

# Per Software zu den Sternen

Mit dem digitalen Riesenteleskop LOFAR spähen Radioastronomen bald in die Tiefen des Weltalls. Quer über Europa verteilt liefern unscheinbare Antennenfelder demnächst einzigartige Bilder vom jungen Kosmos, und auch die Jagd nach Radioausbrüchen von Schwarzen Löchern und Supernovae ist eröffnet.

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter [www.spektrum.de/talk](http://www.spektrum.de/talk)

## In Kürze

- ▶ Das Teleskop LOFAR wird die Radioastronomie revolutionieren. Extrem einfach gebaute Antennen, die bald über ganz Europa verteilt sind, könnten sogar die **Epoche der Reionisation** aufspüren. Damals, einige hundert Millionen Jahre nach dem Urknall, schickten die ersten Sterne ihr Licht durch das bis dahin dunkle Weltall.
- ▶ Der Schlüsselbegriff der neuen Technik ist das *phased array*. Dabei werden die **Daten von vernetzten Antennenfeldern**, die den gesamten Radiohimmel vermessen, digital gespeichert. Fokussiert wird anschließend per Software. So lassen sich selbst nach der eigentlichen Messung beliebige Himmelspunkte ansteuern und auch ultrakurze Radioblitzte orten.
- ▶ Machbarkeitsstudien ergaben, dass ein Teleskop vom LOFAR-Typ ideal geeignet ist, um von Rovern **auf dem Mond** installiert zu werden.

Von Heino Falcke und Rainer Beck

Schon als junge Doktoranden durften wir dem Giganten in Effelsberg Befehle erteilen. Aus der Beobachtungskanzel des bei Bonn gelegenen 100-Meter-Radioteleskops heraus hatten wir zudem einen prächtigen Blick auf dessen große weiße Schüssel. Waren andere Riesenteleskope bereits in sich zusammengebrochen – wie das 91-Meter-Green-Bank-Instrument in West Virginia im Jahr 1988 –, verrichtete dieses Meisterstück deutscher Wertarbeit nach 25 Jahren noch immer klaglos seinen Dienst. Kaum waren Himmelskoordinaten in den Computer eingetippt, bewegte sich der 3200 Tonnen schwere Koloss scheinbar mühelos in eine neue Richtung. Sechs Minuten brauchte er für eine Drehung um 180 Grad, um dann zum Beispiel eine der wenigen hellen Radioquellen am Himmel zu fokussieren, anhand derer wir unsere Messungen kalibrierten. Das waren zwar sechs Minuten, während derer man nicht messen konnte. Aber für jeden, der einst staunend vor großen Baggern, Kränen und Lokomotiven stand, wurden Kindheitsträume wahr – und wir wurden dafür auch noch mit dem Dokortitel belohnt.

Die Effelsberger Riesenschüssel ist inzwischen 36 Jahre alt, dank ständiger Verbesserungen aber weiterhin stark gefragt. Doch eines Tages werden Erfahrungen wie die unseren leider der Vergangenheit angehören. Heute bauen wir mit unseren Kollegen ein Rieseradioteleskop der nächsten Generation: LOFAR, das sich von den Niederlanden aus bald über ganz Europa erstreckende *Low-Frequency Array*. Binnen einer Sekunde wird es zu jedem beliebigen Ort am Himmel »schalten« können. Es wird sogar in mehrere Richtungen gleichzeitig schauen, ohne dass es sich dafür sichtbar bewegen

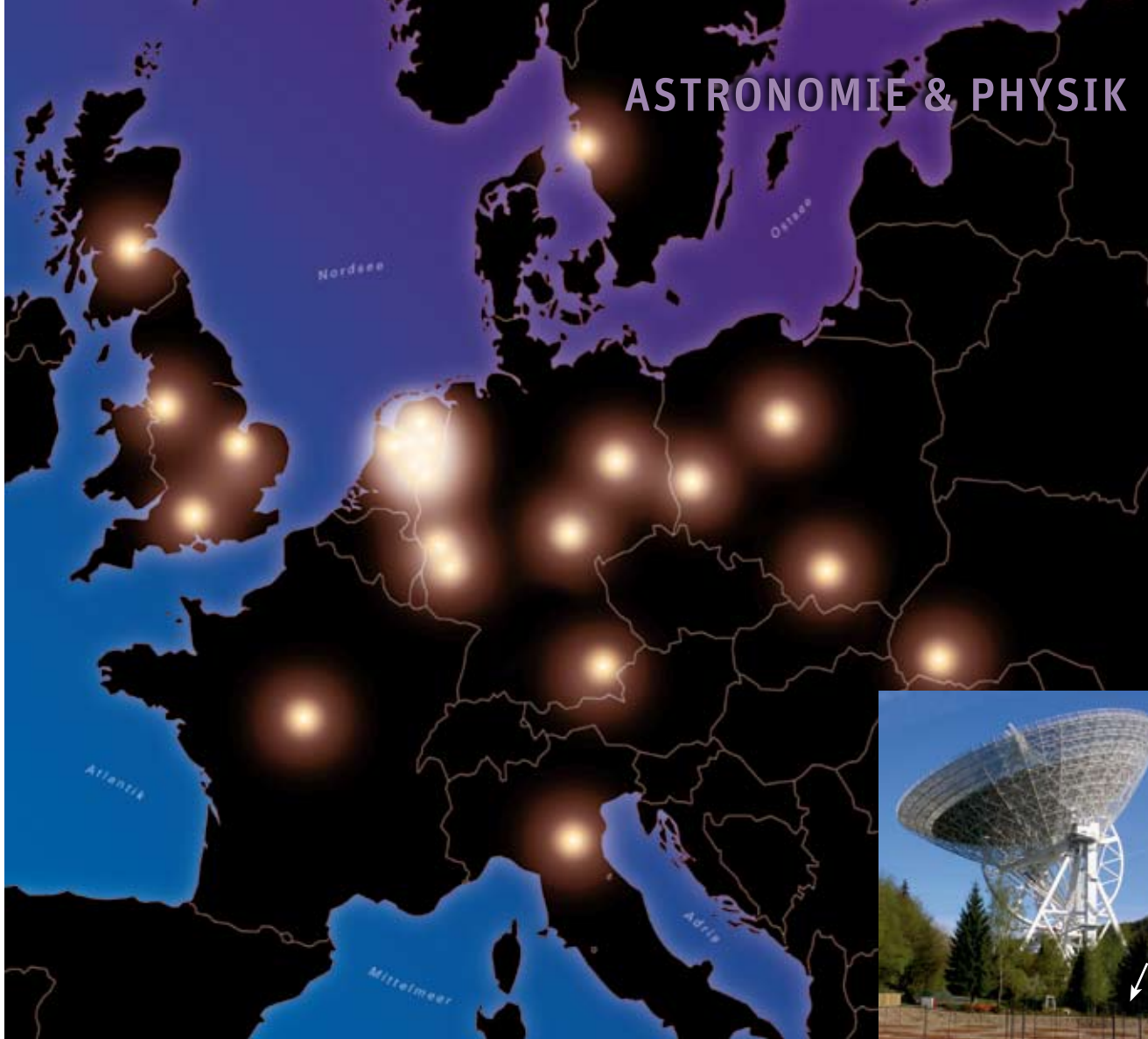
müsste. Aus einiger Entfernung gesehen wird man das Teleskop nicht einmal als solches erkennen. Und dennoch wird es mit bislang undenkbarer Empfindlichkeit und Flexibilität in völlig neue Tiefen des Universums vorstoßen.

