskope auf hohen Bergen installiert werden, um Signale aus dem Weltall zu empfangen – oder auf Satelliten außerhalb der Erdatmosphäre.

die Lichtverschmutzung (S. 21) behindert wird. Rund um große Radioteleskope gibt es daher besonders strenge Regelungen für den Gebrauch von Funktechnik.

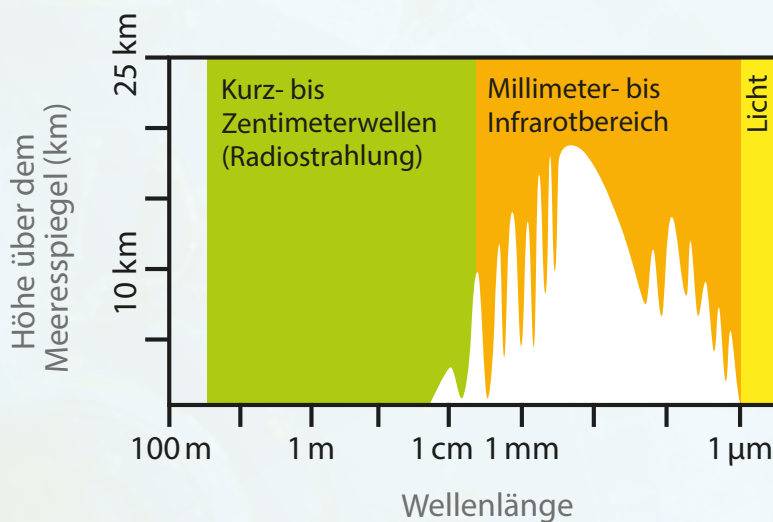
Die Radiowellen aus dem Weltall entstehen auf ganz unterschiedliche Weise. Bei einer Wellenlänge von 21 Zentimetern strahlt elektrisch neutraler Wasserstoff eine ganz scharfe Spektrallinie aus. Damit ist diese Frequenz eine gute Sonde für die Position von Wasserstoff im Universum – der ja einen Großteil der Materie zwischen den Sternen

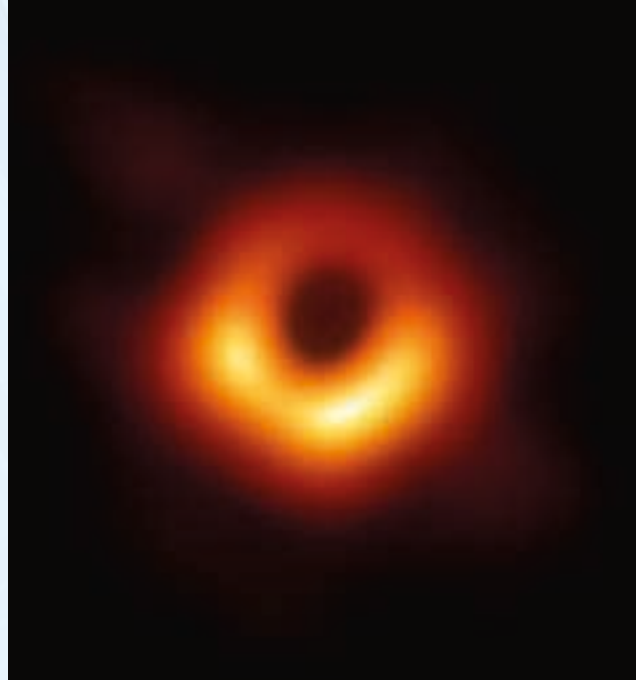
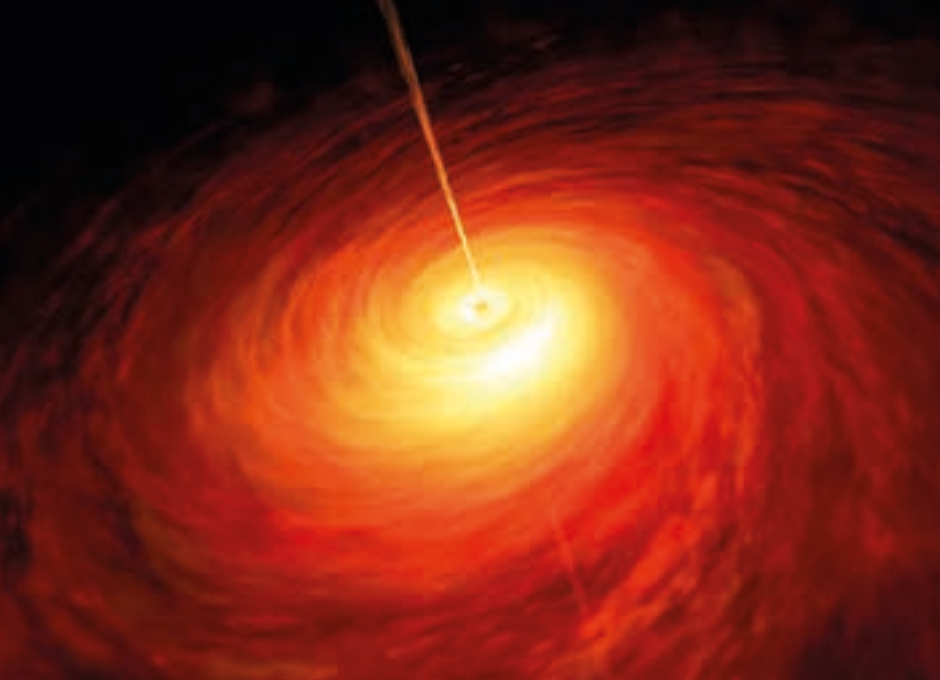
ausmacht. Langwelligere Radiostrahlung wie etwa die zuerst entdeckte aus dem Galaktischen Zentrum hat ihre Ursache in den extremen Prozessen, die dort in der Nähe eines Schwarzen Loches ablaufen. Dort heizt sich einfallendes Material auf, das ähnlich wie in einem Strudel in einer „Akkretionsscheibe“ nach Innen strömt. Es strahlt seine Energie in einem weiten Frequenzbereich ab, von Radiowellen bis hin zur Röntgenstrahlung.

