

Wie entwirft man ein Radioteleskop?

Die Geschichte der Homologie

Die Leistungsfähigkeit eines großen Radioteleskops hängt entscheidend von der Güte des Reflektors ab. Doch wie lässt sich erreichen, dass die viele hundert Quadratmeter große Fläche stets exakt ihre Form behält – und zwar unabhängig von der Ausrichtung des Teleskops? Die Strukturmechanik trägt wesentlich zur Lösung des Problems bei.

Von Hans Jürgen Kärcher

IN KÜRZE

- Die Sollform großer Radiowellen-Reflektoren wird dann optimal erreicht und eingehalten, wenn alle Auflagerpunkte homolog sind, das heißt, wenn sie sich hinsichtlich ihrer strukturmechanischen Eigenschaften nicht unterscheiden.
- Das im Jahr 1971 fertig gestellte 100-Meter-Radioteleskop in Effelsberg in der Eifel stellt die erste konsequente Lösung dieses Konstruktionsproblems dar.
- Neuerdings sind auch andere homologe Lösungen entwickelt worden, so die Vier- und Acht-Punkt-Reflektoren. Durch aktive Regelung lässt sich die Form der Reflektoroberfläche weiter verbessern.

Teleskopgestützte optische Astronomie gibt es, seit Galilei vor etwa 400 Jahren erstmals sein Fernrohr an den Himmel richtete. Radio-Astronomie gibt es dagegen erst, seit Karl Jansky und Grote Reber vor etwa 80 Jahren in den USA die ersten Radioteleskope bauten. Die in der Radioastronomie empfangenen Wellen sind etwa 1000-mal länger als diejenigen der optischen Astronomie, und dementsprechend müssen Radioteleskope viel größer sein als optische Teleskope; dafür sind aber die Ansprüche an ihre Genauigkeit wesentlich geringer.

Das erste wirklich große Radioteleskop wurde vor etwa 50 Jahren in Jodrell Bank in England gebaut, Bauherr war die Universität Manchester. Das Teleskop ist mittlerweile nach seinem im Jahre 1913 geborenen Initiator Bernard Lovell benannt, der hoch betagt und von der Königin geehrt weiterhin an dem Geschick seines Teleskops Anteil nimmt. Anhand der gut dokumentierten Schritte zur Realisierung des Lovell-Teleskops wollen wir uns in die Problematik beim Bau großer Radioteleskope hineindenken.

Ein Radioteleskop hat die Abmessungen eines großen Gebäudes oder einer Brücke, und zusätzlich muss es sich auch noch um zwei Achsen drehen. Als Bernard Lovell kurz nach dem Zweiten Weltkrieg begann, seine Vision eines etwa 70 Meter großen Parabolspiegels zu entwickeln, setzte er sich mit dem Bauingenieur Henry Charles Husband zusammen, und entwarf mit ihm sein Konzept. Sie hielten ihre Ideen in einem »Blauen Buch« fest, das man sich heute in digitalisierter Form auf der Webseite von Jodrell Bank ansehen kann – es ist ein wunderbares ingenieurgeschichtliches Dokument.

Die Gestaltung des Lovell-Teleskops

Der erste Entwurf des Lovell-Teleskops hatte einen Maschendraht-Reflektor (siehe das erste Bild auf S. 44 oben). Die beiden Elevationslager waren am äußeren Rand des Reflektors angeordnet, um den Reflektor zu Wartungszwecken durchschwenken zu können, und ruhten auf hohen »Azimut-Türmen«, die ihrerseits auf kreisförmigen Eisenbahn-Schienen in Azimut gedreht



Am 100-Meter-Radioteleskop in Effelsberg wurde das Prinzip der Homologie erstmals konsequent verwirklicht. Es ging im Jahre 1971 in Betrieb und ist – neben dem 101-Meter-Teleskop in Green Bank im US-Bundesstaat West Virginia – das größte voll bewegliche Instrument seiner Art.

Hans Jürgen Kärcher

werden konnten. Der Reflektor selbst wurde durch eine Art von eisernem Steg, der die beiden Elevationslager miteinander verband, einem dazu senkrechten Sichelträger und einer ringförmigen Randversteifung aufgespannt. Das Ganze war sehr filigran und leicht – war es möglicherweise durch die Erfahrungen von Husbands als Hängebrückenbauer beeinflusst?

Das dann gebaute und 1956 in Betrieb gegangene Teleskop sah allerdings deutlich anders aus (siehe zweites Bild auf S. 44 oben). Die Reflektoranordnung ist noch die gleiche, auch die beiden Azimut-Türme sind geblieben, aber der sich in Elevation drehende Teil wurde stark verändert. Zwischen der Konzeptphase im Jahre 1950 und der Realisierung im Jahre 1956 gab es noch eine intensive Engineering-Phase, die man anhand von Husbands Bericht von 1958 nachvollziehen kann. Der Reflektor ist jetzt nicht mehr aus Maschendraht, sondern besteht aus einer geschlossenen Blechhaut, die – und das ist für den Strukturmechaniker wesentlich – an der Lastabtragung des Elevationsteils teilnimmt. Außerdem hat er am Rande eine wesentlich

größere ringförmige Aussteifung, und das Tragwerk dazwischen ist radialsymmetrisch konstruiert; der eiserne Steg ist verschwunden, aber als zusätzliches Element taucht ein »Fahrradreifen« (*bicycle wheel*) auf, der einem Strukturmechaniker zunächst sehr merkwürdig erscheint, der sich aber, wenn man Husbands Bericht liest, als Dämpfungselement herausstellt, um über Gummiräder eventuelle Strukturschwingungen in Elevation zu dämpfen. An der Abtragung der Schwerkraft nimmt er dagegen gar keinen Anteil, die gesamte

Last wird über die weitgespannten Elevationslager abgetragen.

Nach seiner Fertigstellung hatte das Teleskop – wie von einer Pioniertat zu erwarten – offensichtliche Kinderkrankheiten. Die Strukturschwingungen ließen sich zwar beherrschen, aber der Reflektor bog sich, trotz der ausladenden rückwärtigen Stahlstruktur, viel zu sehr durch, und einige der Stahlstreben zeigten bedenkliche Anzeichen von Überbeanspruchung.

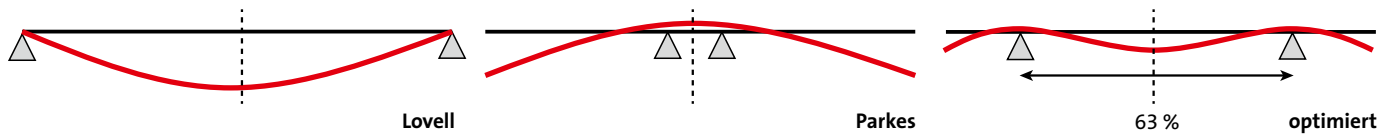
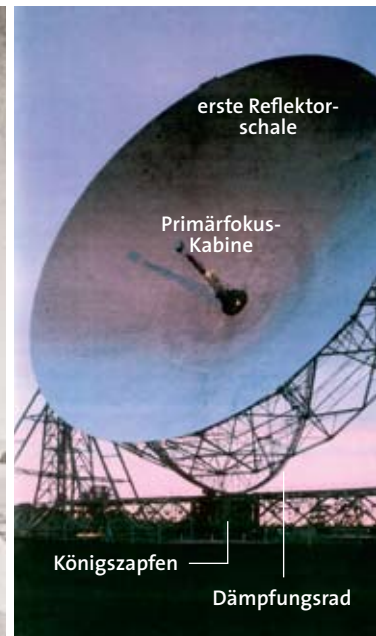
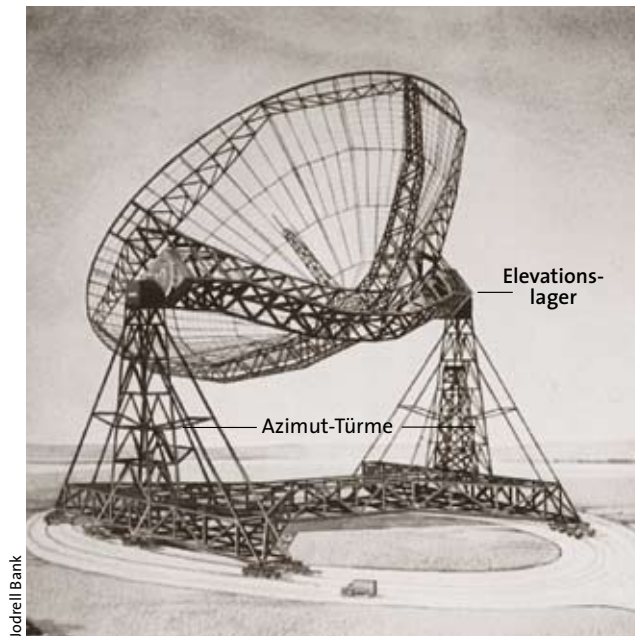
So entschloss man sich in Jodrell Bank in den 1970er Jahren das Teleskop zu über-