Das klingt vielleicht paradox, ist aber nur eine weitere Konsequenz der digitalen Revolution. Denn auch Radioteleskope werden virtuell – zumindest ihre wichtigsten Bestandteile. LOFAR ist mehr ein Softwareteleskop denn ein mechanisches Wunderwerk. Und es steht für einen weiteren Trend. Während die moderne Technik auf immer höhere Frequenzen zielt, ist die Niederfrequenzastronomie im Bereich zwischen 10 und 300 Megahertz (Millionen Hertz, MHz), entsprechend Wellenlängen zwischen 30 und einem Meter, heute ebenfalls wieder in den Fokus gerückt.

### Als die ersten Sterne leuchteten

1931 schlug die Geburtsstunde der Radioastronomie, als der Amerikaner Karl Jansky entdeckte, dass die Milchstraße Radiostrahlung im Meterwellenbereich um 20 MHz aussendet. Später, in den 1960er Jahren, wurden mit Hilfe von Radiowellen energiereiche kosmische Leuchtfeuer wie Pulsare und Quasare ebenfalls bei niedrigen Frequenzen entdeckt. Allmählich aber verlor der Niederfrequenzbereich an Beachtung. Heute weiß man jedoch, dass die Expansion des Universums die Emissionen uralter kosmischer Wasserstoff-Strahlungsquellen so stark »gestreckt« oder rotverschoben hat, dass sie jetzt im Niederfrequenzbereich liegen. Hier steht also ein Fenster offen, das uns weit zurück in die Ursprungsphase des Kosmos schauen und vielleicht auch völlig neue Phänomene entdecken lässt.

Diese Möglichkeiten hatten Astronomen im Hinterkopf, als sie LOFAR planten. Ein niederländisches Konsortium aus Universitäten



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK



RFI FÜR RADIOASTRONOMIE, WOLFGANG REICH

und Forschungsinstituten, gemeinsam mit einigen wenigen deutschen Kollegen und angeführt vom astronomischen Forschungsinstitut ASTRON, definierte zunächst vier Schlüsselprojekte. Das erste zielt auf das kosmische Zeitalter der Reionisation, die Initialzündung des kosmischen Leuchtens. In jener Epoche, einige hundert Millionen Jahre nach dem Urknall, wurden die ersten Sterne geboren und ionisierten den Wasserstoff im All. Zur Untersuchung der Reionisation benötigt man eine große Antennenkonzentration auf einem Gebiet von rund vier Quadratkilometer Fläche. Diese Konfiguration liefert eine Auflösung von rund 3,5 Bogenminuten (die Winkelauflösung berechnet sich aus der beobachteten Wellenlänge geteilt durch den maximalen Abstand der Antennen). Das genügt, denn der wichtigste Beitrag des schwachen Signals, das von den Ursprüngen des leuchtenden Universums kündigt, sollte Simulationen zufolge (siehe SdW 11/2005, S. 12) auf Winkelskalen von einigen Bogenminuten zu entdecken sein.

Das zweite Schlüsselprojekt ist eine Radiodurchmusterung des Nordhimmels, die in ei-

nen Katalog von Radioquellen bei verschiedenen Frequenzen münden soll. Mit hundert Millionen Einträgen wird er alle seine Vorgänger zusammengenommen um mehr als einen Faktor zehn übertreffen. Das erfordert aber nicht nur viele Antennen, um die nötige Empfindlichkeit zu erreichen, sondern auch eine Winkelauflösung im Bereich einiger Bogensekunden, damit sich die vielen Quellen nicht überlagern. Daher müssen die Abstände zwischen einigen der Antennen hundert und mehr Kilometer betragen.

Im dritten und vierten Schlüsselprojekt wollen LOFAR-Forscher die Flexibilität eines Softwareteleskops ausnutzen und transiente Signale jagen: Radioquellen, die unerwartet und nur für kurze Zeit am Himmel erscheinen. Dazu gehören Radioausbrüche von Schwarzen Löchern und Supernovae, aber auch Radioblitz von nahen Sternen und von extraterrestrischen Planeten. So kommen wir auch kosmischen Teilchen auf die Spur, indem wir die von ihnen beim Auftreffen auf die Atmosphäre ausgelösten Radioblitz registrieren. Mit LOFAR ist es im Prinzip aber auch mög-

**Das LOFAR-Teleskop erstreckt sich bald über ganz Europa. In den Niederlanden sind 36 Stationen geplant, hinzu kommen Antennenfelder in Effelsberg, Garching, Jülich, Potsdam und Tautenburg, in Onsala (Schweden), Edinburgh\* (Schottland), Jodrell Bank\*, Lords Bridge\* und Chilbolton (England), in Nançay (Frankreich), Medicina (Italien), Toruń\*, Zielona Gora\* und Krakau\* (Polen) sowie in Rakhiv\* (Ukraine, gemeinsam mit Österreich). An den mit \* markierten Standorten stehen noch finanzielle Zusagen aus. Das kleine Bild zeigt die erste deutsche LOFAR-Station (Pfeil). Im Hintergrund: das Effelsberger 100-Meter-Radioteleskop.**



