

## Liebe Leserin, lieber Leser,

vor 100 Jahren wurde Alfred Charles Bernard Lovell (1913–2012) geboren. Ihm war ein langes Leben beschieden. Er verstarb im August vorigen Jahres im 99. Lebensjahr. Der Radar- und Radioastronom ist der Gründer des Jodrell-Bank-Radioobservatoriums im englischen Cheshire. Wie man hört, verdankt der 76-m-Spiegel nahe Manchester seine Fertigstellung dem „Sputnikschock“ des Jahres 1957. Wegen explodierender Kosten drohte das Projekt zu scheitern. Kaum umkreisten der erste russische Erdsatellit und die Endstufe seiner Trägerrakete die Erde, bekam es der Westen mit der Angst zu tun. Allein Lovells Riesenspiegel, betrieben als Radar, war damals in der Lage, ballistische Raketen zu orten.

Sir Bernard sorgte zu Zeiten des „Wettlaufs zum Mond“ für Schlagzeilen. 1963, Lovell besuchte die sowjetische Satellitenempfangsstation auf der Krim, versuchten die Sowjets ihn durch ein lukratives Angebot zum Bleiben zu bewegen. Drei Jahre darauf stahl er ihnen die Schau, indem er von Jodrell Bank abgefangene Funkbilder (Telefaxe) der Mondoberfläche veröffentlichte, vorschnell, wie die sowjetische Seite verärgert feststellte. Ein Boulevardblatt titelte damals gehässig, die „Russen“ wären die letzten gewesen, die die Bilder zu sehen bekommen hätten. Luna 9 war die erste Raumsonde, die auf einem außerirdischen Himmelskörper weich aufsetzte. Jodrell Bank erwies sich als nützlich für die „Russen“, bestätigten doch die distanzierten Briten die Anfangserfolge der sowjetischen Raumfahrt!

Lovells radioastronomische Karriere hatte, wie die vieler seiner Kollegen, im 2. Weltkrieg als Radartechniker begonnen.

Wir nehmen den 100. Geburtstag des „Isaac Newton der Radioastronomie“<sup>1</sup> zum Anlass, nachzufragen, worin sich die Radioastronomie von der optischen unterscheidet. Es geht um Technisches, was nicht jedermanns Sache . . .

Viele Auguststernschnuppen wünscht Ihnen

Ihr Hans-Erich Fröhlich

---

<sup>1</sup>So betitelte Sir Patrick Moore, Englands bekanntester Astronom, Sir Bernard.

## Der Himmel im August

Venus ist Abendstern. Saturn verschwindet mit der Abenddämmerung.

Merkur, Mars und Jupiter sind etwas für Frühaufsteher. Beim Merkur gilt dies mit Einschränkung: Er ist lediglich Anfang des Monats zu sehen. Am 24. August befindet er sich schon wieder hinter der Sonne. Er ist wirklich flink der Kleine.

Die ganze Nacht über zu sehen ist nur der Neptun. Er steht – wen wundert's? – im Wassermann. Trotz seiner Opposition am 27. August erreicht der im September 1846 am Himmel über Berlin aufgefundene Planet lediglich 8te Größe.

Das jährliche Sternschnuppenmaximum wird wieder um den 12. August herum erwartet. Die Perseiden sind der bekannteste Meteorstrom. Er produziert besonders viele helle Meteore.

## Licht- und Radioastronomie – Gemeinsamkeiten und Unterschiede

Was wir vom Weltenraum mitbekommen, verdanken wir den elektromagnetischen Wellen. Günstigstenfalls vermögen wir bis zum „Rand“ des Universums zu schauen, zurück bis zu jenem Zeitpunkt als das sich ausdehnende und abkühlende Universum schlagartig durchsichtig wurde. 380 000 Jahre lang war das jugendliche All erfüllt gewesen von heißem Plasma und für elektromagnetische Wellen undurchdringlich<sup>2</sup>.

Elektromagnetische Wellen unterscheiden sich nur hinsichtlich ihrer Wellenlänge. Der erforschbare Bereich – von der kurzwelligen Gamma- und Röntgenstrahlung bis hin zu den langwelligen Radiowellen – umfasst, ins Akustische übersetzt, nahezu 50 Oktaven<sup>3</sup>! Eine einzige Oktave davon, von (etwas unterhalb von) 400 nm bis (nicht ganz) 800 nm, vermag das Auge anzusprechen! Dies ist der Bereich des sichtbaren Lichts und der Tummelplatz des

---

<sup>2</sup>Aus dem gleichen Grund kann man nicht ins Innere der Sonne schauen. Die Sonne ist ein heißer und undurchsichtiger Gasball. Die Sonnenstrahlung, die uns jetzt erreicht, entstand als weiche Röntgenstrahlung im Zentrum der Sonne als die ersten Menschen die Erde bevölkerten! So lange dauert es, bis sich die Energie durch den undurchsichtigen Sonnenball hindurchgekämpft hat und ins Freie entweichen kann.