WIS wissenschaft in die schulen!

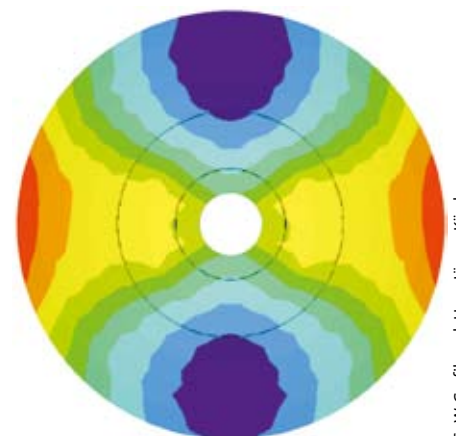
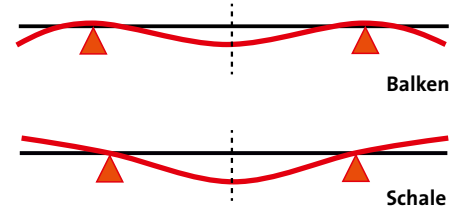
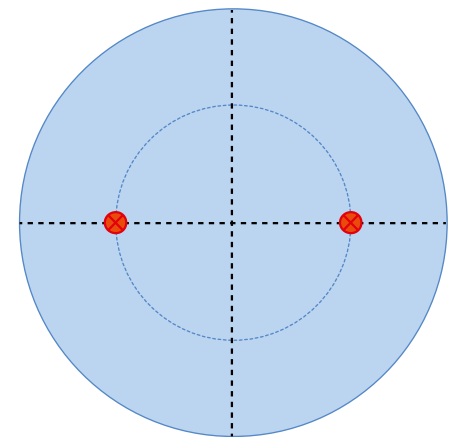
Zur aktiven Beschäftigung von Schülern mit den Inhalten dieses Beitrags stehen auf der Internet-

seite www.wissenschaft-schulen.de didaktische Materialien zur freien Verfügung. Sie unterstützen die theoretische und praktische Auseinandersetzung der Schüler mit dem Rotationsparaboloid des Bonner 100-Meter-Teleskops. Ingenieurtechnische Überlegungen zur Erhaltung der Rotationssymmetrie des Reflektors werden nachvollziehbar aufbereitet, und der Begriff »Homologie« wird vertieft. Das WIS-Projekt führen wir in Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerfortbildung in Bad Wildbad und dem Haus der Astronomie in Heidelberg durch.

Der 70 Meter große Reflektor des Lovell-Teleskops bestand im ersten Entwurf (erstes Bild rechts) aus Maschendraht, die Elevationslager ruhten auf zwei durch einen eisernen Steg verbundenen Azimut-Türmen. Der dann tatsächlich gebaute Reflektor (zweites Bild) erhielt eine geschlossene Blechhaut mit ringförmiger Aussteifung, seine Schwingungen wurden durch einen »Fahrradreifen« gedämpft. Nach 20 Jahren erhielt das Teleskop ein neues Stützrad, und in die erste Reflektorschale wurde eine zweite eingesetzt; schließlich erhielt die Alhidade zwei zusätzliche Fahrwerke und wurde durch diagonale Streben verstärkt (drittes Bild).



Die mittlere Durchbiegung eines Balkens, der an zwei Punkten gestützt wird, ist am kleinsten, wenn die Stützpunkte bei 63 Prozent der Balkenlänge liegen (Bilder oben). Analoges gilt für die Reflektorschale: Wie die genaue Modellierung für zwei Stützpunkte auf der Elevationsachse zeigt, verbiegt sich der Außenrand der Schale auf der Achse nach oben (Bilder rechts), und senkrecht dazu nach unten. Im Bild rechts unten sind die berechneten Verformungskonturen der Reflektorschale dargestellt – Abweichungen nach oben sind rot, nach unten blau kodiert.



SuW-Grafik nach Hans Jürgen Kärcher

arbeiten. Das Dämpfungsrad wurde durch ein gewaltiges neues Stützrad ersetzt, das nunmehr an der Abtragung der Gravitationskräfte teilnahm, und dadurch sowohl die Durchbiegungen zwischen den Elevationslagern verkleinerte, als auch die Beanspruchungen abmilderte (siehe drittes Bild oben). Außerdem wurden die Azimut-Türme der Alhidade durch zusätzliche Diagonalen versteift, und über die alte Reflektorschale wurde eine neue gesetzt. (Als Alhidade – arabisch: Lineal – bezeichnet man das große gabelartige Gestell, das die Elevationsachse mitsamt der Reflektorschale trägt und sich als Ganzes auf Schienen um die Azimutachse dreht.) Die alte Blechschale ist geblieben, sie nimmt weiterhin an der Lastabtragung teil. Wie im dritten Bild oben zu erkennen, wurde zusätzlich eine zweite Schale eingebaut – sie besteht aus einzelnen, justierbaren Paneelen, die eine deutlich höhere Genauigkeit der Reflektorfläche gewährleisten. Das Teleskop ist in dieser Form noch heute

in Betrieb, wird von der Mannschaft in Jodrell Bank liebevoll gepflegt, und stellt ein wunderschönes lebendes Denkmal ursprünglicher Ingenieurs- und Teleskopbaukunst dar.

Die Gestaltungskonzepte für Parkes und Effelsberg

Einen ganz anderen Ansatz als Henry Charles Husband in Jodrell Bank wählten die Gestalter des 1962 in Parkes, Australien entstandenen Radioteleskops. Dieses Radioteleskop sollte mit seiner 64 Meter großen Öffnung für lange Zeit das größte bewegliche Instrument der südlichen Hemisphäre bleiben (siehe Bild ganz rechts oben). Entworfen wurde es ebenfalls von englischen Brückenbau-Ingenieuren, und zwar von Freeman Fox und Partnern in London, die damals auch die Hängebrücken über den Severn bei Bristol und über den Firth of Forth bei Edinburgh bauten; mit der Fertigung wurde die »Maschinenfabrik Augsburg Nürnberg« (MAN) in



CSIRO Parkes Radio Observatory

Der filigrane Reflektor des 64-Meter-Radioteleskops in Parkes, Australien (Bild oben) wird wie ein umgestülpter Regenschirm von externen radialen Speichen gestützt.

