



Am 25. April 1954 ertönte bei den Bell-Laboratorien in Murray Hill im US-Bundesstaat New Jersey ein kleines Transistorradio. Die eingeladenen Journalisten waren fasziniert, denn allein Licht ließ die kleine Kiste dudeln. Eine Solarzelle aus Silizium wandelte die Energie des Lichts in elektrische Energie um. Das war die Geburtsstunde der modernen Solarzellentechnologie, und sie kam gerade rechtzeitig zum Beginn des Raumfahrtzeitalters. Schon 1958 umkreiste mit Vanguard 1 der erste Satellit mit Silizium-Solarzellen die

mals schon gegen die Kohlekraftwerke des berühmten Thomas Alva Edison konkurrieren. Fritts wurde so zum Urvater der Photovoltaik. Doch er scheiterte am geringen Wirkungsgrad seiner Selenzellen. Diese konnten nicht mal ein Prozent der Energie des Sonnenlichts in elektrische Energie umwandeln.

Heute bestehen rund neunzig Prozent aller Solarzellen aus dem Halbleiter Silizium. Je nach Bauart können kommerzielle Siliziummodule fast 20 Prozent der Lichtenergie in

Solarzellen mit mehr Leistung – wie Forscher den Dunkelstrom eindämmen

Erde. Solarstrom ist eine besonders praktische Energiequelle im Weltall, und so trieb die Raumfahrt die Entwicklung der Solarzellentechnologie voran.

Die Vorgeschichte der Solarzellen beginnt bereits 1839 in Paris. Damals machte der französische Physiker Alexandre Edmond Becquerel eine interessante Beobachtung, als er Metallelektroden in ein flüssiges Elektrolyt tauchte. Elektrolyte machen Akkus, Batterien und Brennstoffzellen erst funktionsfähig (siehe **Techmax 13 und 16**). Becquerel fand heraus, dass die Metallelektroden im Elektrolytbad einen schwachen Strom produzierten, sobald Licht darauf fiel. Er entdeckte so den **photoelektrischen Effekt** und damit das Grundprinzip der Solarzelle. 1873 beobachtete der englische Ingenieur Willoughby Smith, dass Selen einen recht ausgeprägten photoelektrischen Effekt besitzt. Selen ist ein Halbmetall und steht damit Halbleitern nahe, wie wir heute wissen. Zehn Jahre später betrat der amerikanische Erfinder Charles Fritts die Bühne. Er baute aus Selen die ersten echten Solarzellen. Und nicht nur das: Er wollte damit da-

Strom umsetzen. Der Rekordwirkungsgrad für Silizium im Labor liegt heute sogar bei 25 Prozent. „Das ist schon so gut wie der Wirkungsgrad eines Benzinmotors“, betont Otwin Breitenstein. Der Physiker forscht mit seiner Gruppe am Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle seit vielen Jahren daran, Solarzellen aus Silizium zu verbessern. Die Hallenser arbeiten eng mit Solarzellen-Herstellern zusammen. Dabei ist Silizium gar nicht das Material, das sich am besten für die Umwandlung von Licht in Strom eignet – doch die Techniken zur Herstellung von reinem Silizium und zu seiner Verarbeitung zu elektronischen Bauelementen sind besonders weit entwickelt. Zudem ist das Material relativ billig. Silizium-Solarzellen waren anfangs sogar ein Abfallprodukt der Elektronikindustrie.

→

▼ Solarmodule





© Bosch Solar Energy

◀ Ein großer Silizium-Einkristall, aus dem später die Solarzellen-Wafer gesägt werden.

→ Das Rohmaterial für elektronische Chips sind große, perfekte „Einkristalle“, die mit speziellen Schmelzverfahren aufwändig hergestellt werden. Ein Einkristall zeichnet sich dadurch aus, dass ihn das räumliche Gitter der Atome praktisch ohne Fehler durchzieht. Aus den Einkristallen aus hochreinem Silizium werden Scheiben, sogenannte Wafer, geschnitten (Abb. A). Aus diesen Wafern stellt man Chips oder **monokristalline Solarzellen** her. Monokristalline Solarzellen erreichen die höchsten Wirkungsgrade der Siliziumtechnologie. Der Nachteil: Ihre Produktion ist aufwändig, teuer und frisst viel Energie. In unseren Breitengraden müssen solche Zellen etwa 40 Monate lang elektrische Energie erzeugen, um die für ihre Produktion verbrauchte Energie wieder hereinzuspielen; Zellen aus „multikristallinem“ Silizium erreichen diesen Punkt bereits nach 30 Monaten. Heutzutage bestehen die meisten Solarzellen aus multikristallinem Silizium. Da das Material **multikristalliner Solarzellen** aus vielen kleineren Kristallen zusammengesetzt ist, macht das ihre Herstellung billiger: Zuerst schmilzt man hochreine Siliziumstücke in großen Quarzguttiegeln bei 1400 °C auf.