<sup>3</sup>Eine Oktave entspricht auf der Klaviatur einer Frequenzverdopplung.

optischen Astronomen mit seinen Fernrohren. Was er zu sehen bekommt, ist ein Temperaturexausschnitt des Kosmos, alles, was etwa so heiß wie die Sonnenoberfläche ist bzw. Strahlung dieser Farbtemperatur reflektiert, also Sterne, Planeten, Emissionsnebel wie der Orionnebel. Der „eiskalte“ wie der extrem „heiße“ Kosmos ist dem optischen Astronomen verwehrt. Darum kümmern sich Radio- und Röntgenastronomen.

Haben Sie sich auch schon gefragt, wieso große Radioschüsseln wie das Effelsberg-Teleskop oft eingekesselt in Tälern stehen? Damit versucht man lediglich, sich vor dem zivilisationsbedingten Radiolärm zu schützen! Im extrem kurzwelligem Radiobereich, bei mm- und sub-mm-Wellen, ist der Radioastronom gezwungen, wie sein optischer Kollege, auf hohe Berge bzw. Hochebenen auszuweichen, um der Absorption der kostbaren Wellen durch den Wasserdampf im untersten Stockwerk der Atmosphäre zu entkommen.

Wesentlicher ist der Unterschied bei der Empfangstechnik.

Während der optische Astronom, geht es um den Nachweis von Licht, den *Quanten*charakter zu spüren bekommt – seine CCD sind sog. „quadratische“ Empfänger, d. h. sie registrieren die *Energie* der einfallenden Photonen –, beutet der clevere Radioastronom mit seinen Antennen die *Welleneigenschaften* aus. Ein Radioempfänger unterscheidet zwischen Wellenberg und -tal, der Lichtempfänger nicht!

Man könnte meinen, es sei der Welle-Teilchen-Dualismus, der die Sparten trennt! Jeder Welle haftet bekanntlich Teilchenhaftes an und jedem Teilchen Wellenhaftes. Auch wenn beides nicht zusammenzugehen scheint (und auch niemals gleichzeitig beobachtet wird) – ein Teilchen ist punktuell und damit lokalisierbar, eine Welle nicht –, dieses verwirrende „Sowohl-als-auch“<sup>4</sup> verfolgt den Physiker seit dem 17. Jh. und ist eine Erfahrungstatsache.

Kommt es dem Radioastronomen nicht auf die genaue Wellenlänge der Radiostrahlung an, die er misst, macht er es wie sein Kollege von der optischen Fakultät, er registriert mit einem Bolometer die geringfügige Erwärmung beim Verschlucken von Radio„photonen“. Die Information über die Phase, den Ort des Wellenkammes der begleitenden Radiowelle, geht dabei verloren. Man kann nicht beides haben.

---

<sup>4</sup>Der Wirklichkeit, wie sie sich uns darstellt, eignet etwas mathematisch Abstraktes: Ein Teilchen, egal ob Elektron oder Lichtquant, scheint von einer fiktiven Welle „geführt“ zu werden, deren Amplitudenquadrat ein Maß für seine Aufenthaltswahrscheinlichkeit ist. Natürliche Photonen schlagen deshalb nie völlig zufällig ein. Sie kommen, betrachtet man kurze Zeiträume, in „Bündeln“.

## Wenn die Wellennatur von Vorteil ist

Das Winkelaufklärungsverm6gen eines Radioteleskops ist notorisch schlecht, schlechter als das des unbewaffneten Auges! Das liegt an der *relativen* „Kleinheit“ selbst gro1er Teleskope wie der 76-m-Schüssel von Jodrell Bank. „Klein“ meint in Bezug auf die Beobachtungswellenlänge! Ein Radio„auge“ bei 5 GHz mit vergleichbarem Winkelaufklärungsverm6gen wie das menschliche Auge ma1e zwei Kilometer!