Mainz-Gustavsburg, damals die führende deutsche Brückenbauanstalt, beauftragt, die Montage fand – wie bei allen Großteleskopen – vor Ort, also in Australien statt.

Die Konstrukteure des Parkes-Radioteleskops wurden anscheinend von der Form eines umgestülpten Regenschirms angeregt: Sie ordneten in der Mitte der Reflektorschale eine Nabe an, welche die Schale über externe, radiale Speichen abstützt. Dadurch ist der Reflektor sehr filigran und besitzt ein ganz anderes Tragverhalten als das Lovell-Teleskop. Auch dieses Radioteleskop ist heute noch in Betrieb.

Irgendwo zwischen dem Parkes- und dem Lovell-Radioteleskop liegt die Gestalt des 100-Meter-Radioteleskops in Effelsberg, das 1971, 15 Jahre nach dem Lovell-Teleskop, in Betrieb ging (Bild auf S. 43 oben). Auch dieses Instrument hat die Form eines umgestülpten Regenschirms, aber dessen Unterstützung ist viel ausladender angelegt. Wir wollen versuchen, an Hand der unterschiedlichen Gestaltungskonzepte zu verstehen, was ihre Auswirkungen auf die Qualitäten eines Teleskops sind, und uns dann im Lichte dieser Erkenntnis die Gestalt neuerer Radioteleskope anschauen.

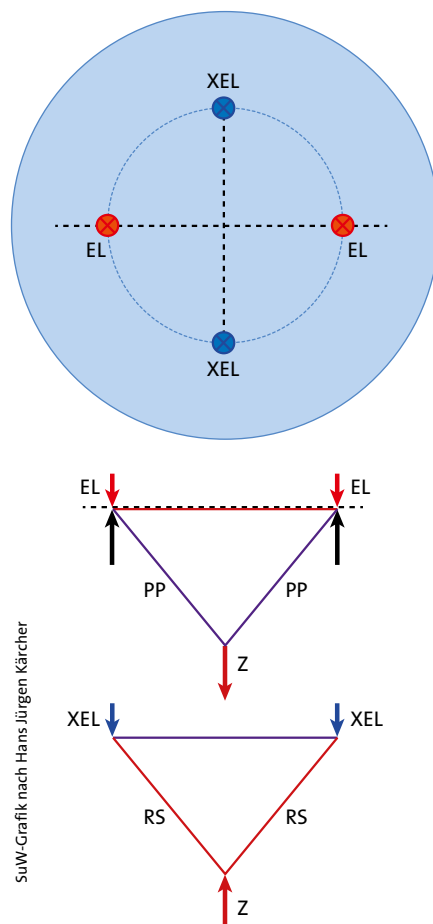
Homologie – das Geheimnis des Effelsberger Reflektors

Was bei dem Vergleich der dreigeschilderten Radioteleskope, Lovell, Parkes und Effelsberg, als Erstes auffällt, ist der sehr unterschiedliche Abstand der Elevationslager. Muss das nicht zu ganz unterschiedlichem Tragverhalten führen? Um das zu verstehen benutzen wir als Ingenieurmodell einen

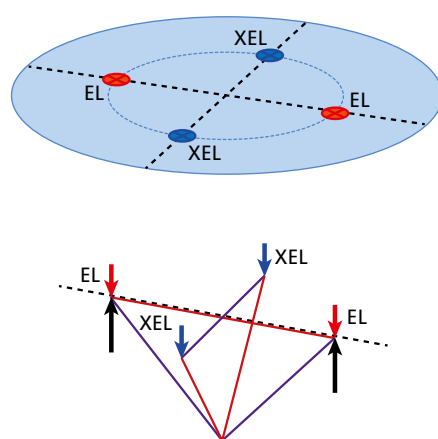
einfachen Biegebalken. In den Grafiken auf S. 44 Mitte ist skizziert, wie sich ein solcher Balken durchbiegt, je nachdem ob man ihn am Rande (Lovell), in der Mitte (Parkes), oder irgendwo dazwischen (Effelsberg) abstützt. Mit etwas Balkentheorie, wie man sie in der Ausbildung zum Statiker lernt, kann man ausrechnen, dass das Optimum, in dem die mittlere Durchbiegung am kleinsten ist, bei einem Abstand der Stützpunkte von 63 Prozent der Balkenlänge liegt. Entsprechend gilt für den Reflektor: Das Optimum

ist erreicht, wenn die Elevationslager bei 63 Prozent des Reflektordurchmessers liegen. Bei Effelsberg ist diese »63-Prozent-Regel« in etwa eingehalten.

Aber das Balkenmodell ist natürlich viel zu einfach für die weiteren Betrachtungen, der Reflektor ist ja kein Balken, sondern eher eine Schale, und wenn man diese mit etwas verfeinerter »Schalentheorie« oder »Finiten Elementen« durchrechnet, kommt ein Ergebnis heraus, wie es in den Grafiken links unten gezeigt ist. Es



SuW-Grafik nach Hans Jürgen Kärcher



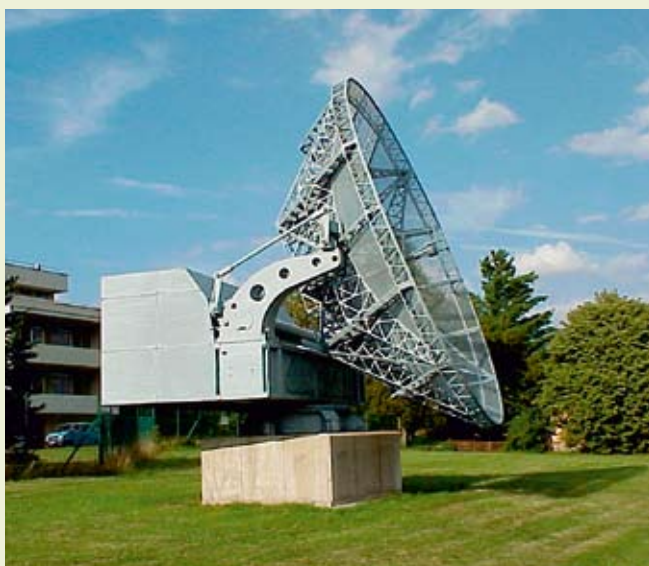
Die Verdopplung der Zahl der Auflagerpunkte des Reflektors von zwei auf vier Punkte führt zu einer nach wie vor nicht homologen Struktur: Die an den auf der Elevationsachse aufliegenden Punkten EL der Reflektorschale wirkenden Kräfte werden auf anderen Wegen abgeführt als die an den dazu orthogonalen Punkten XEL wirkenden Kräfte. Rot sind Druckstäbe, blau sind Zugstäbe gezeichnet.

Die Vorgeschichte des Effelsberger 100-Meter-Radioteleskops

In Deutschland gehen die Anfänge der Radioastronomie auf das Wissen zurück, das sich Radartechniker während des Zweiten Weltkrieges zur Verteidigung der Heimat erarbeitet hatten. Es kulminierte in den Würzburg-Riesen – 7,5 Meter großen Radarantennen, an deren Reflektorgestaltung der Einfluss des damaligen Flugzeugbaus zu erkennen ist (Bild unten). Von den Würzburg-Riesen wurden während des Krieges mehr als tausend gebaut, die dann nach dem Krieg bei den Siegermächten starke Beachtung fanden, in alle Welt zerstreut oder dort zurückgelassen, und in England, Frankreich, der Tschechoslowakei und Schweden als Radioteleskope genutzt wurden. Mit einem solchen Gerät wurde 1951 in Holland die Emission des neu-

tralen interstellaren Wasserstoffs bei 21 Zentimeter Wellenlänge entdeckt. In Deutschland war ihre astronomische Verwendung bis 1950 verboten.