Dann lässt man die Schmelze langsam von unten nach oben erstarren. So entstehen silbrig schimmernde Siliziumblöcke, die bis zu 500 Kilogramm wiegen. So ein Block besteht aus vielen einkristallinen Körnern. Diese „Kristallite“ können mehrere Kubikzentimeter groß sein. Der Block wird zuerst in Säulen und diese in dünne Wafer mit einer Fläche von 156 × 156 mm² zersägt, und daraus macht man dann die Solarzellen.

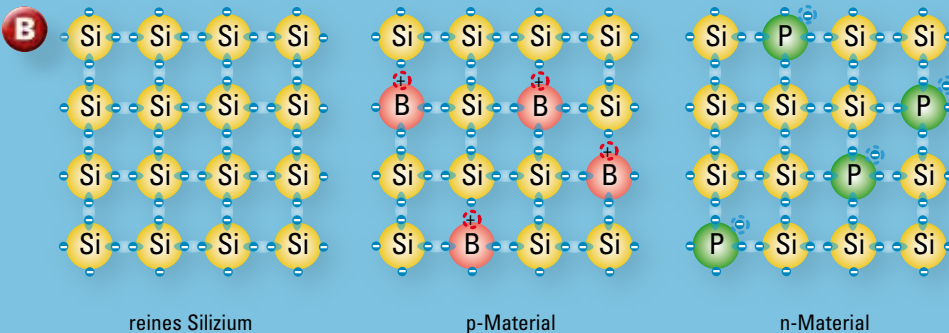
VERLUSTREICHER DUNKELSTROM

Die im Jahr 2011 weltweit hergestellten Solarzellen haben zusammengenommen bei voller Beleuchtung eine Leistung, die zwanzig bis dreißig Atomkraftwerken entspricht. „Von diesen Zellen waren 31 Prozent monokristalline und 57 Prozent multikristalline Siliziumzellen“, erklärt Breitenstein. Multikristalline Silizium-Solarzellen sind also die wichtigste photovoltaische Technologie. Der Wirkungsgrad guter industrieller Zellen liegt heute bei 17 Prozent und damit rund zwei Prozent unterhalb den besten monokristallinen Zellen. Warum ihr Wirkungsgrad schlechter ist, erforscht Breitensteins

Gruppe. Dank dieser Arbeit versteht man heute gut, welche Materialfehler in den nicht so perfekten multikristallinen Zellen entscheidend sind. Damit lassen sie sich nun gezielt verbessern.

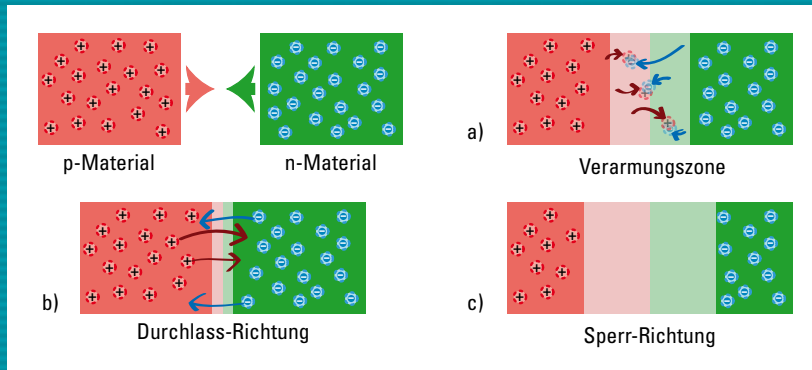
Silizium ist ein Halbleiter, also ein Zwischending zwischen einem Isolator und einem Leiter wie etwa Kupfer. In einer unbeleuchteten Solarzelle fließt im Dunkeln keinerlei Strom, wenn keine elektrische Spannung anliegt. Erst wenn Licht auf sie fällt, entsteht der gewünschte **Photostrom**, der ein Gleichstrom ist. Dabei baut sich eine Gleichspannung auf. Allerdings gibt es dann zusätzlich einen unerwünschten „Dunkelstrom“, lernt man von Breitenstein. Er fließt auch im Dunkeln, weil er unabhängig vom Licht entsteht. Der finstere Name passt, denn der **Dunkelstrom** zieht als Missetäter den Wirkungsgrad herunter: Er fließt nämlich entgegengesetzt zum Photostrom. Nur die Differenz beider Ströme kann die Zelle als nutzbaren Sonnenstrom abgeben. Je kleiner der Dunkelstrom ist, desto effizienter arbeitet sie. Um zu verstehen, wie beide Stromsorten entstehen, muss man sich den Aufbau einer Solarzelle genauer anschauen: Sie ist eine flache, kachelgroße Diode. Bei mono- und multikristallinen Solarzellen ist sie rund 200 Mikrometer dünn – also ein Fünftel Millimeter oder grob zweimal so dick wie ein menschliches Haar. Dickere Solarzellen wären reine Materialverschwendung, denn tiefer können die Lichtquanten (Photonen) nicht in das Silizium-Material eindringen.