ASTRON, NIEDERLANDE

Eine Antennenkachel wird installiert. Sie soll Frequenzen zwischen 110 und 270 MHz abdecken. Für den Frequenzbereich von 10 bis 80 MHz sind hingegen einfache Drahtantennen zuständig: Ein senkrechter Stab dient der Stabilisierung, während die vier Drähte, von denen er gehalten wird, die Funktion zweier Dipole übernehmen (kleines Bild vorige Seite).

lich, die Ankunft solcher Teilchen auf dem Mond zu detektieren. Neutrinos etwa können in dessen Untergrund Radiostrahlung erzeugen, die sich auf der Erde messen lässt. Massereichere kosmische Elementarteilchen lösen beim Auftreffen auf dem Mond einen Teilchenschauer aus, der seinerseits niederfrequente Tscherenkow-Strahlung produziert.

Diese Strahlung tritt auf, wenn sich geladene Teilchen schneller durch Materie bewegen als Licht (das nur im Vakuum tatsächlich »Lichtgeschwindigkeit« besitzt und in allen anderen Medien langsamer ist). Je flacher nun der Winkel, unter dem das Teilchen auf den Mond trifft, desto größer ist die Chance, dass die entstehende Strahlung dessen Oberfläche wieder verlässt und von einem Teleskop registriert werden kann.

Voraussetzung ist allerdings der seltene Fall, dass die ursprüngliche Energie der kosmischen Partikel mindestens einige  $10^{21}$  Elektronenvolt (eV) beträgt. Daher benötigt man eigentlich einen gewaltigen Detektor: Nutzte man den gesamten Mond als Detektorfläche, wäre das gerade groß genug. Mit einem bisschen Glück werden wir solche Ereignisse aber auch mit LOFAR messen können.



Beteiligt an all diesen Projekten sind heute auch viele deutsche astronomische Institute in Bochum, Bonn, Hamburg und Bremen sowie das Max-Planck-Institut (MPI) für Astrophysik, das MPI für Radioastronomie (MPIfR), das Astrophysikalische Institut Potsdam (AIP) und die Thüringische Landessternwarte in Tautenburg. Im vergangenen Jahr initiierten deutsche Wissenschaftler zwei weitere Schlüsselprojekte. Unter Leitung des Bonner MPIfR sollen erstmals magnetische Felder im intergalaktischen Raum mit Hilfe von Radiowellen nachgewiesen und ihr Ursprung ergründet werden. Das AIP hingegen will Radioausbrüche der Sonne sehr viel genauer vermessen als bisher möglich. Pro Bild der Sonne im Radiolicht werden dabei inklusive »Schwenken« nur wenige Sekunden benötigt, so dass sich jede Eruption genau verfolgen lässt.

Alle diese Projekte erfordern sehr hohe Rechenleistung und Datenübertragungsraten. Darum wird im digitalen Herzen des Teleskops, dem LOFAR-Rechenzentrum im niederländischen Groningen, gerade ein neuer Supercomputer installiert. Der Blue Gene/P, derzeit leistungsfähigstes Produkt des Computerkonzerns IBM, soll die Daten aller Antennen miteinander korrelieren und sie zu Bildern verarbeiten. Schon sein Vorgänger stand im LOFAR-Rechenzentrum und war mit 27 Teraflops (Billionen Gleitkommaoperationen pro Sekunde) zeitweise sogar Europas schnellster Computer.

Doch mit der Auswertung der Daten Tausender Einzelantennen wären beide Rechner überfordert. Daher fasst man die Antennen in lokale Felder (»Stationen«) mit je 48 Antennen zusammen. *Digital beamforming* (Kasten rechts) reduziert deren Daten auf den Datenstrom einer einzigen virtuellen Antenne, und nur dieser wird an den Superrechner weitergereicht.

Für den Frequenzbereich von 10 bis 80 MHz sind einfache Drahtantennen in Form einer Pyramide zuständig. Für kosmische Signale im UKW-Bereich von 87 bis 108 MHz ist in Europa kein Durchkommen möglich. Bei Frequenzen zwischen 110 bis 270 MHz arbeiten wir mit Antennenelementen aus je 16 gekreuzten Dipolen (»Kacheln«). Jede Kachel besitzt einen eigenen, analogen Beamformer, der schon mal die grobe Schichtung vorselektiert. Weil Kacheln platzsparend und einfacher zu errichten sind als Drahtpyramiden, kommen sie im höheren Frequenzbereich zum Einsatz, wo mehr Antennen pro Flächeneinheit nötig sind. Jede Station besitzt ein Antennenfeld pro Frequenzbereich und kann beliebig zwischen ihnen hin- und herschalten.

Ursprünglich wollten wir in den Niederlanden 77 Antennenfelder mit je 96 Einzelanten-

nen pro Frequenzband errichten. Weil die Entwicklung teurer geworden war als geplant, kam es im Sommer 2007 zu einem unangenehmen Kassensturz. Man beschloss, die Rechenkapazität beizubehalten, in den Niederlanden aber nur noch 36 Stationen mit je 48 Antennenelementen pro Frequenzband zu bauen. Dadurch geht zwar die Empfindlichkeit zurück, durch die kleineren Abmessungen der Antennenfelder vergrößert sich aber auch das Sichtfeld, so dass wir mehr Objekte gleichzeitig beobachten können. Die Geschwindigkeit, mit der sich der Himmel durchmustern lässt, sinkt also nur geringfügig.

Unterdessen nahte Unterstützung von anderer Seite. Ein europäisches Netzwerk wird bis zu 16 weitere LOFAR-Stationen mit der vollen Größe von 96 Antennen pro Station aufbauen. Vorreiter ist Deutschland, wo sich zehn Institute zu einem Konsortium zusammenschlossen und bald fünf Stationen in Betrieb sein werden. Die erste internationale LOFAR-Station ging Ende 2007 in Effelsberg in unmittelbarer Nähe des 100-Meter-Spiegels in Betrieb, weitere in Garching, Jülich, Potsdam und Tautenburg folgen bald. Die übrigen Stationen zeigt die Karte auf S. 27. Am Ende, so unsere Erwartungen, werden rund 3000 Pyramidenantennen und 50 000 gekreuzte Dipole über den Kontinent verteilt sein.