Radiowellen bis hin in den Submillimeterbereich werden meist mit Parabolspiegel-Antennen empfangen. Nur für die längstwelligen Radiosignale kommen noch andere Antennentypen zum Einsatz: Das über ganz Europa verteilte LOFAR (Low Frequency Array) nutzt einfache Dipol-Drahtantennen – allerdings über 10.000 Stück an der Zahl!

Während optische Teleskope auf einen wolkenfreien, dunklen Himmel angewiesen sind, funktionieren Radioteleskope auch bei Tag und unter einer dicken Wolkendecke: Radiowellen sind so

▼ Radioteleskop Effelsberg: Ein Parabolspiegel reflektiert die Radiowellen auf einen weiteren Spiegel an der Spitze des Gittergestells. In der Empfängerkabine sind Detektoren für den Empfang mehrerer Wellenlängenbereiche gleichzeitig montiert.





▲ Um ein Schwarzes Loch bildet sich eine Akkretions-scheibe aus Materie, die sich umso stärker aufheizt, je dichter sie dem Schwarzen Loch kommt. Ein Teil der Materie wird als Jet senkrecht zur Scheibe herausgeschleudert (linkes Bild).

langwellig, dass sie die kleinen Moleküle der Atmosphäre ungestört passieren können. Damit verbunden ist allerdings auch eine Herausforderung: Die Energie, die ein einzelnes Photon im Radiowellenbereich mit sich trägt, ist sehr gering. Daher müssen die Signale verstärkt werden.

Da die Signale aus dem Weltall extrem schwach sind, müssen die Radioempfänger besonders rauscharm sein. Dazu werden die eigentlichen Empfänger, die im Brennpunkt der Parabolspiegel montiert sind, auf niedrige Temperaturen gekühlt. So wird verhindert, dass das schwache Signal vom „thermischen Rauschen“ der Elektronik verschluckt wird.

Ein weiterer wichtiger Vorteil der Radiowellen im Vergleich zu den viel hochfrequenten optischen Wellen des sichtbaren Lichts und darüber hinaus ist, dass die Wellenformen des Signals abgetastet und gespeichert werden können. Dadurch können Radioteleskope über sehr große Entfernungen zusammengeschaltet werden und als Interferometer sehr große Winkelauflösungen erreichen. Ähnlich wie die Abbe-Formel bei Mikroskopen (→ S. 8/9) bestimmt nämlich das Verhältnis von Wellenlänge zu Durchmesser des Teleskops seine Schärfe. Das 100-m-Teleskop in Effelsberg entspricht von seiner Auflösung daher nur einem einfachen Feldstecher im optischen Bereich. Kombiniert man jedoch Teleskope in Abständen von mehreren Tausend Kilometern, dann erhält man das schärfste Teleskop der Welt.