Dioden sind die einfachsten Bauelemente der Halbleiterelektronik. Sie bestehen aus zwei verschiedenen Materialien, die in Kontakt gebracht werden. Dieses Halbleitersandwich versieht man dann auf beiden Seiten mit Metallkontakten für den elektrischen



◀ Im Kristallgitter von reinem Silizium (*li.*) sind beim absoluten Temperatur-Nullpunkt alle vier Elektronen des Siliziums in chemischen Bindungen gefesselt. Fremdatome bringen in das Kristallgitter eine abweichende Elektronenzahl ein. Bei Bor zum Beispiel (*Mitte*) entstehen Fehlstellen. Diese „Löcher“ (+) wirken wie freie, elektrisch positive (p) Ladungsträger. Sie machen es zum p-Material. Umgekehrt ist es zum Beispiel beim Phosphor (*re.*). Dessen fünftes, freies Elektron sorgt als negativer Ladungsträger (-) im Silizium für n-Leitung.

WENN ELEKTRONEN IN LÖCHER FALLEN



Bei der Herstellung eines p-n-Kontakts bildet sich die Verarmungszone aus. Aus dem p-Gebiet nahe der Kontaktfläche zieht es Löcher ins n-Gebiet mit seinem attraktiven Elektronenüberschuss, umgekehrt wandern aus dem benachbarten n-Gebiet Elektronen ins p-Gebiet. Die Löcher rekombinieren mit den Elektronen, und so entsteht eine von freien Ladungsträgern leergefegte Zone (a). Der Mangel an Löchern hinterlässt auf der p-Seite des p-n-Kontakts eine Region mit negativer Überschussladung, auf der n-Seite eine positiv geladene Region. Damit

entsteht am p-n-Kontakt ein elektrisches Feld. Wird die elektrische Spannung in Durchlassrichtung des Ventils gepolt, dann schrumpft die Verarmungszone (b). Nun haben viele Elektronen genug Energie, um leicht durch die schmale Verarmungszone hindurch zu flutschen, ebenso Löcher in umgekehrter Richtung. Nur wenn der p-n-Kontakt in Durchlassrichtung geschaltet ist, fließt ein Dunkelstrom. Polt man die Diode in Sperr-Richtung um (c), dann wird die Raumladungszone breiter. Sie wird zum Hindernis für die Ladungsträger.