### Ein Fanhaar in der Nordkurve

Die Dichte der Stationen wird mit ihrem Abstand vom LOFAR-Kern abnehmen. Geplant sind sechs Stationen innerhalb eines Umkreises von 350 Metern, zwölf Stationen in bis zu zwei Kilometer Abstand, weitere 18 in bis zu 100 Kilometer Entfernung und bis zu 16 im restlichen Europa. Die Antennen im 350-Meter-Umkreis liefern bei einer Frequenz von 200 MHz eine Auflösung von 15 Bogenminuten, das entspricht gerade einmal dem halben Durchmesser des Mondes am Himmel. Nach außen hin wird die Auflösung immer besser. Bei zwei Kilometer Abstand zum Kern erreicht man schon 2,5 Bogenminuten, bei 100 Kilometer drei Bogensekunden und bei europäischen Stationen in bis zu 1000 Kilometer Entfernung liegt sie bei 0,3 Bogensekunden. Ein Fußballfan im Oberrang der Südkurve des Kölner Rheinenergiestadions mit einer solchen Sehstärke könnte jedes einzelne Haar eines Fans im Gastblock der Nordkurve sehen. Jetzt müssen Sie nur noch überlegen, wie viele Haare in ein Stadion passen, um zu erahnen, wie viele Radioquellen sich am Himmel unterscheiden lassen.

Nun gut, werden Sie denken. Aber all das soll mit einer Menge von Drähten und gekreuzten Stabantennen funktionieren? Kein

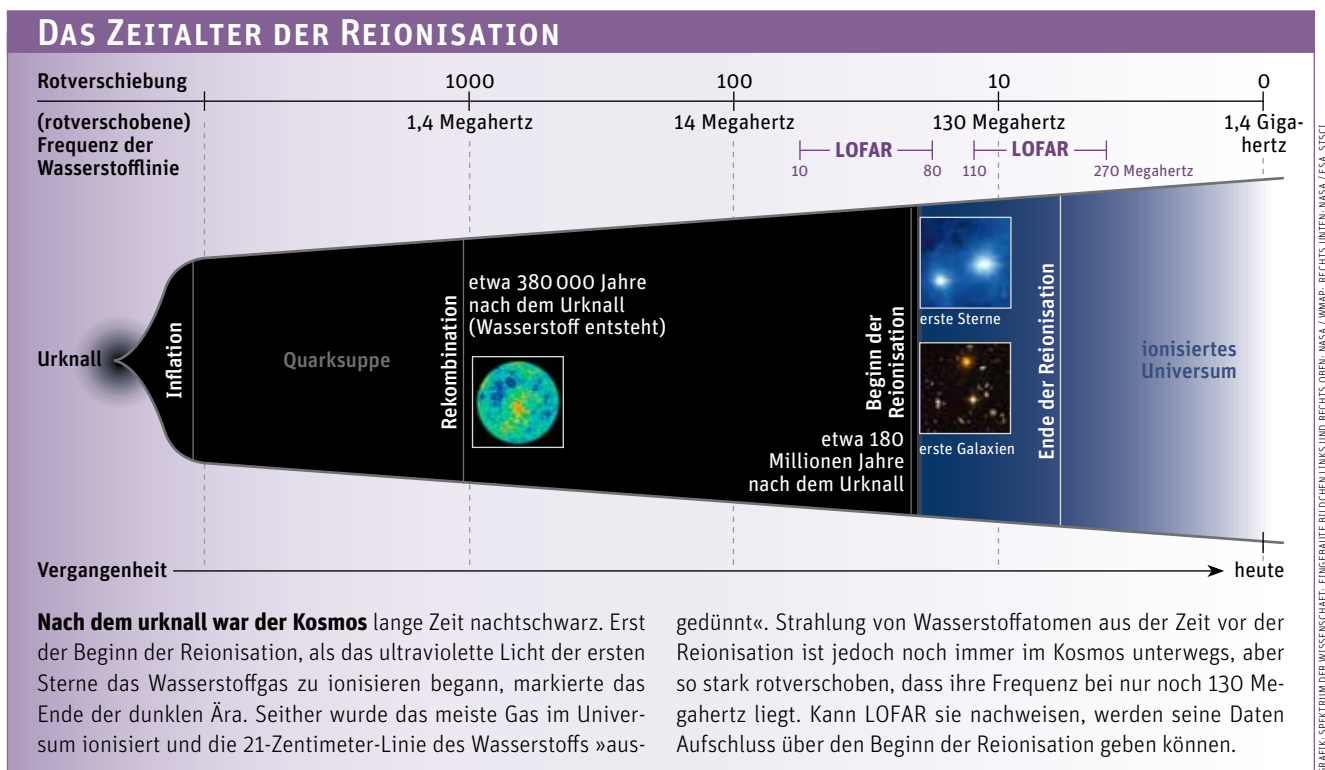
## ZIELEN MIT DER DIGITALEN RICHTKEULE

**Mathematisch betrachtet** nimmt der Teleskopspiegel an den einfallenden Wellen eine Fouriertransformation vor. Diese mathematische Methode spielt daher auch bei Aufnahmen im Radiolicht eine große Rolle. Zumindest die Richtcharakteristik eines *phased array* kann man sich aber auch ohne Fourier-Mathematik verdeutlichen. Stellen wir uns eine kleine helle Radioquelle in sehr großem Abstand von der Erde vor. Ihre Radiowellen treffen als ebene Wellenfronten auf der Erde ein. Steht die Radioquelle genau senkrecht über einem ebenen Antennenfeld, erreichen ihre Wellen die Antennen überall gleichzeitig. Wandert die Radioquelle durch die Erddrehung nun ein Stück zur Seite, zum Beispiel nach Westen, treffen auch die Wellen von der Seite ein, erreichen eine Antenne im Westen des Felds also früher als eine im Osten. Man müsste das Antennenfeld daher entsprechend kippen, um die Strahlen zu fokussieren.