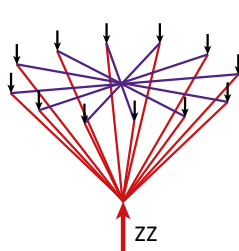
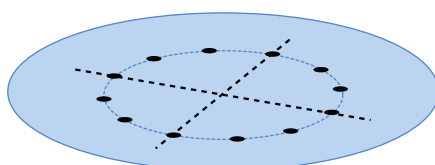
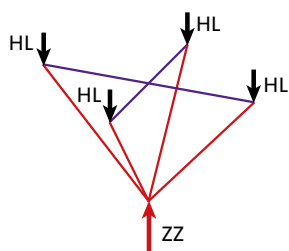
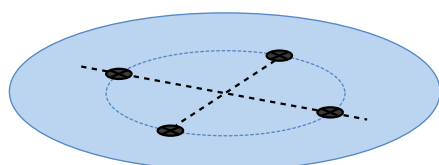
In Westdeutschland ging die Initiative zur Entwicklung der Radioastronomie von Friedrich Becker an der Universität Bonn aus. Er baute von 1952 bis 1957 mit finanzieller Unterstützung des Landes Nordrhein-Westfalen auf dem Stockert in der Eifel ein 25-Meter-Radioteleskop (Bild unten), dessen technischer Betrieb in den Händen vieler ehemaliger Mitarbeiter der Firma Telefunken lag. Die Bauweise seines Reflektors zeigt, wie auch die der Würzburg-Riesen, noch Anklänge an diejenige der Flugzeuge im Zweiten Weltkrieg.



ACADEMIC



Einer der zahlreichen Würzburg-Riesen aus den 1940-er Jahren (links) und das von Friedrich Becker entwickelte 25-Meter-Radioteleskop auf dem Stockert in der Eifel (rechts).

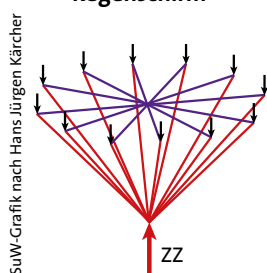


Die Auflagerung der Reflektorschale nach dem Regenschirm-Prinzip (links auf vier, rechts auf zwölf Auflagerpunkten) ist homolog: Alle Lasten werden in gleicher Weise über den zentralen Auflagerpunkt ZZ abgeführt. Von dort werden sie als Ganzes über das Sprengwerk der Elevationsachse (EA) in die Elevationslager (EL) geleitet. Das tragende Gestell des Effelsberger Reflektors (unten rechts) lässt sich als Summe zweier voneinander unabhängiger Strukturen darstellen: Regenschirm plus die beiden Stäbe »Peter & Paul« (unten links und Mitte)

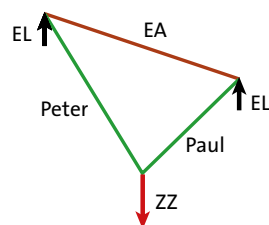
Regenschirm

Sprengwerk der Elevationsachse

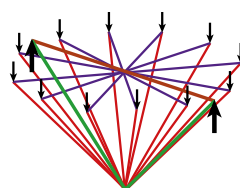
Tragendes Gestell



+



=



In Ostdeutschland wurde schon 1946 das Heinrich-Hertz-Institut gegründet. Dort wurde 1951 Otto Hachenberg zum Direktor bestellt: Er verlegte den Schwerpunkt der Forschung am Institut auf die Radioastronomie, hauptsächlich auf Radiobeobachtungen der Sonne. Ab 1956 baute er in Berlin-Adlershof ein 36-Meter-Teleskop, das zwar »nur« ein Transit-Instrument war, das heißt, es war in Elevation drehbar, aber nicht in Azimut. Sein Aussehen aber mit den beiden Lagertürmen und dem innen vollen, außen mit Maschendraht bestückten Reflektor nahm schon einiges von dem späteren Effelsberger Teleskop vorweg.

In Westdeutschland begann man Anfang der 1960er Jahre in der Max-Planck-Gesellschaft, über die Gründung eines Instituts

für Radioastronomie nachzudenken. Zu dieser Zeit, nach dem Mauerbau in Berlin, war Otto Hachenberg mit all seiner praktischen Erfahrung aus Adlershof an die Universität Bonn gewechselt. Inzwischen hatte Sebastian von Hoerner in Heidelberg Studien über den Bau eines 160 Meter großen Radioteleskops begonnen. Bei dem folgenden Wettbewerb um den Standort und den ersten Direktor des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie erhielten schließlich Bonn und Otto Hachenberg den Zuschlag, und Sebastian von Hoerner, der Tübingen als Standort vorgeschlagen hatte, wechselte 1962 zum NRAO nach den USA, wo er von 1964 bis 1967 seine Theorie der Homologie entwickelte und an einer Fülle von grundlegenden astronomischen Problemen arbeitete.

Hachenberg setzte die Finanzierung und den Bau des Effelsberger 100-Meter-Teleskops durch, das 1971 in Betrieb ging und in vielem seine Handschrift trägt, in dem aber offensichtlich auch von Hoerners Ideen zur Homologie verarbeitet sind. Wenn man sich im Nachhinein den Nachlass der beiden Pioniere anschaut, dann erscheint von Hoerner wohl eher als ein theoretisch denkender Mensch, der wunderbare Aufsätze über seine konstruktiven Ideen hinterlassen hat, und Hachenberg als ein Mann der Tat, der mit Überzeugungskraft seine und die Ideen von Hoerners in Stahl umsetzte.

Sebastian von Hoerner



MPIFR



HHI Adlershof



HHI Adlershof

Otto Hachenberg und sein 36-Meter-Teleskop in Berlin-Adlershof

ergibt sich eine großflächige Verformung, die man in der Optik Astigmatismus nennt. Der Rand des Reflektors biegt sich im Einflussbereich der Elevationslager nach oben durch (»legt die Ohren an«), und sackt quer dazu nach unten ab. Das ist unbefriedigend, und wir benötigen Abhilfe.

Um die Verformung des Reflektors weiter zu reduzieren, erhöhen wir die Anzahl der Auflagerpunkte der Reflektorschale von zwei auf vier. Die Grafiken auf S. 45 unten zeigen dies links in der Draufsicht und in zwei Schnitten, parallel und senkrecht zur Elevationsachse, und rechts zur räumlichen Veranschaulichung isometrisch dargestellt. Um die zwei zusätzlichen senkrecht zur Elevationsachse liegenden Punkte XEL zu unterstützen, müssen wir hinter der Reflektorschale eine Zusatzstruktur anbringen – die statisch einfachste Möglichkeit dazu sind vier umgekehrt-pyramidenartig angeord-

nete Stäbe: Eine solche Struktur nennt ein Zimmermann »Sprengwerk«.

Wie die Grafiken auf S. 45 unten zeigen, wird in diesem Fall die Last der Schalenanteile über den Elevationslagern EL direkt in die Elevationslager eingeleitet, während die Last der Schalenanteile über den XEL-Punkten erst über die Stäbe RS in die Pyramidenspitze und von dort über die Stäbe PP in die Elevationslager eingeleitet wird. (RS steht hier für »Regenschirm«, PP für »Peter & Paul« – warum, das wird weiter unten deutlich.) Die Auflagerpunkte haben also unterschiedliche statische Eigenschaften – deshalb verhalten sie sich unterschiedlich oder »nicht homolog«. Die Konsequenz ist weiterhin eine astigmatische Verformung, wie auf S. 44 unten gezeigt, wenn auch etwas abgeschwächt. Unsere Idee mit den vier Punkten hat noch nicht zum Ziel geführt – um Abhilfe zu schaffen, müssen wir uns noch etwas einfallen lassen.