SCHWARZES LOCH

Um die Erde zu verlassen, müsste man mit 11,2 Kilometern pro Sekunde vom Erdboden aus losspringen. Bei schwereren Planeten ist diese Fluchtgeschwindigkeit deutlich größer, bei Jupiter etwa beträgt sie 59,6 Kilometer pro Sekunde, und die Sonnenoberfläche müsste man mit 617 Kilometern pro Sekunde verlassen. Wenn die Schwerkraft so stark wird, dass noch nicht mal mehr Licht einen Himmelskörper verlassen kann, die Fluchtgeschwindigkeit also der Lichtgeschwindigkeit entspricht, dann nennt man das Objekt ein Schwarzes Loch.

Schwarze Löcher können am Lebensende besonders schwerer Sterne entstehen, welche mindestens rund vierzig Mal so viel Masse besitzen wie unsere Sonne. Diese Sterne explodieren nach wenigen Millionen Jahren Brenndauer als Supernova – zurück bleibt dann ein Schwarzes Loch mit einigen Dutzend Sonnenmassen. Alles, was näher als rund fünfzig Kilometer an dieses Schwarze Loch gerät, verschwindet darin.

In den Zentren vieler Galaxien kommen sogar Schwarze Löcher mit vielen zehntausend bis Millionen Sonnenmassen vor. Das supermassereiche Schwarze Loch im Zentrum unserer Milchstraße besitzt beispielsweise über vier Millionen Sonnenmassen und damit einen Durchmesser von fast 25 Millionen Kilometern.

Im April 2019 konnten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit weltweit zusammengeschalteten Radioteleskopen das erste Bild eines Schwarzen Lochs erzeugen (rechtes Bild). Ihr Abbild im Grenzbereich zwischen Radiowellen und Infrarotlicht zeigt das heiße Gas rund um den Ereignishorizont des Objekts M87 A* – den Kern der elliptischen Galaxie M87. Das dortige supermassereiche Schwarze Loch ist das schwerste bekannte im Universum – noch über fünfhunderttausend Mal massereicher als das in unserer Milchstraße.



UNSICHTBARE BOTEN AUS DEM ALL

▲ Unter dem Eis der Antarktis sind 5160 Lichtsensoren in einer Tiefe von 1450 bis 2450 Metern angebracht und bilden so einen Würfel mit einem Kilometer Kantenlänge.

GENAUSO, WIE WIR UNSERE UMWELT NICHT NUR MIT DEN AUGEN WAHRNEHMEN, KÖNNEN PHYSIKERINNEN UND PHYSIKER HEUTE DAS WELTALL MIT EINER GANZEN REIHE KOSMISCHER BOTEN UNTERSUCHEN, DIE NICHT NUR EINFACH ELEKTROMAGNETISCHE STRALUNG VERSCHIEDENER FREQUENZEN SIND.

Um eine besonders eigentümliche Teilchensorte zu beobachten, gehen die Forscherinnen und Forscher ins ewige Eis des Südpols. Dort befindet sich das Neutrino-Teleskop IceCube (engl. Eiskwürfel). Neutrinos sind Elementarteilchen, die bei Kernumwandlungen entstehen, etwa wenn aus einem Neutron ein Proton wird. Das geschieht fortwährend bei der Kernfusion, die die Sonne und alle anderen Sterne erstrahlen lässt. Dabei wer-

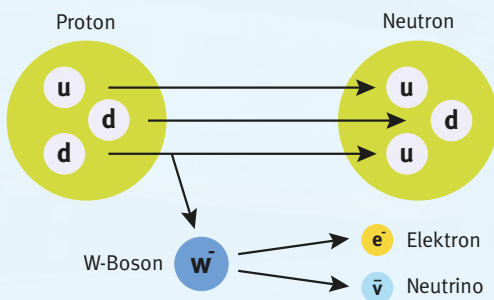
den so viele Neutrinos produziert, dass Milliarden von ihnen pro Sekunde durch jeden Quadratzentimeter von uns fliegen.

Dass wir das nicht bemerken, liegt daran, dass Neutrinos nur durch die schwache Wechselwirkung und die Gravitationskraft mit anderen Teilchen interagieren können. Da sie aber fast masselos sind und die schwache Wechselwirkung nur bei ganz seltenen, quasi direkten Treffern eines Neutrinos mit einem Quark zu einer Reaktion führt, durchdringen die allermeisten von ihnen alles – uns, unsere Erde und leider auch sämtliche Messgeräte. Daher mussten sich die Forscherinnen und Forscher einen Trick einfallen lassen: Wenn Reaktionen von Neutrinos mit Materie sehr selten sind, dann muss man den Detektor sehr groß bauen, damit überhaupt mal eine Reaktion beobachtet werden kann.