**Doch die Zeitverzögerung zwischen den Ankunftszeiten** ist geometrisch durch die Einfallsrichtung der Welle, den Abstand der Antennen und die Lichtgeschwindigkeit genau festgelegt. Man kann also, statt das Feld zu kippen, die Zeitverzögerung kompensieren. Im Rechner verschiebt man hierzu die gespeicherten digitalen Datenströme der beiden Antennen um einen entsprechenden Faktor gegeneinander und addiert sie dann, lässt also virtuelle Wellen miteinander interferieren. Die Signalanteile, die aus der vorgegebenen Richtung kommen, addieren sich dabei konstruktiv, weil ihre Wellenberge und Wellentäler genau aufeinanderliegen. Signale aus anderen Richtungen mitteln sich hingegen weg, weil Wellenberge und -täler in zufälliger Weise verteilt sind und sich gegenseitig aufheben. Dieser statistische Prozess ist natürlich umso effektiver, je mehr einzelne Antennen miteinander kombiniert werden. Schließlich erhält man ein Antennenfeld, dessen Richtempfindlichkeit man sich als keulenförmigen Sehstrahl vorstellen kann. Der Öffnungswinkel der Keule wird kleiner, wenn der Radius des Antennenfelds wächst oder die Frequenz zunimmt.

**Der Vorteil dieser digitalen Richtkeulenbildung** (*digital beamforming*) ist enorm. Keine Mechanik schaltet so schnell und flexibel wie ein Computer. Große schwerfällige Stahlkonstruktionen lassen sich durch große Rechenleistung ersetzen – und durch simple Drähte, die nicht einmal bewegt werden müssen. Daher können Beobachter sogar von kosmischen Teilchen ausgelöste Radioblitze entdecken, die nur wenige milliardstel Sekunden dauern. Ein Teleskop aus Stahl und Eisen müsste sich zu diesem Zweck schneller drehen als es Einstein erlaubt. Ein virtuelles Teleskop speichert stattdessen einfach die Strahlung des ganzen Himmels – und wer will, kann im Nachhinein einfach noch mal genauer in eine bestimmte Richtung schauen.

tonnenschwerer Stahlkoloss, sondern eine Software? Das (englische) Zauberwort heißt *phased array*. Das Prinzip solcher phasengesteuerter Antennenfelder ist aus der Radartechnik bekannt, wird heute aber dank leistungsfähiger Computer selbst den hohen Ansprüchen der Astronomen nach Flexibilität und Frequenzbreite gerecht. Phasengesteuerte Antennenfelder benötigen zwar noch immer reale Antennen, die aber werden auf das absolut Notwendige reduziert. Das grundlegende Radioempfangselement ist eine Dipolantenne: im Wesentlichen zwei in einer gemeinsamen Achse angeordnete Metallstäbe oder -drähte, in denen Ladungsträger durch eintreffende elektromagnetische Wellen zum Schwingen entlang



**SAMMELFLÄCHE**

Die effektive Sammelfläche, auf der ein gekreuzter Dipol Strahlung registriert, beträgt ungefähr die halbe beobachtete Wellenlänge zum Quadrat. Beobachtungen bei einer Wellenlänge von zwei Metern (150 MHz) machen daher schon zehntausende Dipole erforderlich. Die 36 niederländischen LOFAR-Stationen weisen in diesem Bereich eine Sammelfläche von rund 30 000 Quadratmetern auf. Die geplanten 16 internationalen LOFAR-Stationen werden 20 000 weitere Quadratmeter hinzufügen.

der Dipolrichtung angeregt werden. Der so entstehende Wechselstrom lässt sich in der Mitte zwischen den Dipolhälften abgreifen, verstärken und messen.

Allerdings empfangen Dipolantennen Strahlung fast immer gleich gut, egal aus welcher Himmelsrichtung sie kommt. Sie eignen sich also kaum, um den Ursprungsort bestimmter Quellen festzustellen, so dass wir zusätzlich eine Richtcharakteristik benötigen. Bei einem Radioteleskop alter Schule, das wie eine Satellenschüssel funktioniert, werden die Radiowellen von der Schüssel reflektiert und im Brennpunkt fokussiert. Weil nur Wellen aus einer bestimmten Richtung den Brennpunkt treffen, lässt sich so die Strahlungsintensität an der entsprechenden Stelle des Himmels messen. Durch leichtes Schwenken oder Nicken der Schüssel streicht die Richtungskeule des Teleskops über die Radioquelle hinweg, wodurch sich deren Intensitätsverteilung bestimmen lässt. Im Prinzip ist ein normales Radioteleskop also nur ein Ein-Pixel-Scanner und daher sehr ineffektiv, um große Himmelsgebiete abzubilden.

Ein digitales *phased array* ersetzt die große reflektierende Schüssel durch ein Feld (*array*) einzelner kleiner Antennen, die jede für sich fast den ganzen Himmel auf einmal erfassen. Die elektromagnetische Welle wird nicht mehr an der Teleskopoberfläche reflektiert, sondern von den Dipolen direkt in Strom- und Spannungsschwankungen umgesetzt. Gott sei Dank sind Radiowellen so energiearm, dass man sie

als klassische Wellen betrachten und daher auch exakt in digitaler Form speichern kann. Danach, und das ist der Clou, ist eine Schüssel überflüssig, denn nun können wir die Radiowellen gewissermaßen digital verlängern und in einem virtuellen Brennpunkt miteinander kombinieren. Weil sich digitale Kopien nicht abnutzen, lässt sich dieser Vorgang beliebig oft wiederholen und der Brennpunkt am Himmel nach Wunsch verschieben. Mit einer einzigen Messung können wir also in viele Richtungen gleichzeitig schauen.

**»Dunkle« Fenster in der Galaxis**

Dank dieser Technik und einer Sammelfläche von einigen zehntausend Quadratmetern (siehe Kasten links) besitzt LOFAR enorme Fähigkeiten, um den Kosmos im Radiolicht zu untersuchen. Mit Hilfe der berühmten 21-Zentimeter-Linie des Wasserstoffatoms könnten wir sogar eindeutige Hinweise darauf finden, wann und wie der Übergang von einem dunklen Kosmos zu unserem heutigen leuchtenden Universum verlaufen ist.