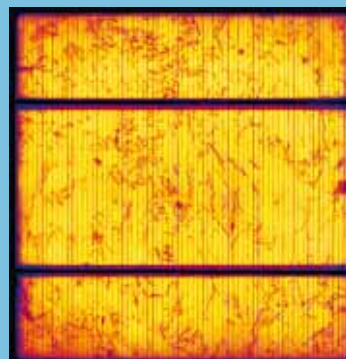
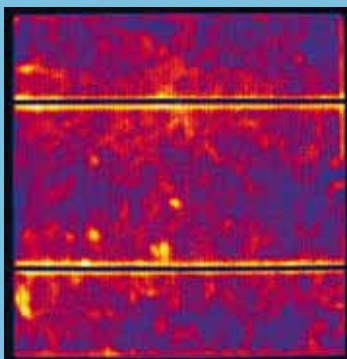
freien Elektronen zu den Löchern, sie drohen in diese wieder hinein zu fallen. Passiert das, dann sind zwei Ladungsträger für den Photostrom verloren. Die Energie des Lichtquants „verpufft“ am Ende als nutzlose Wärmeenergie im Kristall. Diese unerwünschte „Rekombination“ der wertvollen Ladungsträger muss die Solarzelle also verhindern. Und dafür sorgt die Diodenstruktur. Erzeugt man bei der Herstellung einer Diode auf dem p-Silizium eine Schicht n-Silizium oder umgekehrt, dann passiert an dem neuen p-n-Kontakt Folgendes (**Kasten links**): Aus dem p-Gebiet nahe der Kontaktfläche zieht es Löcher ins n-Gebiet mit seinem attraktiven Elektronenüberschuss, umgekehrt wandern aus dem benachbarten n-Gebiet Elektronen ins p-Gebiet. Die Löcher rekombinieren mit den Elektronen, und so entsteht eine von freien Ladungsträgern leergefegte Zone. „Sie heißt Verarmungszone“, sagt Breitenstein. In der Halbleiterphysik spricht man auch von „Raumladungszone“. Der Mangel an Löchern hinterlässt auf der p-Seite des p-n-Kontakts eine Region mit negativer Überschussladung, auf der n-Seite eine positiv geladene Region. Damit entsteht am p-n-Kontakt ein elektrisches Feld. Es verhindert ein weiteres Eindringen von Elektronen und Löchern in die Verarmungszone, solange kein Strom durch die Diode fließt.

Stromkreis. Bei einer Solarzelle ist der obere Metallkontakt als feines Gitter ausgebildet, damit durch dessen Lücken das Licht in die Zelle gelangen kann. Die beiden Halbleitermaterialien der Solarzelle unterscheiden sich wie bei jeder normalen Diode in ihren elektrischen Eigenschaften. Zum Beispiel macht ein geringer Phosphorgehalt Silizium zum **n-Material**, etwas Bor zum **p-Material** (**Abb. B**). Das „n“ steht für einen Überschuss an elektrisch negativen Ladungsträgern, das „p“ für einen an positiven Ladungsträgern. Die negativen Ladungsträger sind frei bewegliche Elektronen. Etwas seltsamer sind die p-Ladungsträger: Sie sind Löcher im Kristallgitter der Atome, aus denen Elektronen freigesetzt wurden. Die Ladung eines Lochs ist das positive Gegenstück zur Ladung des

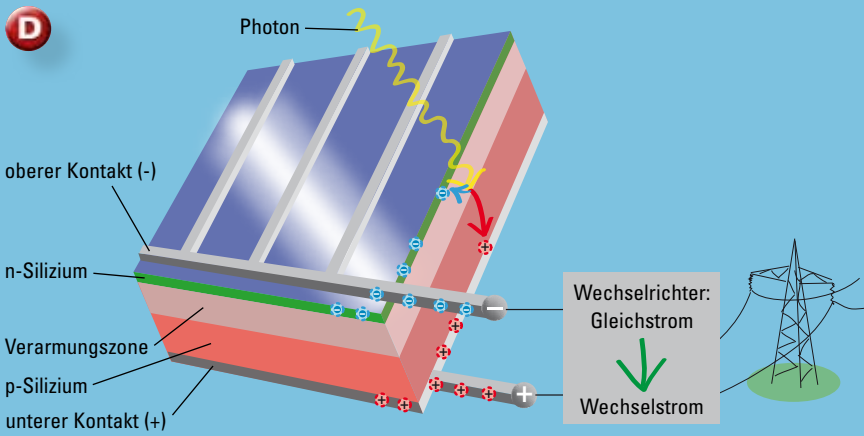
Elektrons, weil dessen negative Ladung an dieser Stelle nun zur elektrischen Neutralität fehlt. Die Löcher können ebenfalls durch den Halbleiterkristall wandern. Dabei hüpfen Elektronen in die entgegengesetzte Richtung. Sie machen Plätze frei und schieben so die Leerstelle des Lochs immer weiter durch das Kristallgitter – wie umfallende Dominosteine. Trifft nun ein Photon aus dem Sonnenlicht auf die Solarzelle, so dringt es in deren Halbleiterschichten ein, bis es genau auf ein Elektron trifft. Mit seiner Energie schlägt es das Elektron aus dem Kristallgitter heraus und erzeugt damit ein zusätzliches Loch. Damit stehen ein negativer und ein positiver Ladungsträger für den Photostrom zur Verfügung. Beide fließen in entgegengesetzte Richtungen. Allerdings zieht es die