Bei IceCube dient das in großen Tiefen fast durchsichtige Eis der Antarktis als Detektor: Trifft ein Neutrino genau passend auf einen der Atomkerne im Eis, dann entstehen eine Reihe anderer Partikel, die sich fast mit Lichtgeschwindigkeit durch das Eis bewegen. Diese sind dann sogar schneller als das Licht, das sich im Eis nur mit rund 200.000 Kilometern pro Sekunde ausbreitet. Dabei erzeugen die schnellen Teilchen eine Art Überschallwelle aus blauem Licht – „Tscherenkow-Licht“ – das von hochempfindlichen Lichtsensoren beobachtet wird.

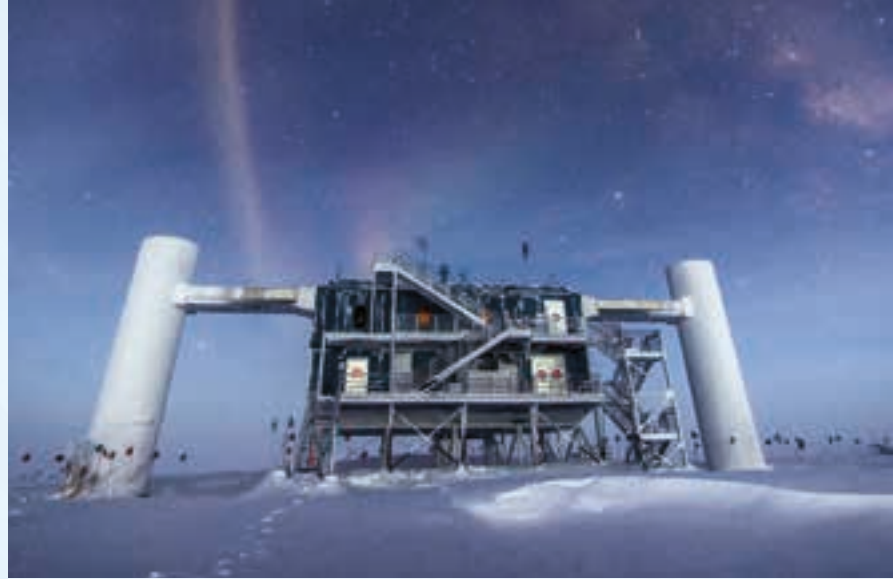
IceCube besitzt 5160 solcher Fotosensoren, die an Kabeln tief in das Eis eingeschmolzen wurden. Sie überwachen seit 2010 einen Kubikkilometer Eis auf Lichtblitze von Neutrinos. Mit IceCube konnten erstmals Neutrinos mit so hoher Energie beobachtet werden, dass sie nicht aus den Kernreaktionen in der Sonne stammen können. Diese Teilchen müssen in extremen Ereignissen weit entfernt im Kosmos entstanden sein.



▲ Beim Beta-Zerfall, bei dem sich Neutronen in Protonen umwandeln, entstehen über das Zwischenstadium des W-Bosons ein Elektron und ein Neutrino. Diese Reaktion gehört zur „schwachen Wechselwirkung“.

Im September 2017 wurde ein Neutrino vom Blazar TXS 0506+056 beobachtet. Er entstammt einer weit entfernten Galaxie, in deren Zentrum ein schnell rotierendes Schwarzes Loch Masse aufnimmt. Dabei werden Jets – eng gebündelte Strahlen – von hochenergetischen Photonen und Teilchen in zwei gegenüberliegende Richtungen ausgesendet. Der Jet eines Blazars zeigt dabei zufällig genau in unsere Richtung.

Andere extreme Ereignisse in unserem Universum können eine ganz andere Art von Signalen auslösen: Gravitationswellen. Aus Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie wissen wir, dass Massen den Raum verzerren. Das macht sich zum Beispiel durch Lichtablenkung bemerkbar. Eine Veränderung dieser Verzerrung breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit als Gravitationswelle aus.