Die Homologie der Struktur ist erst dann erreicht, wenn die Lastabtragung aller Auflagerpunkte symmetrisch ist. Dazu müssen die Kräfte aller Auflagerpunkte der Schale in gleicher (homologer) Weise zur Spitze der Pyramide geführt werden, wobei die Punkte EL über der Elevationsachse nicht mehr ausgezeichnet sind (siehe die Grafiken links). Dann bleibt nur noch die Frage, wie wir die zentrale Kraft ZZ an der Pyramidenspitze zu den Elevationslagern führen. Bevor wir uns das überlegen, können wir aber zunächst noch die Anzahl der homologen Punkte in Umfangsrichtung vergrößern, und wir landen beim Regenschirmprinzip, wie wir es beim Parkes- und beim Effelsberger Teleskop schon durch Anschauen der Bilder wahrgenommen haben. Nunmehr ist die Auflagerung der Reflektorschale in Umfangsrichtung vollständig gelungen, und wir müssen uns nur noch mit der Durchbiegung der Schale in radialer

Richtung herumschlagen. Bevor wir das tun, lösen wir erst noch das Problem mit dem Transport der Zentralkraft ZZ zu den Elevationslagern.

Dazu greifen wir noch einmal auf das »Sprengwerk« der Zimmerleute zurück, das wir jetzt unabhängig von dem Regenschirm anwenden und mit diesem dann räumlich verschränken. Dadurch wird die gesamte Struktur etwas kompliziert, und deshalb sind in den Skizzen auf S. 46 unten zunächst links die beiden Tragwerksteile, nämlich der Regenschirm und das Sprengwerk der Elevationsachse (EA), getrennt dargestellt. Rechts, wie auch in der Wirklichkeit des Effelsberger Teleskops, durchdringen sie sich räumlich, ohne sich zu berühren – außer an der Pyramiden spitze.

Das Sardinia Radio Telescope

Nun betrachten wir ein neues, noch im Aufbau befindliches Radioteleskop, und zwar das italienische Sardinia Radio Telescope (SRT), das seit 2006 bei San Basilio, 35 Kilometer nördlich von Cagliari, im Aufbau ist. Mit seinen 64 Metern Durchmesser wird es nach dem Effelsberger

(100 Meter) und dem Lovell-Teleskop (72 Meter) das drittgrößte Radioteleskop in Europa sein. Das Bild unten zeigt das Sprengwerk der Elevationsachse, bevor die Regenschirmstäbe angebaut wurden. In diesem Stadium der Montage ist das mächtige Bauteil noch gut zu erkennen: Die beiden Zugstäbe, welche die Zentral last ZZ zu den Elevationslagern tragen, sind besonders kritische Bauteile und wurden von den Männern auf der Baustelle mit den Namen »Peter & Paul« beehrt, vermutlich weil diese beiden Apostel damals die schwere Last der neu gegründeten Kirche so erfolgreich geschultert hatten. An ihnen hängt nämlich im fertigen Teleskop das gesamte Gewicht der Reflektorschüssel.

Das Bild rechts oben zeigt eines der beiden Elevationslager des fertig montierten Effelsberger Teleskops, das nach dem gleichen Prinzip aufgebaut ist wie beim SRT. Hier kommen die Alhidade, Peter & Paul und die Elevationsachse zusammen. Man kann sehr schön erkennen, wie die Regenschirmstäbe und die Elevationsachse sich mit Peter & Paul gegenseitig durchdringen, ohne sich zu berühren.

Zum Schluss sollte noch erwähnt werden, dass das Verformungsverhalten natürlich nicht nur in Zenitstellung – wie bisher geschehen – betrachtet werden muss, sondern auch in allen Zwischenlagen bis hinunter zur Horizontstellung. Die Skizze rechts zeigt die beiden Grenzfälle für den Effelsberger Reflektor. In Horizontstellung ruht der Reflektor nicht mehr auf der Pyramiden spitze, sondern auf einem zentralen »Königszapfen« direkt hinter dem Scheitelpunkt des Parabol-Fachwerks – zur Balance um die Elevationsachse im zentralen Pyramidenpunkt muss ein Gegengewicht angebracht werden, das in Zenitstellung ebenfalls

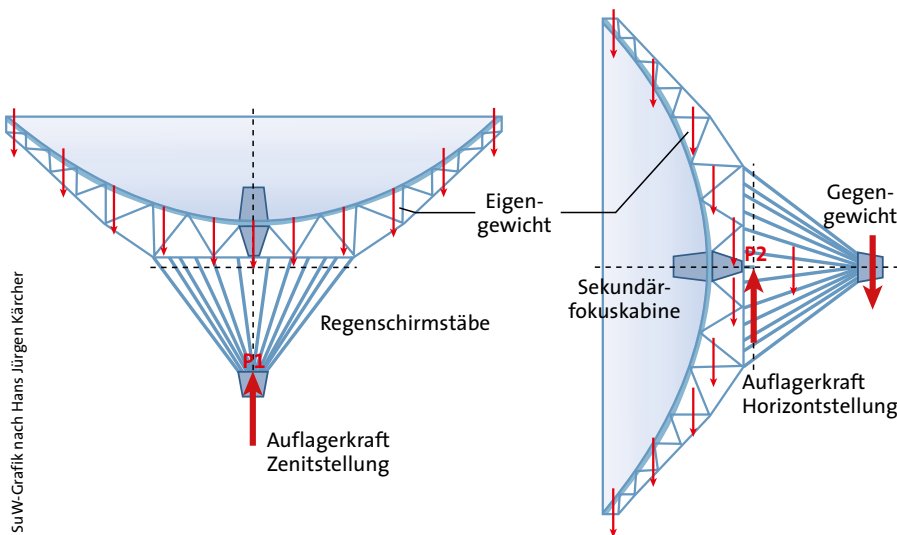
Das Bild zeigt, wie die Elevationsachse des Sardinia Radio Telescope an ihren Bestimmungsort gehoben wird (weiße Pfeile). Vor dem Einbau der Regenschirmstäbe, welche die Last der Reflektorschüssel in einem Punkt unterhalb des Reflektors zusammenführen sollen, sind die beiden Stäbe Peter & Paul noch deutlich zu sehen – sie werden die gesamte Last der Reflektorschüssel in die Elevationslager abführen.





In den Elevationslagern des Effelsberger Radioteleskops kommen die Alhidade, Peter & Paul und die Elevationsachse zusammen. Die beiden die Reflektorschale tragenden Systeme durchdringen sich gegenseitig, ohne sich zu berühren. Die Vierbeinstütze dient der Halterung des Subreflektors (siehe auch die Grafik unten rechts).