Wasserstoff ist das häufigste Element im Kosmos. Letztlich entstanden alle Sterne und Galaxien aus großen Wasserstoffwolken. Quantenmechanisch betrachtet kann das Elektron im Wasserstoffatom zwei Spin-Zustände mit je unterschiedlicher Rotationsachse und geringfügig unterschiedlichen Energieniveaus besitzen. Dreht sich der Spin eines Elektrons um, weil es zum Beispiel mit einem anderen Teilchen kollidiert, gleicht das System die Energie-

differenz aus, indem es ein Photon entsprechender Energie absorbiert oder emittiert. Solche Photonen besitzen eine Frequenz von 1,4 GHz und tauchen im Radiospektrum als scharfe Linie bei der entsprechenden Wellenlänge von 21 Zentimetern auf.

Die 21-Zentimeter-Linie lässt sich zwar auch mit klassischen Radioteleskopen entdecken, dann nämlich, wenn sich das beobachtete Wasserstoffgas in unserer kosmischen Umgebung befindet. Beobachtet man aber weit entfernte Objekte aus der kosmischen Frühzeit, ist deren Licht stark rotverschoben. Die Rotverschiebung, also das Verhältnis zwischen Frequenzverschiebung und gemessener Frequenz, wird mit dem Parameter  $z$  angegeben. Der erste Wasserstoff entstand ungefähr 400 000 Jahre nach dem Urknall, seine Strahlung weist eine Rotverschiebung  $z$  von etwa 1000 auf.

Während der ersten Milliarde Jahre begann sich der Wasserstoff unter dem Schwerkraft-einfluss Dunkler Materie zusammenzuballen und bildete die ersten Sterne und Galaxien. Kaum waren die ersten Sterne entstanden, zerstörten sie aber schon den Stoff, aus dem sie gemacht waren: Ihre heiße ultraviolette Strahlung begann, die Wasserstoffatome zu ionisieren. Die Epoche, in der das geschah, nennt man das Zeitalter der Reionisation (siehe Bild links), man vermutet sie bei einer Rotverschiebung von etwa 10. Während alle jüngeren kosmischen Regionen komplett ionisiert sind, müsste die (stark rotverschobene) Wasserstofflinie aus der Zeit vor der Ionisierung bei einer Frequenz von rund 130 MHz noch sichtbar sein. Doch die erwartete Radiostrahlung ist so schwach, dass ein Teleskop die Sammelfläche (siehe links) zweier Fußballfelder benötigt, um sie zu entdecken. LOFAR bringt diese Fläche allein in seinem Kern auf. Zusätzlich aber wird die Radiostrahlung von viel stärkeren Signalen etwa aus der Milchstraße überlagert. Wir müssen also nach Fenstern suchen, in denen die Galaxis besonders schwach strahlt.

Zur großen Überraschung der ersten Radioastronomen erwies sich auch die kosmische Synchrotronstrahlung als wichtige Quelle von Strahlung niedriger Frequenzen. Sie entsteht, wenn energiereiche Elektronen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit durch ein Magnetfeld rasen und von diesem durch die Lorentz-Kraft auf eine Spiral- oder Kreisbahn gezwungen werden. Weil die Elektronen dabei in Richtung des Kreisentrums beschleunigt werden und beschleunigte Ladungen immer strahlen, führt dieses Phänomen bei hohen Energien zur Synchrotronstrahlung. Besonders interessant ist deren steiles Spektrum: Hin zu niedrigen Frequenzen wird sie schnell intensiver und ist daher im Radiobereich besonders gut zu sehen.

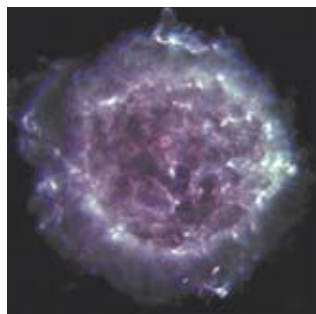
## SCHÖNHETEN IM RADIOLICHT

Vieles, was im Optischen unsichtbar bleibt, enthüllen Aufnahmen im Radiowellenbereich. Eine kleine Auswahl:



REISE BOONSKA, UNIVERSITÄT GRONINGEN

**1** Die Galaxie NGC 6946 im Licht der 21-cm-Linie des Wasserstoffs. Helle blaue Gebiete stehen für hohe, dunkle Stellen für niedrige Gasdichten. Die runden Blasen könnten das Ergebnis von Teilchenwinden sein, die von massereichen Sternen oder Supernovae ausgehen. Die Spiralarme aus Wasserstoffgas reichen weit über das optische Bild (weiße Bereiche in der Mitte) hinaus.



MRAO / AUI, L. RUDNICK, T. DELANEY, J. KORHANE & B. KORHANE

**2** Cassiopeia A ist eine der hellsten Radioquellen am Himmel, nachdem dort vor über 300 Jahren ein Stern als Supernova explodierte. Die Radioaufnahme ist eine Überlagerung von Aufnahmen bei drei Frequenzen (1,4, 5,0 und 8,4 Gigahertz). Die hellen Bereiche markieren Materie, die sich seit der Explosion nach außen bewegt.



## wichtige onlineadressen

- ▶ **Brainlogs**  
Blogs für die Welt im Kopf  
[www.brainlogs.de](http://www.brainlogs.de)
  
- ▶ **Foto-Scout-Zuse**  
Die lernende Bildsuchmaschine für Ihren PC.  
[www.foto-scout-zuse.com](http://www.foto-scout-zuse.com)
  
- ▶ **Kernmechanik – von Kernspin bis Kosmologie, von Dunkler Materie und Energie**  
[www.kernmechanik.de](http://www.kernmechanik.de)
  
- ▶ **KOSMOpod**  
Astronomie zum Hören  
[www.kosmopod.de](http://www.kosmopod.de)
  
- ▶ **Portraits, Interieurs, Landschaften, Figurativa u. a.**  
Dipl.-Des. Ewa Kwasniewska  
– Kunstmalerin –  
[www.kwasniewska.com](http://www.kwasniewska.com)
  