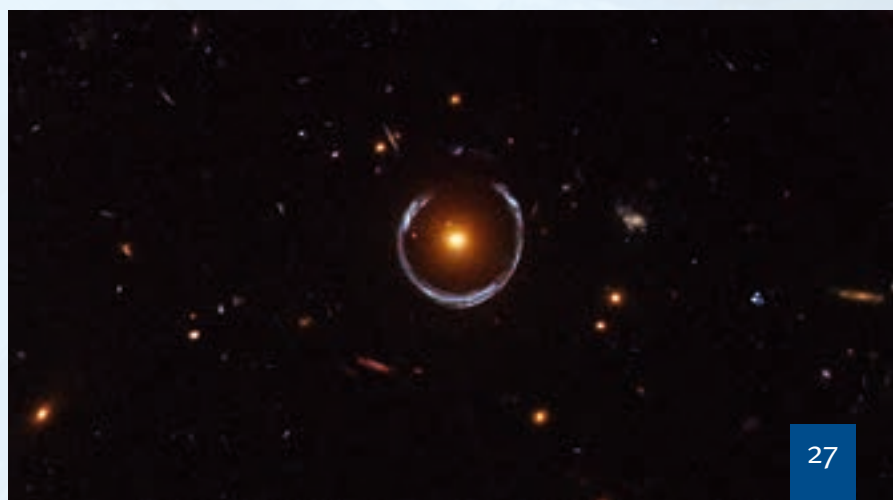


Die Gravitationswellendetektoren des LIGO-Projekts sind im Prinzip hochgenaue Messgeräte für Längenveränderungen. In ihnen wird mit Laserlicht die Länge zweier senkrecht zueinander stehender Arme mit unglaublicher Präzision verglichen: Die Geräte erkennen, wenn sich einer der beiden Arme mit einer Länge von je vier Kilometern um nur den 10.000sten Teil des Durchmessers eines Protons verändert! Diese Empfindlichkeit ist notwendig, da selbst die kräftigsten Gravitationswellen aus der Verschmelzung zweier sich immer dichter umkreisender Schwarzer Löcher unvorstellbar schwach sind. Für die erste direkte Messung der Gravitationswellen gab es im Jahr 2017 den Nobelpreis für Physik.

In den Detektoren macht sich eine Gravitationswelle durch ein wenige Sekunden dauerndes Signal bemerkbar, das akustisch hörbar gemacht wie ein kurzes einmaliges Vogelzwitschern klingt. Da die Gravitationswellen durch nichts im Kosmos aufgehalten werden, eröffnet sich mit ihrer Beobachtung ein ganz neues Fenster, um Prozesse sichtbar zu machen: Die Verschmelzung massereicher Objekte im ganzen Universum ist nun fortlaufend zu beobachten. Seit Inbetriebnahme im Jahr 2015 hat LIGO schon 13 Vereinigungen von Schwarzen Löchern erfasst. Überraschend dabei: Die beteiligten Objekte waren schwerer als bisherige Beobachtungen mit Röntgenteleskopen nahegelegt hatten.

▲ Auch wenn das Gebäude des IceCube-Observatoriums spektakulär aussieht: Das eigentliche Neutrino-Teleskop befindet sich tief darunter im Eis der Antarktis, direkt am Südpol.

▼ Die gelbe Galaxie in der Mitte des Bildes verzerrt das Licht einer dahinterliegenden, blau leuchtenden Galaxie so extrem, dass sich ein „Einsteinring“ bildet. Das Licht der blauen Galaxie erreicht uns auf verschiedenen Wegen.



An aerial LIDAR scan of a Mayan city, showing a complex network of roads, buildings, and pyramids. The image is color-coded by elevation, with green representing lower areas and yellow/orange representing higher areas. The title 'VERBORGENE WELTEN' is overlaid in large white letters.

VERBORGENE WELTEN

▲ Mit einem Flugzeug-LIDAR (→ S. 30) wurden Ruinen einer verfallenen Maya-Stadt kartiert, die für das bloße Auge aufgrund der Vegetation verborgen bleiben.

IN DIE ERDE HINEINSEHEN? WAS FÜR BERGLEUTE UND ÖLSUCHER LANGE ZEIT EIN TRAUM WAR, WURDE MIT WISSENSCHAFTLICHEN METHODEN ZUR REALITÄT.

Was befindet sich unter unseren Füßen? Gestein? Verwitterte Grundmauern alter Gebäude? Wertvolle Mineralien oder andere Rohstoffe? Und wenn wir nicht nur einige hundert Meter tief blicken wollen, sondern viele tausend Kilometer ins Erdinnere, wie können wir dann wissen, wie die Erde dort beschaffen ist? Die offensichtliche Methode ist es, zu graben und nachzuschauen. Allerdings finden solche Bemühungen spätestens nach einigen Kilometern ein Ende. Doch mit ausgeklügelten Methoden, mit Schall und elektromagnetischen Feldern gelingt es, das Dunkle unter der Oberfläche zu durchleuchten.