Sobald sich die Verarmungszone bei der Herstellung der Diode ausgebildet hat, herrschen stabile Verhältnisse. Sie ändern sich erst, wenn man an die Diode eine elektrische Spannung anlegt. Sie wird zum Stromventil. Ist die elektrische Spannung in Durchlassrichtung des Ventils gepolt, dann schrumpft die Verarmungszone. Nun haben viele Elektronen genug Energie, um leicht durch die schmale Verarmungszone hindurch zu flutschen, ebenso Löcher in umgekehrter Richtung. Polt man die Diode in Sperr-Richtung um, dann wird die Raumladungszone breiter. Sie wird zum Hindernis für die Ladungsträger. →

C



◀ Je heller eine Stelle in einem Lock-in-Thermogramm ist, desto wärmer ist sie (li.). An diesen Stellen fließt ein besonders hoher Dunkelstrom. Das Lumineszenzbild (re.) zeigt die kritischen Materialfehler in der Solarzelle als dunkle Stellen.



▲ Eine Solarzelle ist eine Diode mit einem p-n-Kontakt. Die n-Schicht (grün) ist nur knapp ein Mikrometer dünn. Sie enthält viele Fremdatome und damit viele freie Elektronen, während im wesentlich dickeren p-Kontakt (rot) die Fremdatome mit Löchern nur dünn verteilt sind. Daher bildet sich eine Verarmungszone aus, die auch in Durchlassrichtung genügend groß bleibt. Die n-Schicht ist lichtdurchlässig: Praktisch alle Photonen dringen in die Verarmungs- und p-Zone ein. Dort schlagen sie ein Elektron aus seiner chemischen Bindung. Das elektrische Feld in der Verarmungszone trennt es effizient von „seinem“ Loch. Wie ein Staubsauger befördert es beide entgegengesetzt zu den Kontakten. So gehen nur wenige Ladungsträger des Photostroms verloren.

→ Das Stromventil ist geschlossen. Fällt Licht auf eine Solarzelle, dann „spannt“ sie sich selbst in Durchlassrichtung vor. Solange die Durchlassspannung nicht allzu groß ist, bleibt die Verarmungszone relativ breit. Dieser Zustand ist entscheidend: Damit wirkt diese Zone auf den entstehenden Photostrom immer noch wie ein Staubsauger: Ihr elektrisches Feld saugt die Elektronen in den n-Kontakt der Zelle hinein, die Löcher in den p-Kontakt. Das verhindert, dass beide Ladungsträgersorten wieder miteinander rekombinieren (Abb. D).

„In guten Silizium-Solarzellen schaffen es rund achtzig Prozent der Ladungsträger in den elektrischen Kreislauf, ohne verloren zu gehen“, sagt Breitenstein. Leider sind diese Stromventile nicht hundertprozentig dicht. Eine Solarzelle soll im Betrieb elektrische Leistung bringen. Weil aber Leistung das Produkt aus elektrischem Strom und elektrischer Spannung ist, muss die Zelle neben dem Gleichstrom auch eine Spannung erzeugen. Mit steigender Spannung fließt nun aber auch ein immer stärker werdender Dunkelstrom. Da er gegen den Photostrom gerichtet ist, gleicht er einen Teil des Photostroms aus. Dieser Dunkelstrom ist unvermeidbar, aber er hängt stark von der Qualität des verwendeten Halbleiters ab. Problematisch wird es durch die Materialfehler, die vor allem in multikristallinen Zellen ins Spiel kommen. Sie erzeugen weitere Dunkelstromanteile und ziehen dann den Wirkungsgrad weiter herunter. Solchen Dunkelstromprozessen ist Breitensteins Team auf der Spur. Die