- ▶ **Die neue Art zu Präsentieren**  
Wissenschaft verständlich erklären  
Projekte überzeugend präsentieren  
[www.präsentationscoach.de/wissenschaft](http://www.präsentationscoach.de/wissenschaft)

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing  
Susanne Förster  
Telefon 0211 61 88-563  
E-Mail: [s.foerster@vhb.de](mailto:s.foerster@vhb.de)



## LOFAR AUF DEM MOND

**Für Radioastronomen sind sie ein Ärgernis:** die freien Elektronen in den obersten Schichten unserer Atmosphäre. In der turbulenten Ionosphäre nämlich werden Radiowellen im Frequenzbereich oberhalb von 10 bis 30 Megahertz an ihnen gebrochen. Kosmische Radioquellen beginnen dann, scheinbar am Himmel hin- und herzuwandern – das Seeing, wie Astronomen sagen, wird schlechter. Dieser Effekt ist auch von optischen Wellenlängen bekannt, wenn ferne Autoscheinwerfer über heißem Asphalt flackern oder Sterne am Nachthimmel »blinken«. Je niedriger die Frequenz, desto stärker der Effekt. Bei LOFAR muss er mit digitaler adaptiver Optik mühsam herauskalibriert werden, doch auch diese Maßnahme hat ihre Grenzen. Für hochpräzise Vermessungen der kosmischen Epoche der Reionisation, als das Licht der ersten Sterne die Wasserstoffatome in ihrer Umgebung ionisierte, wird das Seeing ein limitierender Faktor sein.

Unterhalb von 10 bis 30 MHz, abhängig von Tageszeit und Sonnenaktivität, lässt sich der Radiohimmel überhaupt nicht untersuchen, denn bei diesen Frequenzen wirkt die Ionosphäre wie ein gigantischer, erdumspannender Spiegel, der die einfallende Radiostrahlung vollständig reflektiert.

**Die einzige Möglichkeit,** Probleme mit dem Radio-Seeing und der Reflexion in der Ionosphäre zu vermeiden, ist der Bau eines Radioteleskops im Weltraum – eines ziemlich großen, denn lange Radiowellen verlangen nach großen Teleskopen. Doch selbst das ist noch keine gute Lösung, denn schon die ersten Satellitenexperimente zeigten, dass die Erde im niederfrequenten Bereich selbst stark strahlt. Ein Radioteleskop wäre im Erdorbit also kaum besser untergebracht als ein optisches Teleskop auf der Sonne, da es in beiden Fällen niemals »Nacht« würde.

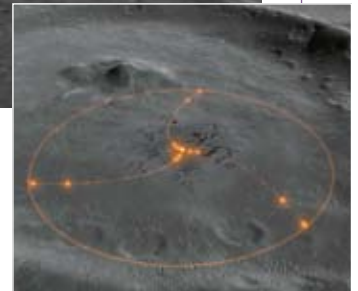
Der beste Platz für ein Langwellenteleskop ist daher die Rückseite des Mondes. Dort ist der Untergrund stabil genug, um Antennen zu tragen, der Boden hat optimale dielektrische Eigenschaften, so dass man Antennen einfach flach auf dem Boden auslegen kann, und das Teleskop ist vor allen künstlichen und natürlichen Störstrahlungen der Erde (und für die Hälfte der Zeit auch vor jenen der Sonne) geschützt. Die Mondrückseite ist also eine perfekte radioleise Umgebung und wurde von der Internationalen Fernmeldeunion darum schon als Radio-schutzzone für die Astronomie ausgewiesen.

**Gemeinsam mit Experten** des europäischen Raumfahrtunternehmens EADS Astrium und niederländischen Kollegen führte ich in den letzten Jahren eine Machbarkeitsstudie durch. Wir wollten herausfinden, welche astronomischen Vorhaben sich auf dem Erdtrabant realisieren ließen. Das Prinzip von LOFAR, so zeigte sich, wäre ideal geeignet. Die Europäer könnten ein »Lunar LOFAR« mit rund 30 Kilometer Durchmesser, bestehend aus bis zu 33 einzelnen Antennen und ausgelegt für Beobachtungen unterhalb von 30 MHz, mit einer einzigen Ariane-V-Rakete auf den Mond transportieren. Das Teleskop selbst würde rund 400 Kilogramm wiegen – gerade mal ein Drittel der Nutzlast, die eine für den Flug auf der Ariane konzipierte Mondlandefähre transportieren kann. Ein kleiner robotischer Rover



BEIDE ILLUSTRATIONEN: LUNAR LOFAR

**Robotische Rover verlassen eine Mondlandefähre, um Dipolantennen auszulegen, zum Beispiel im Krater Daedalus auf der Mondrückseite. Ein erstes »Lunar LOFAR« könnte schon im nächsten Jahrzehnt errichtet werden (Illustration).**



würde die Antennendrähte auslegen. Nicht einmal der Mondstaub würde Probleme bereiten, denn bewegliche mechanische Elemente sind überflüssig. Die bislang größte Herausforderung für ein Mondteleskop ist jedoch seine Energieeffizienz. Tagsüber lässt sich die nötige Leistung von rund einem halben Kilowatt problemlos generieren. In der zweiwöchigen Mondnacht könnten herkömmliche Batterien dies aber nicht leisten, dann müsste die Beobachtungszeit stark eingeschränkt werden.

**Derzeit prüft die Europäische Weltraumorganisation Esa** in einer Machbarkeitsstudie die Möglichkeit, eine kleine Mondlandefähre am lunaren Südpol abzusetzen, die unter anderem ein aus zwei Antennen bestehendes Radiointerferometer (»Lunar Radio Explorer«) an Bord hat. Der Plan: Eine Radioantenne bleibt auf der Landefähre zurück, die andere entfernt sich auf dem Rover immer weiter. Im Lauf einiger Monate würde die Bewegung des Rovers auf dem sich drehenden Mond zu einer Spiralfigur im Raum führen. So ließe sich erstmals ein Radiobild des gesamten Südhimmels bei niedrigen Frequenzen aufnehmen. Schon mit relativ wenig Aufwand könnte die Astronomie so vollkommenes Neuland betreten.