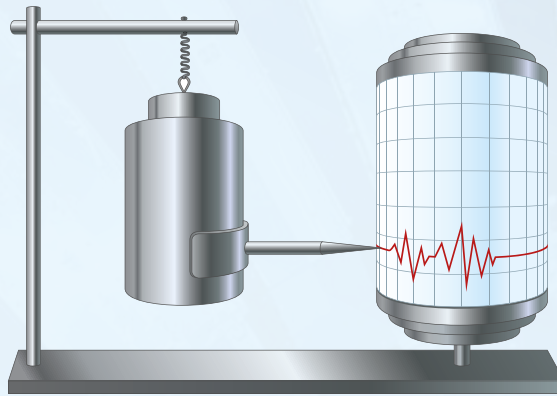
Vor etwas mehr als hundert Jahren begann in Göttingen das Zeitalter der globalen Vermessung der Erde mithilfe der Erschütterungen aus Erdbeben. Die Beben sind ruckartige Verschiebungen der Kontinentalplatten, bei denen große Energiemengen in Wellen abgegeben werden. Diese reisen ähnlich wie Schallwellen rund um den Globus.

Ein starkes Erdbeben der Stärke 8 auf der heute gebräuchlichen „Momenten-Magnituden-Skala“ setzt dabei so viel Energie frei wie eine Wasserstoffbombe mit der Sprengkraft von 15 Megatonnen TNT. Das entspricht etwa dem 1200-fachen der Hiroshima-Atombombe. Je Magnitude ändert sich der Energiegehalt der Erdbeben um den Faktor 31,6. Daher sind Beben der Stärke 8 in der Regel sehr viel zerstörerischer als die nur eine Magnitude schwächeren Beben der Stärke 7.

Mit weltweit vernetzten Messstationen werden permanent diese Vibrationen des Erdkörpers vermessen. Aus deren Form und aus der Zeit, die es braucht, bis die Schwingungen eines Bebens an einer Messstelle angekommen sind, können die Seismologen und Seismologinnen die Struktur der Erde ermitteln. So wissen wir heute, dass die Erde einen festen Eisenkern mit einem Radius von 1230 Kilometern besitzt. Um ihn herum findet sich der flüssige Erdkern bis zu einem Radius von 3430 Kilometern, entsprechend einer Dicke von 2200 Kilometern. Darüber folgen der rund 2850 Kilometer mächtige Erdmantel, der aus festem Gestein besteht, das über lange Zeiträume betrachtet allerdings fließt und so den Antrieb für die Bewegung der Erdplatten liefert. Auf dem Erdmantel schwimmen die Erd- oder Kontinentalplatten und bewegen sich mit einigen Millimetern pro Jahr gegeneinander.

Doch auch in kleineren Bereichen kann mit den Wellen, die sich durch die Erde ausbreiten, nachgeschaut werden, was sich unter unseren Füßen befindet. So nutzen Geologinnen und Geologen auf der Suche nach Lagerstätten von Rohstoffen kleine Explosionen oder kräftige Hammerschläge, um Wellen in der Erde zu erzeugen. Die Messgeräte werden zuvor im Abstand einiger Dutzend Meter verteilt. Nach dem gleichen Prinzip wie bei der Erkundung der Tiefen der Erde lassen sich aus den Laufzeitunterschieden der Signale zu den Messgeräten sehr präzise Aussagen über den Aufbau der Erdschichten bis in einige Kilometer Tiefe gewinnen.

Bei der Fahndung nach oberflächennahen Strukturen wie etwa den Grundmauern alter Bauwerke wird mit Magnetfeldsensoren gearbeitet. Die im Mauerwerk verarbeiteten Materialien beeinflussen nämlich das schwache Erdmagnetfeld. Zeichnet man die Störungen des Erdmagnetfelds mit solchen geomagnetischen Sonden auf, dann lassen sich mögliche archäologische Fundstätten kartieren, noch bevor die Untersuchungen mit Spitzhacke, Schaufel, Kelle und Pinsel beginnen. Genauso wie ein Radar auf Schiffen oder Flugzeugen mit dem Aussenden elektromagnetischer Wellen und der Analyse der zurückgeworfenen Signale Hindernisse und Landstrukturen ausmachen kann, können die Radarwellen auch bis in den Boden vordringen! Ein solches Bodenradar kann dabei zur Suche von Landminen in Kriegsgebieten, zur Archäologie, aber auch zur großräumigen Kartierung verwendet werden: So