Hallenser verwenden dazu eine hochempfindliche Messtechnik. Sie packen die Zellen in eine kleine Dunkelkammer und schließen sie an eine elektrische Spannungsquelle an. Diese ist in Durchlassrichtung gepolt. Wäre die Zelle perfekt, dann würde nur ein geringer Dunkelstrom fließen. Bei echten Zellen fließen aber zusätzliche Ströme dort, wo die Materialfehler sitzen. Und wo ein Strom fließt, wird es wärmer. Deshalb kam Breitensteins Gruppe auf die Idee, diese Fehlerstellen über eine Wärmebildkamera aufzuspüren. Wärmestrahlung ist Infrarotstrahlung, deshalb heißt diese Aufnahmetechnik **Infrarot-Thermographie**. Allerdings verursachen die Dunkelströme lediglich Temperaturerhöhungen von nur einigen Tausendstel bis höchstens 0,1 Grad Celsius. Normale Wärmebildkameras sind dafür viel zu unempfindlich. Ein weiteres Problem ist die gute Wärmeleitfähigkeit von Silizium – die winzigen Wärmepunkte an den kleinen Materialfehlern zerfließen deshalb, und feine Strukturen sind im Bild nicht mehr erkennbar.

LEICHT ERHÖHTE TEMPERATUREN

Aus diesen Gründen verwenden die Hallenser eine superempfindliche Aufnahmetechnik, die Lock-In-Thermographie. Der Trick: Sie erzeugen in der Zelle mit Stromstößen nur kurze Wärmepulse. Das macht der Computer im Hallenser Labor tausend bis zehntausend Mal hintereinander. Die winzigen Temperaturerhöhungen an den Punkten, wo der Dunkelstrom fließt, addieren sich damit zu einem deutlichen Temperatursignal auf.

Damit kann man im Infrarotbild scharf sehen, wo der Dunkelstrom fließt (Abb. C li.). Es zeigte sich, dass zwei Sorten von Materialfehlern entscheidend sind. Die erste Sorte sind die Ränder der Kristallite im multikristallinen Material. Sie durchtrennen den flächigen p-n-Kontakt als Störung. Auch Kratzer durchschneiden ihn leicht, denn der p-n-Kontakt liegt nur knapp ein Millionstel Meter tief unterhalb der Oberfläche der Zellen. Breitensteins Team konnte zeigen, dass an diesen Störungen zwei Arten von Dunkelstrom fließen: Die erste Art entsteht durch die Rekombination von Elektronen und Löchern tief im Material der Solarzelle, die zweite Art durch Rekombination in der Verarmungszone. Mit der Thermographie können die Forscher diese beiden Dunkelstromanteile getrennt voneinander untersuchen. Bei der Rekombination von Elektronen mit Löchern entsteht auch ein ganz schwaches Licht. Diese „Lumineszenz“ nimmt Breitensteins Gruppe mit einer Art superempfindlicher Kamera auf. Deren Bilder zeigen ebenfalls sehr genau, wo die Ladungsträger rekombinieren (Abb. C re.).

Die Forschungsarbeit der Max-Planck-Wissenschaftler gibt der Industrie wichtige Hinweise, wie sie ihre multikristallinen Silizium-Solarzellen verbessern kann. Eine Möglichkeit ist die Herstellung von weniger fehlerbehafteten Kristallen. Breitenstein forscht zudem mit anderen Wissenschaftlern daran, die Verunreinigung der Kristalle durch Metalle zu verringern. Solche Fremdmoleküle wandern bei der Herstellung aus den Schmelztiegeln ein. In den Fehlerstellen bilden genau sie die Zentren, an denen die Ladungsträger rekombinieren können. „Mit metallfreien Quarztiegeln haben wir schon erste Erfolge“, freut sich Breitenstein.

Schlagwörter: Solarzelle, photoelektrischer Effekt, monokristalline/multikristalline Solarzelle, Wirkungsgrad, Diode, Photostrom, Dunkelstrom, Diode, n-/p-Material, Raumladungszone, Infrarot-Thermographie
Link-Tipps: www.didaktik.physik.uni-duisburg-essen.de/veranstaltungen/soe/versuchsberichte/Ws0809/Berichte/Bericht_Photovoltaik.pdf
www.seilnacht.com/versuche/exp02.html

WWW.MAXWISSEN.DE

– der Link zur Forschung für Schüler und Lehrer

Hier finden Sie Hintergrundinformationen und didaktisches Material zu den jeweils zweimal im Jahr erscheinenden Ausgaben von BIOMAX, GEOMAX und TECHMAX. Weitere Exemplare können Sie kostenlos bestellen unter: www.maxwissen.de/heftbestellung