Jüngst gab auch die US-Weltraumbehörde NASA eine Vorstudie in Auftrag. Ein Teleskop auf dem Mond, das noch größer ist als LOFAR, soll den Urwasserstoff im »dunklen Zeitalter« des Universums, also noch vor der Geburt der ersten Sterne, im Detail vermessen. Theoretische Überlegungen weisen nämlich darauf hin, dass in diesen Radiosignalen die entscheidenden Parameter des frühen Universums mit großer Präzision eingebrennt sind. Die Anzahl der für diese Messungen benötigten Antennen ist wegen der erforderlichen Empfindlichkeit allerdings sehr groß. Auf ein Riesenmondteleskop darf man daher nicht ungeduldig warten. Kleine Vorläufer aber könnten vielleicht schon im nächsten Jahrzehnt ihren Betrieb aufnehmen.

H.F.



Mit dem »Square Kilometre Array« (SKA) ist bereits die nächste Generation von Radioteleskopen in Planung. Ab 2012 sollen kleine Radioschüsseln (Hintergrund) und weiterentwickelte Dipolantennen nach LOFAR-Vorbild (Vordergrund) in Australien oder Südafrika verteilt werden. Das Bild zeigt die schon für 2015 geplante Kernstation mit etwa fünf Kilometer Durchmesser.



ILLUSTRATION: SKA PROJEKTBURO / ALIUSTUDIOS



**Heino Falcke** lebt in Frechen bei Köln und ist Professor für Radioastronomie und Astroteilchenphysik an der niederländischen Radboud-Universität Nijmegen und am Niederländischen Forschungsinstitut ASTRON. Vorige Stationen waren die Universität Bonn, das MPI für Radioastronomie (MPIfR) sowie Universitäten in Arizona und Maryland. Falcke wirkt seit Beginn an der LOFAR-Entwicklung mit, er hatte auch den Bau des Prototyps LOPES angeregt und geleitet und gehört dem Team des MoonNext-Projekts der Esa an. Er veröffentlichte rund 300 theoretische Arbeiten etwa über die Physik Schwarzer Löcher. **Rainer Beck** lebt in Bornheim bei Bonn und ist seit 1980 wissenschaftlicher Mitarbeiter am MPIfR und Experte für kosmische Magnetfelder. Er ist LOFAR-Projektwissenschaftler am MPIfR, Sekretär des »German Long Wavelength Consortium« und leitet das LOFAR-Schlüsselprojekt »Kosmischer Magnetismus«. In einem inter-nationalen Wissenschaftlerteam erarbeitet er zudem Spezifikationen für das SKA.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/957491](http://www.spektrum.de/artikel/957491).

zeugen Radiowellen. Da bei Frequenzen um 100 MHz die Wellenlänge mit rund drei Metern größer ist als die Dicke des Emissionsgebiets, wird diese Strahlung kohärent verstärkt. Die Folge ist ein Blitz, der im Radiobereich tausendmal heller leuchtet als die Sonne, nur ein Hunderttausendstel so lange dauert wie ein Gewitterblitz und genaue Informationen über das auslösende Teilchen enthält.

Die ersten 96 Antennen, die das Zentrum des LOFAR-Teleskops bilden, stehen nun in der Nähe des kleinen Städtchens Exloo in der niederländischen Provinz Drenthe, 20 Kilometer westlich der deutschen Grenze. Hier ebenso wie in Effelsberg laufen bereits erste Tests. Die nächsten 19 niederländischen sowie Felder in Deutschland, England, Frankreich und Schweden wurden gerade in Auftrag gegeben. Bis Ende 2010 folgen die weiteren Stationen. Ab 2009, noch während das Teleskop wächst, sind aber schon Beobachtungen möglich.

### Wie eine Installation von Christo

Leider wird am Ende keine große Schüssel zu sehen sein, die sich majestätisch über unsere Köpfe hinwegbewegt. Nur ein paar stumme Drahtantennen und merkwürdig verpackte flache Antennenkacheln, die eher an eine künstlerische Installation von Christo als an ein Radioteleskop erinnern, zeugen dann von LOFAR. Unscheinbar ist auch dessen vier Quadratkilometer großer Kern. In den letzten Jahren diente das Gebiet als Ackerland, nun sollen seine ungenutzten Bereiche in ein Naturgebiet zurückverwandelt werden. Die eigentliche Arbeit wird anderswo stattfinden: Verteilt über ganz Europa dürften Wissenschaftler schon bald nervös an ihren Bildschir-

men sitzen, auf die ersten Daten warten und über die unzähligen Software-Bugs schimpfen, die von einem virtuellen Teleskop zu erwarten sind. Trotzdem hoffen sie alle, etwas völlig Neues und Unerwartetes zu entdecken – denn eins ist klar: Ein Teleskop mit solch vielfältigen Möglichkeiten besaß bislang noch niemand.

Doch LOFAR wird nicht das einzige Teleskop dieser Art bleiben. Zurzeit bauen Kollegen aus den USA, Australien und Indien das Murchison Widefield Array in Australien. Es besitzt zwar weniger Antennen, ist aber ausschließlich für die Untersuchung der Reionisation ausgelegt. Darüber hinaus arbeiten Radioastronomen schon an der nächsten LOFAR-Generation. Das »Square Kilometre Array« SKA, das ab 2012 in Südafrika oder Australien entstehen könnte, soll eine Sammelfläche von einem Quadratkilometer besitzen und aus kleinen Radioschüsseln und LOFAR-ähnlichen *phased arrays* bestehen (siehe Bild oben). Damit wird man noch weiter in die Tiefen des Weltalls vorstoßen als jemals zuvor und Dinge sehen, die uns kein optisches Teleskop je zeigen könnte.

Bei Frequenzen unterhalb von 10 MHz existiert aber auch künftig ein weiter und bis heute völlig unerschlossener Bereich, denn ab dieser Grenze wird die Ionosphäre der Erde undurchsichtig. Wollen wir das Universum bei den längsten Wellenlängen beobachten, müssen wir LOFAR eines Tages im Weltraum bauen – am besten auf der Rückseite des Mondes (siehe Kasten S. 33). Sollte die geplante Rückkehr zu unserem nächsten Nachbarn im Weltraum Wirklichkeit werden, dann könnte es sein, dass LOFAR irgendwann auch auf den Mond geschossen wird. ◀