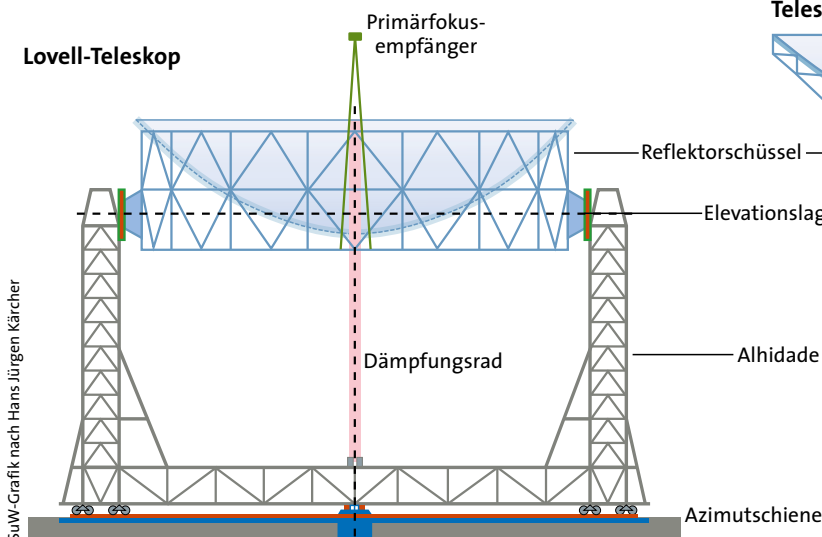
Hans Jürgen Kärcher



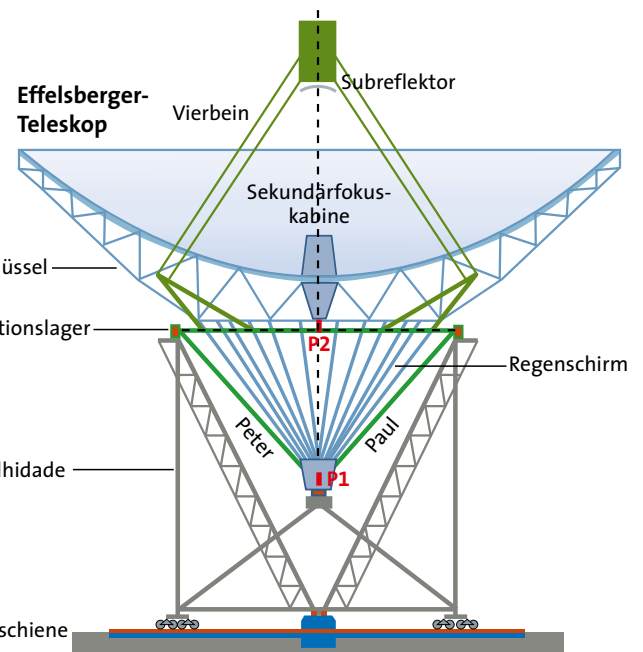
In Zenitstellung ruht der Effelsberger Reflektor auf dem Auflagerpunkt P1 an der Pyramidenspitze (links), in Horizontstellung ruht er auf dem Auflagerpunkt P2 an der Spitze des zentralen Königszapfens hinter der Sekundärfokuskabine (rechts).

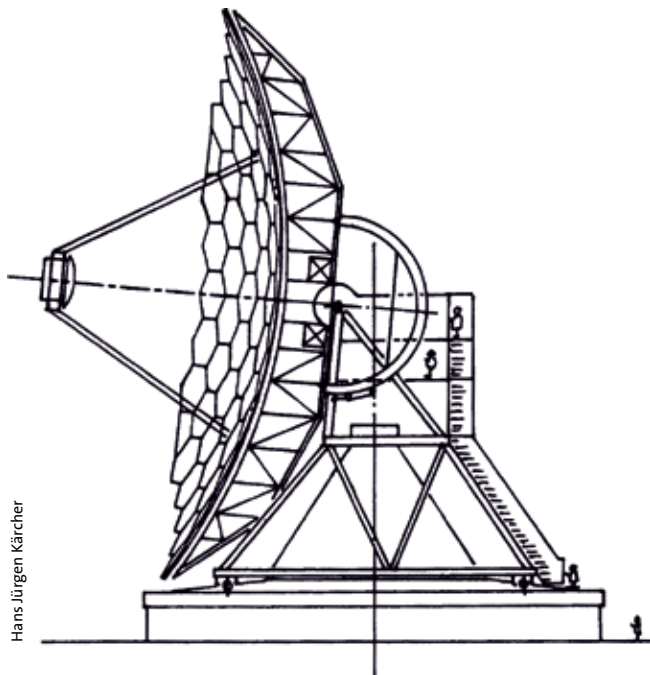
Ganz anders als beim ersten Lovell-Teleskop (unten links) sind beim Effelsberger Teleskop (unten rechts) alle Auflagerpunkte der Parabolschüssel gleichwertig. Allein dadurch werden die Abweichungen von der Parabolgestalt um zwei Größenordnungen verringert.

Lovell-Teleskop



SuW-Grafik nach Hans Jürgen Kärcher





Hans Jürgen Kärcher



Emmanuel Mendez

über Peter & Paul die Elevationslager voll belastet.

Der Vergleich des ersten Lovell-Teleskops mit dem Effelsberger Teleskop (siehe Grafik auf S. 49 unten) verdeutlicht noch einmal den Fortschritt in der Strukturgestaltung: Der beim Effelsberger Reflektor eingeführte Regenschirm führt zur »Homologie« aller Auflagerpunkte der Parabolschüssel: Sie sind sämtlich im strukturmechanischen Sinne gleichwertig. Dadurch wird erreicht, dass hier die Abweichungen von der idealen Parabolgestalt nur etwa ein Prozent der beim ersten Lovell-Teleskop aufgetretenen Abweichungen betragen.

Vier-Punkt-Reflektoren

Trotz des großen Erfolgs, zu dem das Regenschirm-Prinzip beim Effelsberger 100-Meter-Teleskop geführt hat, wurden später auch andere Wege eingeschlagen. Oben ist das 50 Meter große, von MAN Technologie entworfene Large Millimeter Telescope (LMT/GTM) auf dem 4600 Meter hohen Cerro la Negra in Mexiko zu sehen – eine Kooperation mexikanischer und US-amerikanischer Astronomen. Links ist die erste Entwurfsskizze des Autors aus dem Jahr 1996, und rechts das fertig gestellte Teleskop nach einem Schneesturm im Jahr 2010 gezeigt. Das Teleskop sieht ganz anders aus als das Effelsberger Teleskop, von einem »Regenschirm« ist nichts zu erkennen. Was waren die Beweggründe, dieses Teleskop so ganz anders zu entwerfen?

Der Regenschirm führt zu einem schweren betrieblichen Nachteil, nämlich

der schlechten Zugänglichkeit des Raums hinter dem Reflektorscheitel, an dem die Empfangsgeräte für den Sekundärfokus untergebracht werden müssen. Beim Effelsberger Radioteleskop ist dies wegen seiner Größe kein echtes Problem – die in den Grafiken auf S. 49 angedeutete Sekundärfokus-Kabine ist immer noch so groß, dass man in ihr aufrecht stehen kann, und sie ist von den Elevationslagern aus über einen Laufsteg, der das Reflektorfachwerk durchdringt, sowohl in Horizont- als auch in Zenitstellung erreichbar. Allerdings drehen sich die Empfangsgeräte mit der Elevationsbewegung um die Horizontale. Dabei ändert sich die Richtung der Schwerkraft, und das muss man beim Bau derjenigen Instrumente, die mit flüssigem Helium oder flüssigem Stickstoff gekühlt werden, berücksichtigen.

Deswegen ist es ein großer Vorteil für die Radioastronomen, wenn man hinter dem Reflektor eine Kabine für den raumfesten Nasmyth-Fokus anbringt, der über einen Nasmyth-Spiegel in der Elevationsachse gespeist wird. Dadurch sind die Empfänger viel besser zugänglich und raumfest – für sie ändert sich während der Beobachtungen die Richtung der Schwerkraft nicht. Dafür ist aber das Regenschirmprinzip nicht mehr anwendbar, da der mit dem Reflektor mitbewegte Regenschirm die Nasmyth-Kabine durchschneiden würde.

