



Link

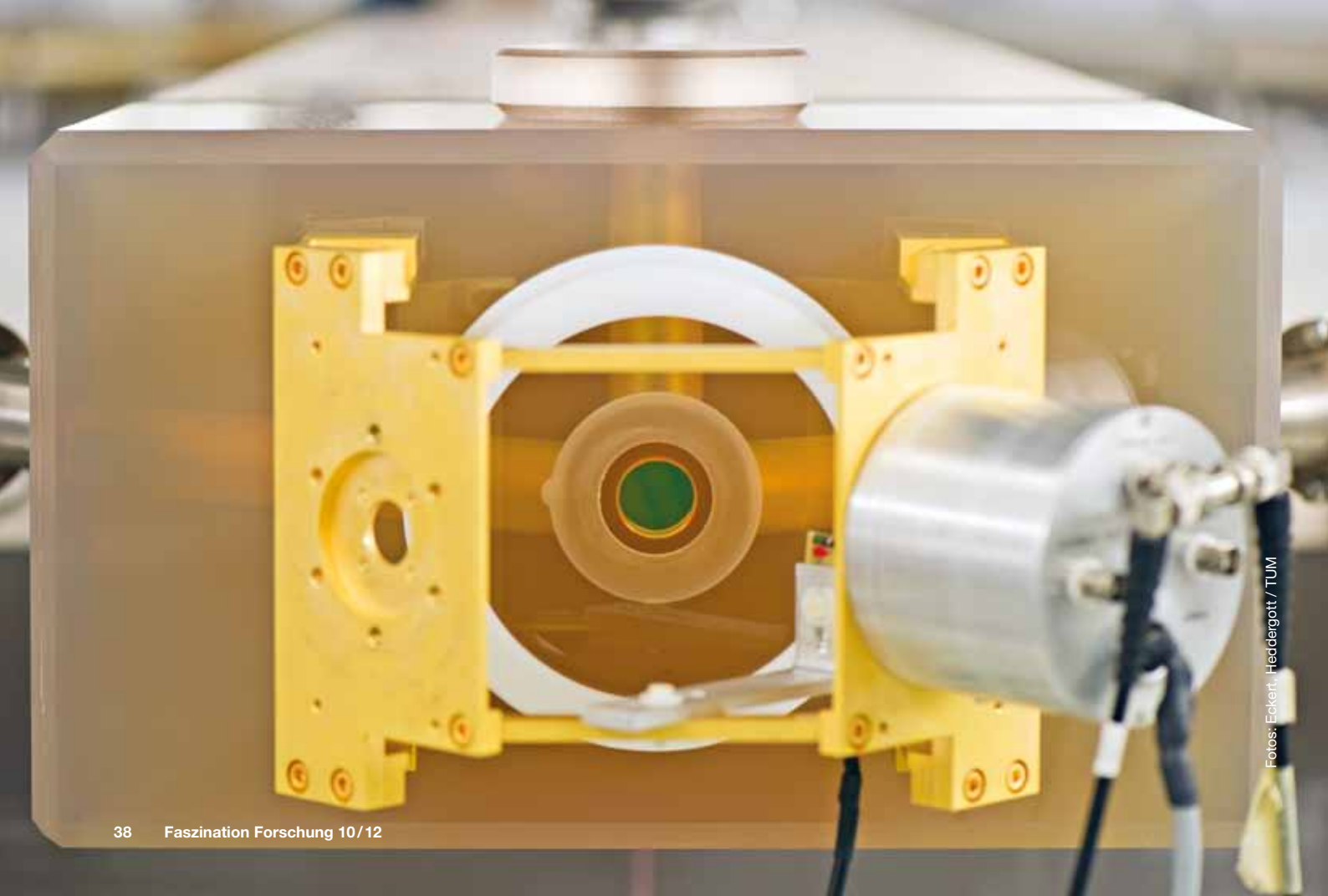
www.fs.wetzell.de

Der Ringlaser, der eigentlich eckig ist, bei der Revision: Auf einer neun Tonnen schweren, runden Platte aus Zerodur sind die Vakuumröhren montiert, in denen der Laserstrahl verläuft. Spiegel an den vier Ecken führen ihn auf einer geschlossenen Bahn