◀ Wenn die Erde in Schwingung kommt, ruht die schwere Masse links aufgrund ihrer Masse-trägheit. Die Änderung der Position zwischen Masse und Sensor wird digital aufgezeichnet.



befinden sich an Bord der Raumsonden Mars Express und Mars Reconnaissance Orbiter solche Bodenradar-Anlagen. Beide Marssonden kreisen in einigen hundert Kilometern Abstand um unseren Nachbarplaneten und können seine Bodenstruktur bis in einer Tiefe von etwa fünf Kilometern erkennen. Doch auch auf der Erde liefern Bodenradargeräte wertvolle Einblicke: Mit ihnen kann nämlich die Struktur der Kontinente unter dem ewigen Eis von Grönland und der Antarktis entschlüsselt werden. Auch die Dicke des Eises und seine Abnahme in den letzten Jahren wurde mit speziellen Varianten des Bodenradars – dem Eisradar – dokumentiert.

Wenn Ruinen von Wäldern überwuchert sind, lassen sie sich nur schwer auf Luftaufnahmen erkennen. Eine erfolgreiche Methode, quasi an den Blättern vorbei auf verfallene Bauwerke im Dschungel zu stoßen, ist das LIDAR. Genau wie beim Radar werden hier elektromagnetische Pulse ausgesandt – allerdings nicht im Radio-

▼ Hand- bzw. Fußarbeit: An einem Tragegestell sind vier Magnetometer befestigt. In einem Zick-Zack-Schema werden so potenzielle archäologische Fundstätten untersucht.



Frequenzbereich, sondern im Bereich rund um das sichtbare Licht. Der Vorteil der Laserpulse: Sie sind ganz scharf gebündelt, sodass sie beim Blick vom Flugzeug nach unten in den Wald hinein immer wieder die Lücken im Blattwerk finden und so nicht nur die Oberkante des Waldes, sondern auch das Bodenniveau abtasten. Die LIDAR-Methode ist für die Archäologie unter Vegetation hervorragend geeignet.

Wenn die Archäologinnen und Archäologen ihre Fundstätten untersuchen, stoßen sie oft auf Artefakte, die untersucht werden sollen, ohne sie zu zerstören: Sarkophage oder Mumien etwa sollen ihre Geheimnisse lüften, ohne dass man sie

öffnet oder zerschneidet. Hier helfen die Methoden der Physik: Genauso wie lebende Patienten können auch Mumien im Röntgenapparat durchleuchtet oder im Kernspintomographen untersucht werden. Aber auch die Detailuntersuchung der Materialien ist lehrreich: Röntgenfluoreszenzmessungen können erkunden, aus welchen Materialien die Artefakte hergestellt wurden, wie ihre Oberflächen behandelt wurden und ob sie mit Farbe oder anderen Stoffen beschichtet waren. Aus der Zusammensetzung der Atomkerne kann man darüber hinaus das Alter der Funde bestimmen – mit der sogenannten C-14-Methode, die den radioaktiven Zerfall einer Kohlenstoffvariante nutzt.

DAS SUMMEN DER STERNE UND DER SONNE

Sterne sind große, heiße Bälle aus Gas. Diese können in Schwingungen geraten, wenn man sie anstößt – etwa so, wie man es auch bei größeren Seifenblasen beobachten kann. Die treibende Kraft dafür sind die Bewegungen in ihrem Innern aufgrund der Energiefreisetzung durch die Kernfusion.



Durch die Schwingungen bewegt sich die Sternoberfläche leicht auf und ab. Das sorgt dann dafür, dass sich Spektrallinien im Sternspektrum ein wenig zu kürzeren oder längeren Wellenlängen verschieben, was mit Teleskopen vermessen werden kann. Aber auch kleine Helligkeitsänderungen sind mit den Sternschwingungen verbunden. Diese werden beispielsweise mit dem Weltraumteleskop Kepler aufgespürt, welches die Helligkeit von vielen Tausend Sternen gleichzeitig misst. Diese Schwingungen konnten für einige Sterne sogar hörbar gemacht werden.

Mit den gleichen Methoden, die Seismologinnen und Seismologen für die Erkundung des Erdinneren einsetzen, können die Forscherinnen und Forscher aus den Sternschwingungen Aussagen über das Sterninnere ableiten. Mit dieser „Helioseismologie“ – also der Seismologie der Sonne – kann man sogar Aktivitätszonen auf der Sonnenrückseite erkennen und so helfen, Sonnenstürme vorherzusagen.