Wellen gleicher Wellenlänge k6nnen einander durch destruktive Interferenz ausl6schen, vernichten: wenn Wellenberg auf Wellental trifft. Das nutzt man aus. Durch Zusammenschalten von mindestens zwei Radioteleskopen zu einem sog. Interferometer lässt sich – wegen der Ausl6schung unerwünschter Wellenzüge, was im Gegenzug die erwünschten verstärkt – die Trennschärfe, also die Winkelaufklärung von Radioquellen am Himmel, dramatisch verbessern. Sie entspricht letztlich der eines Einzelteleskops von der Gr61e des Antennenabstands! Eine hinreichend hohe Aufl6sung, sprich Positionsgenauigkeit, ist erforderlich, um Radioquellen mit optischen Objekten zu identifizieren oder 6berhaupt erst einmal vor dem Hintergrund eines diffusen Radiorauschens erkennen zu k6nnen.

Bei Verwendung von vielen Einzelteleskopen, wie bei ALMA oder LOFAR, lassen sich regelrechte Radiobilder mit hoher Winkelaufklärung aus den Radiodaten rekonstruieren<sup>5</sup>. Die Bildgr61e entspricht dem Aufl6sungsverm6gen eines Einzelteleskops, die Bildschärfe dem Aufl6sungsverm6gen eines gedachten Teleskops vom Ausma1 der Anlage, bei ALMA bis zu 16 km.

Nur nebenbei bemerkt: Linse oder Spiegel eines Einzelteleskops kann man sich aus sehr vielen Linsen- bzw. Spiegelsegmenten zusammengesetzt denken. Die vielen „Teileteleskope“ mit schlechtem Aufl6sungsverm6gen arbeiten als Interferometer konstruktiv zusammen und erreichen dadurch insgesamt ein gutes Aufl6sungsverm6gen.

Um mehrere Einzelteleskope 6ber riesige Entfernungen hinweg als Interferometer zu betreiben – man spricht von *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI) –, m6ssen die Geräte noch nicht einmal 6ber Kabel oder Funk in Echtzeit miteinander verbunden sein. Man kann die mit hoher Zeitaufklärung registrierten (und mit Zeitmarken von Atomuhren versehenen) Einzelmessungen getrennt aufzeichnen und im Nachhinein im Computer numerisch

---

<sup>5</sup>Ein einzelnes Radioteleskop erzeugt kein Bild, es sei denn es rasterte Punkt f6r Punkt den Radiohimmel ab.

zur Korrelation bringen. Voraussetzung ist natürlich, dass die Phaseninformation beim Aufzeichnen erhalten bleibt. Wellenberge und -täler müssen erkennbar bleiben! Der Erddurchmesser stellt inzwischen keine Obergrenze für die Größe derartiger Interferometer mehr dar. Radioteleskope auf Raumflugkörpern operieren losgelöst von der Erde im All.

## Der „Super“ fürs Optische

Von all dem konnten optische Astronomen bislang nur träumen. Es gibt keine Elektronik für den sichtbaren Bereich – beim UV beginnt der Peta-Hertz-Bereich ( $1 \text{ PHz} = 1\,000\,000 \text{ GHz}$ )! –, geschweige Recorder mit einer Zeitauflösung von einer Femtosekunde ( $1 \text{ fs} = 0,000\,000\,000\,000\,001 \text{ s}$ ) und darunter. Trotzdem wird auf optischem Gebiet, vor allem im nahen Infraroten, mächtig aufgeholt.

Seit über 100 Jahren kennt die Radiotechnik den Superheterodynempfänger, den „Super“<sup>6</sup>. Eine Radiowelle veranlasst Elektronen in der Antenne (im Brennpunkt des Parabolspiegels) zum Mitschwingen. Durch Multiplikation („Mischung“) dieser hochfrequenten Schwingung mit der Schwingung eines (durchstimmbaren) lokalen Oszillators entsteht u. a. eine Zwischenfrequenz, die Differenzfrequenz aus beiden Schwingungen. Diese Zwischenfrequenz transportiert nicht nur den Informationsgehalt des ursprünglichen Signals, sie hat darüber hinaus den Vorteil, dass alle nachfolgenden Bearbeitungsstufen wie Verstärkung und Demodulation für genau diese feste Zwischenfrequenz optimiert und ausgelegt sind. Ohne den Trick mit dem Mischer wäre die heutige Nachrichtentechnik undenkbar!