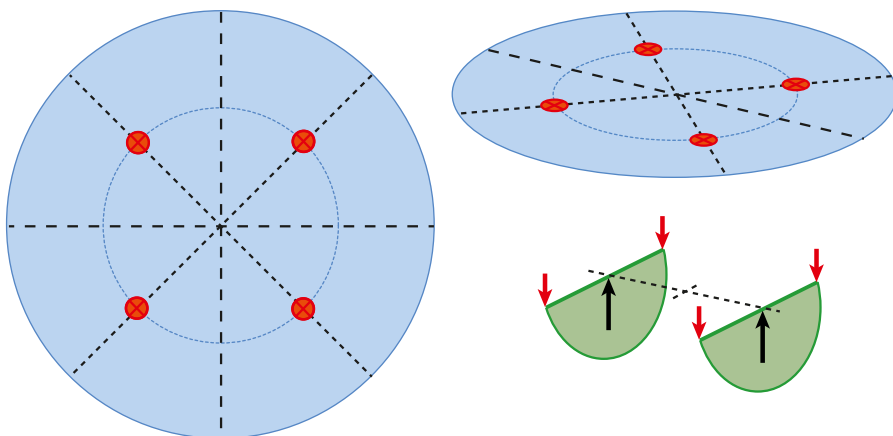
Um hier Abhilfe zu schaffen, hilft uns wieder unsere Betrachtung der oben erwähnten vier Auflagerpunkte des Reflektors. In der Grafik auf S. 45 war das Problem,

Homologie ohne Regenschirm: Beim Large Millimeter Telescope (LMT/GTM) in Mexiko wurden neue Wege beschritten. Links der erste Entwurf des Autors von 1996, rechts das fertige Instrument im Jahre 2010.

dass die Punktepaare in der Elevationsachse und quer dazu ein unterschiedliches Steifigkeitsverhalten aufweisen – dass sie also nicht »homolog« waren. Abhilfe schaffte die Anwendung des Regenschirmprinzips. Es gibt aber noch eine zweite Möglichkeit, die vier Punkte »homolog« zu machen – nämlich indem man sie in der Draufsicht um 45 Grad dreht (Grafik rechts oben). Die so gedrehten vier Punkte sind sowohl hinsichtlich der Elevationsachse als auch senkrecht dazu symmetrisch und damit homolog. Wir müssen sie nur noch richtig mit den Elevationslagern verbinden, und dazu dienen zwei Wippen, wie sie rechts in der Skizze dargestellt sind. Nach hinten hin werden sie durch einen Halbkreisbogen ergänzt, der die Zahnkränze für den Elevationsantrieb trägt und auch gleich noch den Ballast für die Balance aufnimmt. Die Verbindungsstücke zwischen den Ballastauslegern und dem Reflektor lassen sich auf der oben gezeigten Aufnahme sehr gut erkennen. Sie wurden vom amerikanischen Partner des mexikanischen Bauherrn mit dem schönen Namen »In Betweens« benannt und stellen die physische Realisierung der vier homologen Auflagerpunkte dar. Das Bild rechts oben zeigt den glücklichen Schöpfer des Designs vor dem fertiggestellten Teleskop.

Vier Auflagerpunkte, um 45 Grad gegen die Elevationsachse gedreht, sind sowohl zur Elevationsachse als auch quer dazu symmetrisch und damit homolog (links). Sie werden von zwei Halbkreisbögen unterstützt, die auch die Zahnkränze für die Elevationsbewegung tragen (rechts).

SuW-Grafik nach Hans Jürgen Kärcher



Von den Vier-Punkt-Reflektoren gibt es viele weitere Beispiele, auf die ich hier nicht weiter eingehen kann. Ich möchte nur das 30-Meter-Millimeterwellen-Teleskop von IRAM auf dem Pico Veleta in Spanien, das 32-Meter-Teleskop MERLIN in Cambridge, England, und das 40-Meter-Teleskop IGN in Yebes, Spanien erwähnen.

Ein Acht-Punkt-Reflektor

Zum Schluss möchte ich noch einmal auf das gegenwärtig im Bau befindliche 64-Meter-Radioteleskop in Sardinien (Sardinia Radio Telescope, SRT) eingehen, das einen Acht-Punkt-Reflektor besitzt. Das Bild unten rechts zeigt den am Boden vormontierten Reflektor, kurz bevor er mit einem 1000-Tonnen-Kran auf die acht

Auflagerpunkte des »Regenschirms« abgesetzt wird. Auf S. 48 war bereits das Foto eines vorangegangenen Montagezustands zu sehen, auf dem die Elevationsachse und »Peter & Paul« schön zu erkennen sind.

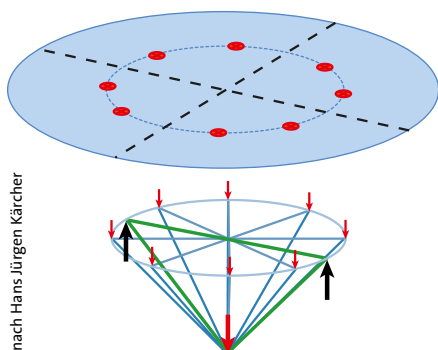
Das SRT hat insofern eine interessante Vorgeschichte, als es von einem Dritten entworfen, dann aber von MT Mechatronics gebaut wurde. Nach Auftragserhalt zeigte sich, dass der gegebene Entwurf große Mängel hinsichtlich der Homologie aufwies, obwohl dem Entwurf doch der Anschauung nach das Regenschirmkonzept zugrunde lag. Die berechneten, auf S. 52 oben links dargestellten Verformungen zeigten einen starken Astigmatismus. Eine Detailanalyse des Entwurfs ergab, dass der Grund in der fehlenden Entkopplung



Hans Jürgen Kärcher

Der Autor vor dem fertig gestellten Large Millimeter Telescope in Mexiko.

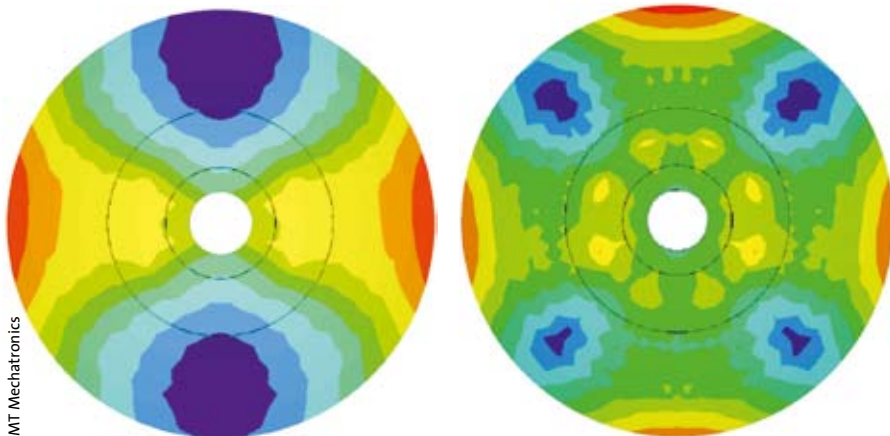
Die 64 Meter große Reflektorschüssel des Sardinia Radio Telescope wird auf den Regenschirm mit seinen acht Speichen abgesetzt. In der schematischen Darstellung (links) sind der Regenschirm dunkelblau, Peter & Paul und die Elevationsachse grün dargestellt.