IMPRESSUM

HERAUSGEBER

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Heinemannstraße 2
53175 Bonn

Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V. (DPG)
Hauptstraße 5
53604 Bad Honnef

AUTOR

Dr. Jens Kube

REDAKTION

Dr. Ulrich Bleyer, Dr. Ulrich Blum, Prof. Dr. Eberhard Bodenschatz,
Dr. Axel Carl, Prof. Dr. Klaus Desch, Ruben Düchting,
Dr. Marius Groll, Max Heiland, Mira Manger, Elina Schick

KONZEPT UND GESTALTUNG

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

DRUCK

Brandt GmbH, Bonn

STAND

August 2019

BILDQUELLEN

Reihenfolge zeilenweise von links oben nach rechts unten.

- U1/U4: D-VISIONS, DenisNata/shutterstock.com; Motivkomposition:
iserundschmidt
- S. 4: DenisNata/shutterstock.com
- S. 5: Dioptrius, CC0; Grafik: iserundschmidt
- S. 6: naturlichter.de, F. C. Robiller, CC BY-SA 3.0
- S. 7: Grafiken: iserundschmidt nach Jens Kube
- S. 8: Daniel Mietchen, CC0 1.0
- S. 9: Grafiken: iserundschmidt nach Jens Kube
- S. 10: European XFEL, Heiner Müller-Elsner
- S. 11: MARS Bioimaging Ltd; Grafik: Cdang, CC BY-SA 3.0;
European XFEL, Jan Hosan
- S. 12: CERN
- S. 13: Grafik: iserundschmidt nach Jens Kube; Netzwerk Teilchenwelt,
Juliana Socher
- S. 14: joshim, 3dexport.com; Grafik: iserundschmidt
- S. 15: CERN, Joao Pequeno
- S. 18: NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration, M. J. Freyberg, R. Egger/MPE;
ESA/LFI & HFI Consortia; Max-Planck-Institut für Radioastronomie.
P. Reich, auf Grundlage von C.G.T. Haslam et al. A&AS 47, 1 (1982)
- S. 19: Khalid BM, CC0; ESA/Planck Collaboration
- S. 20: ESO, G. Beccari
- S. 21: NASA, Robert Simmon; Grafiken: iserundschmidt nach „User:Sch“;
iserundschmidt nach Jens Kube
- S. 22: ESO/L. Calçada/ACe Consortium; PRpetuum GmbH;
Grafik: iserundschmidt nach Jens Kube
- S. 23: ESO, A. Ghizzi Panizza
- S. 24: Grafik: iserundschmidt nach MPIfR Bonn; Norbert Tacken/
Max-Planck-Institut für Radioastronomie
- S. 25: ESO, M. Kornmesser; Event Horizon Telescope, CC BY 4.0
- S. 26: IceCube Collaboration, Jamie Yang
- S. 27: Felipe Pedreros, IceCube/NSF; ESA/Hubble & NASA
- S. 28: Courtesy Wild Blue Media/National Geographic
- S. 29: Iuliia Saenkova/shutterstock.com;
Jan Bosch/Posselt & Zickgraf Prospektionen GbR
- S. 30: NASA





Veranstalter



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Deutsche Physikalische Gesellschaft



UNIVERSITÄT **BONN**

Partner

WILHELM UND ELSE
HERAEUS-STIFTUNG



FREUDE.
JOY.
JOIE.
BONN.



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG



Deutsche Telekom Stiftung



xarvio™
Digital Farming
Solutions



LD DIDACTIC

Medienpartner

General-Anzeiger
ga-sonntag

Förderer

HITACHI
Inspire the Next

RK
Regionalverkehr Köln GmbH

wetteronline

**BEET
HOVEN
FEST
BONN**
6.9. - 29.9.2019

Inspiziert und begeistert durch den Erfolg des „Jahres der Physik 2000“ veranstalten das Bundesministerium für Bildung und Forschung und die Deutsche Physikalische Gesellschaft seit 2001 ein jährliches Physikfestival: die „Highlights der Physik“. Das Festival zieht mit jährlich wechselnder Thematik von Stadt zu Stadt. Mitveranstalter sind stets ortsansässige Institutionen. Die vorliegende Broschüre erscheint zu den „Highlights der Physik 2019: Zeig dich!“ (Bonn, 16.–21.9.2019). Infos: highlights-physik.de