Natürlich haben die Licht- und Infrarot-Astronomen nicht tatenlos dem Treiben der „Radiofritzen“ zugesehen. Um die Mischtechnik fürs Optische nutzbar zu machen, sprich das optische Pendant zum Super zu schaffen, müssen sie die himmlischen Photonen mit denen eines irdischen Laser von nahezu identischer Frequenz zur Interferenz bringen *bevor* diese auf den Detektor aufschlagen. Der Lichtdetektor (Photodiode) ist das multiplikative (weil „quadratische“) Element, das die Zwischenfrequenz im GHz-Bereich erzeugt, die sich dann wie gehabt elektronisch aufzeichnen und analysieren lässt. Die

---

<sup>6</sup>Ich vermeide die deutsche Bezeichnung „Überlagerungsempfänger“, da „Überlagerung“ für den Physiker Interferenz bedeutet. Beim Addieren von Schwingungen entstehen keine neuen Frequenzen, wie ein Blick auf die Additionstheoreme trigonometrischer Funktionen lehrt. Das Mischen im Superheterodynempfänger meint Multiplikation.

Forderung nach „nahezu identischer“ Frequenz zwischen Beobachtungsfrequenz und Laserfrequenz engt den nutzbaren Wellenlängenbereich stark ein. Übrigens hat die Übertragung des Superheterodyn-Prinzips in den infraroten bzw. optischen Bereich im Labor bereits zur Entwicklung ultragenauer Atomuhren geführt – man spricht schon von einer „Attosekundenphysik“ (1 As = 0,000 000 000 000 000 001 Sekunden) — und wurde 2005 durch die Vergabe des Physiknobelpreises gewürdigt!

Was bisher nur VLBI-Radioastronomen vorbehalten schien, das Zusammenschalten mehrerer Einzelantennen die meilenweit voneinander entfernt stehen, zu einem Interferometer, ohne diese physisch via Kabel (phasenrichtig) verbinden zu müssen, könnte durch hochstabile Laser bald Eingang ins Nah-Infrarote finden. Anstatt die Lichtbündel von den beteiligten Teleskopen direkt zur Interferenz zu bringen, werden „nur noch“ die beim Mischen des Lichts mit einem lokalen Laser erzeugten GHz-Schwebungen zur Überlagerung gebracht – elektronisch. Das Problem wird in den Radiobereich verlagert, wo es technisch handhabbar ist! Das physische Entkoppeln der Einzelteleskope durch Verwendung ultragenauer Uhren (Laser) ermöglichte auch im Optischen große Basislängen und schlägt sich in einer phantastischen Winkelauflösung nieder. Das braucht man auch, will man eines Tages Exoplaneten, also Planeten bei fernen Sonnen, unter die Lupe nehmen.

Mein Fachgebiet beträfe es auch. Allein durch bildgebende optische Interferometrie wird es irgendwann möglich sein, die beim Kartieren von Sternoberflächen auf indirektem Wege (durch photometrisches bzw. spektroskopisches „Imaging“) gefundenen (magnetischen) Sternflecken sichtbar zu machen. Theoretische Ansichten von Sternoberflächen würden widerlegbar!

Das mit Interferometern konventioneller Bauart Machbare, kann auf dem Cerro Paranal (Chile) in Augenschein genommen werden. Dort können seit gut einem Jahr alle vier 8,2-m-Teleskope der ESO zu einem Infrarot-Interferometer, dem *Very Large Telescope Interferometer* (VLTI), kombiniert werden. Dadurch vervierfacht sich nicht bloß die Lichtmenge, wesentlicher ist die Konzentration des Lichtes auf ein 16fach kleineres Beugungsscheibchen: Die Flächenhelligkeit vertausendfacht sich! Dazu müssen die von den einzelnen Teleskopen kommenden Lichtbündel in einem temperaturstabilen unterirdischen Tunnel auf den Bruchteil eines Tausendstel Millimeters genau zur Überlagerung (Interferenz) gebracht werden, wobei Weglängenunterschiede zwischen den einzelnen Teleskopen infolge der Erdrotation durch optische Verzögerungselemente (fahrbare Spiegel) kompensiert werden müssen. Die-

se strengen opto-mechanischen Anforderungen an die Lagegenauigkeit verhindern größere Basisabstände zwischen den einzelnen Teleskopen. Von der Auflösung her entspricht das VLTI einem Teleskop von 130 Metern Spiegeldurchmesser, vom Standpunkt des Lichtsammleres einem 16-m-Teleskop. Das ist bewundernswert und doch nur ein Vorgeschmack auf das, was kommt.