SuW-Grafik nach Hans Jürgen Kärcher



INAF



Bei der Reflektorschüssel des SRT betrug die mittlere Abweichung von der Sollform vor der Strukturoptimierung noch 3,021 Millimeter (links). Erst die Entkopplung des Regenschirms von Peter & Paul führte zu einem hinreichend homologen Verhalten: Jetzt betrug die mittlere Abweichung 0,792 Millimeter, und damit waren die Spezifikationen erfüllt (rechts).

zwischen den Regenschirmstäben und »Peter & Paul« lag, und dass dadurch die Elevationslager, wie oben erläutert, sich auf die Reflektorfläche durchdrückten. Abhilfe schaffte wieder die Entkopplung der Lastabtragung, die hier aber nicht räumlich geschah – vielmehr wurde sie durch gezielte Erhöhung der Biegenachgiebigkeit der einander durchdringenden Stäbe erreicht. Auf die Einzelheiten kann hier nicht näher eingegangen werden. Das Bild oben rechts zeigt das Ergebnis der Strukturoptimierung: Auf dem optimierten Verformungsdiagramm sind die acht Auflagerpunkte klar zu erkennen, ebenso wie der Einfluss des Vierbeins, das hier, nicht wie bei Effelsberg getrennt (siehe die Grafik auf S. 49 unten rechts), sondern direkt auf dem Reflektortragwerk aufgesetzt ist und sich entsprechend durchdrückt. Dieser Effekt ließe sich nur durch eine getrennte Auflagerung des Vierbeins beseitigen, wie auch im Bild auf S. 49 oben am Effelsberger Teleskop erkennbar; aber darauf wurde hier verzichtet, weil die Zielvorgaben ohnedies schon erreicht waren.

Weitere Steigerung der Genauigkeit

Homologie ist eine Methode, um das Verformungsverhalten eines Radioreflektors ausschließlich durch passive, gestalterische Maßnahmen in den Griff zu bekommen. Aus strukturmechanischer Sicht entspricht sie derjenigen der optischen Teleskopbauer Friedrich Wilhelm Herschel, William Lassell und Thomas Grubb, die schon vor 150 bis 200 Jahren für

ihre großen optischen Spiegel eine »isostatische Spiegelauf Lagerung« entwickelt hatten. Allerdings wurde das Prinzip der Homologie völlig unabhängig von diesen Vorläufern und ohne deren Kenntnis entwickelt.

Als passive Methode reicht die Homologie heutzutage allein nicht mehr aus, um den Anforderungen der Astronomen nach immer höherer Genauigkeit gerecht zu werden. Es bleiben in der Hinterhand des Teleskopingenieurs dann noch: eine aufwändige Klimatisierung des ganzen Teleskops, um es vor äußeren Witterungseinflüssen zu schützen und seine Struktur im Inneren auf möglichst konstanter Temperatur zu halten (dazu dient die im Bild auf S. 50 gezeigte Verkleidung des LMT/GTM), oder die Verwendung temperaturstabiler Materialien wie Kohlefaser-Verbundwerkstoffe (beispielsweise bei ALMA).

Als ultimative Maßnahme dient eine »aktive Oberfläche« – hier werden die Reflektorpaneele einzeln auf Sollposition gehalten. Mit einer solchen Technologie sind heutzutage alle größeren Radioteleskope wie das LMT/GTM und das SRT ausgestattet, und selbst das Effelsberger Teleskop wurde mit einem aktiven Subreflektor nachgerüstet, mit dem es sich sogar zum Empfang von Millimeterwellen eignet – wenn das Wetter in der Eifel es erlaubt. Aber neben all diesen modernen Methoden sollte der Teleskopingenieur bei der Gestaltung der Teleskopstruktur, die ja das Rückgrat des Ganzen bildet, die geschilderten Methoden der Homologie nicht außer Acht lassen.



HANS JÜRGEN KÄRCHER

war als Systemingenieur für Teleskope bei MAN Gustavsburg (jetzt MT Mechatronics) unter

vielen anderen Projekten maßgeblich am Entwurf und Bau des großen Millimeterwellenteleskops GMT/LMT in Mexiko und des Flugzeugteleskops SOFIA beteiligt. Seit 2006 ist er für Forschungs- und Entwicklungsprogramme bei MT Mechatronics in Mainz zuständig.

Literaturhinweise

Lovell, B., Husband, H. Ch.: The Blue Book. Jodrell Bank Centre for Astrophysics. <http://www.jb.man.ac.uk/aboutus/lovell/bluebook/>

Husband, H. Ch.: The Jodrell Bank Radio Telescope, The Institution of Civil Engineers, London 1958

Husband, H. Ch.: Final Report with Cost Estimates on the Modifications to the Mark I Radio Telescope, The Science Research Council, University of Manchester 1968

Dahlem, M., Brinks, E.: Radiobeobachtungen. Welches Instrument für welche Anwendungen? Teil 1: Einzelteleskope. In: Sterne und Weltraum 5/1994, S. 350 – 357. Teil 2: Interferometer. In: Sterne und Weltraum 6/1994, S. 446 – 452

Burke, B. F., Graham-Smith, F.: An Introduction to Radio Astronomy. Cambridge University Press, Cambridge 1996

Grahl, B. H., Wielebinski, R.: A Short History of the German Radio Astronomy. MPIfR, Bonn 2010

Weitere Literatur im Internet:

www.astronomie-heute.de/artikel/1061214

NEW PRODUCTS

31.75mm Premium
Telescope Accessory Kit
#8890



SkyQuest
XX14g GoTo
Truss Tube
Dobsonian
#8954



StarShoot
Solar System
Color Imager IV
#52175

StarShoot
USB Eyepiece
#52173



DOBSONIANS

SkyQuest
XT10g GoTo
Dobsonian
#8949



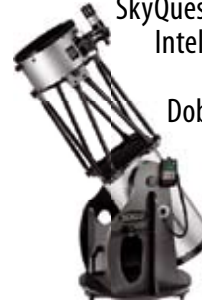
SkyQuest
XT10i
Computerized
IntelliScope
#27184



SkyQuest
XT8 Classic
Dobsonian
#8943



SkyQuest XX12i
IntelliScope
Truss
Dobsonian
#9793



SkyQuest
XT6 Classic
Dobsonian
#8942



BEGINNER TELESCOPES

ShortTube
80 EQ
Refractor
#24688



StarBlast 6i
IntelliScope
Reflector
#27126



Apex
90mm
Maksutov-
Cassegrain
#9820



StarBlast 4.5
EQ Reflector
#9798



SkyScanner 100mm
TableTop
Reflector
#9541



ASTRO-IMAGING

Parsec 8300M
Monochrome
Astronomical
Imaging
Camera
#52077
Parsec 8300C
Color
#52075



SteadyStar Adaptive
Optics Guider
#53076



8" f/4.0 Newtonian
Astrograph
#9527



Awesome
Autoguider
Refractor Package
#24770



Nautilus Motorized
Filter Wheel 4x50.8mm
#5526



ACCESSORIES

152.4mm
x 254mm
Dobsonian
Telescope
Cloak
#15189



SteadyPix Deluxe
Camera Mount
#5338



Dynamo Pro 12
Power Station
#2302



31.75mm 2x
Shorty-Plus 3-Element
Barlow Lens
#5121

Focal Reducer-
Corrector for
ED80 Telescope
#5195



Autorisierte Orion Händler

O.S.D.V.

www.osdv.de
49(0)2922/9109064

Optique Perret

www.optique-perret.ch
41-22-311-47-75

Astro Optik

www.astrooptik.ch
41(0)-41-661-12-34

Astroshop

www.astroshop.de
08191-94049-1

Teleskop-Service

www.teleskop-service.de
089-1892870

ORION®
TELESOPES & BINOCULARS

Besuchen Sie unsere Orion page auf Facebook
www.facebook.com/oriontelescopes