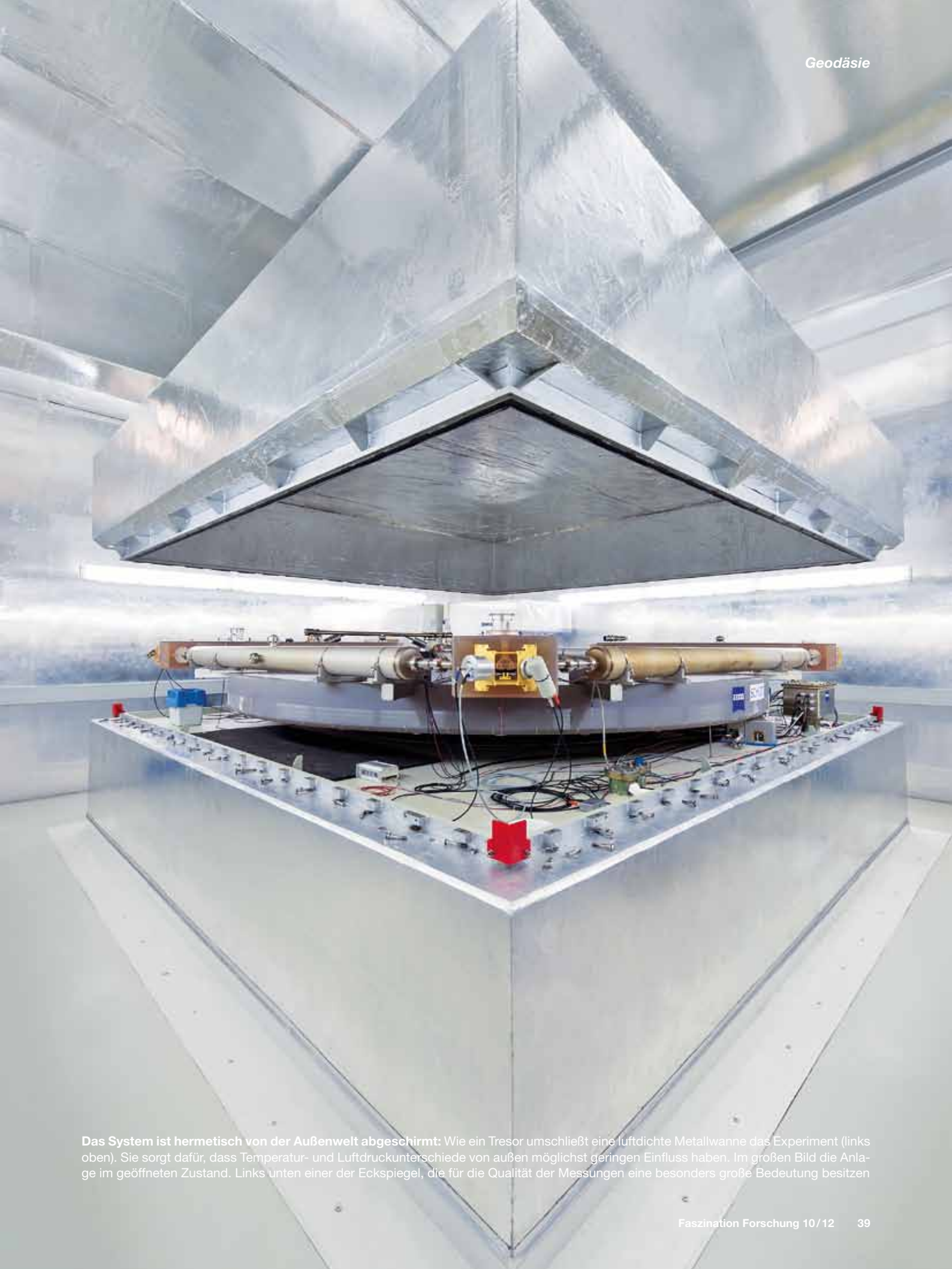


Ringlaser für exakte Navigation

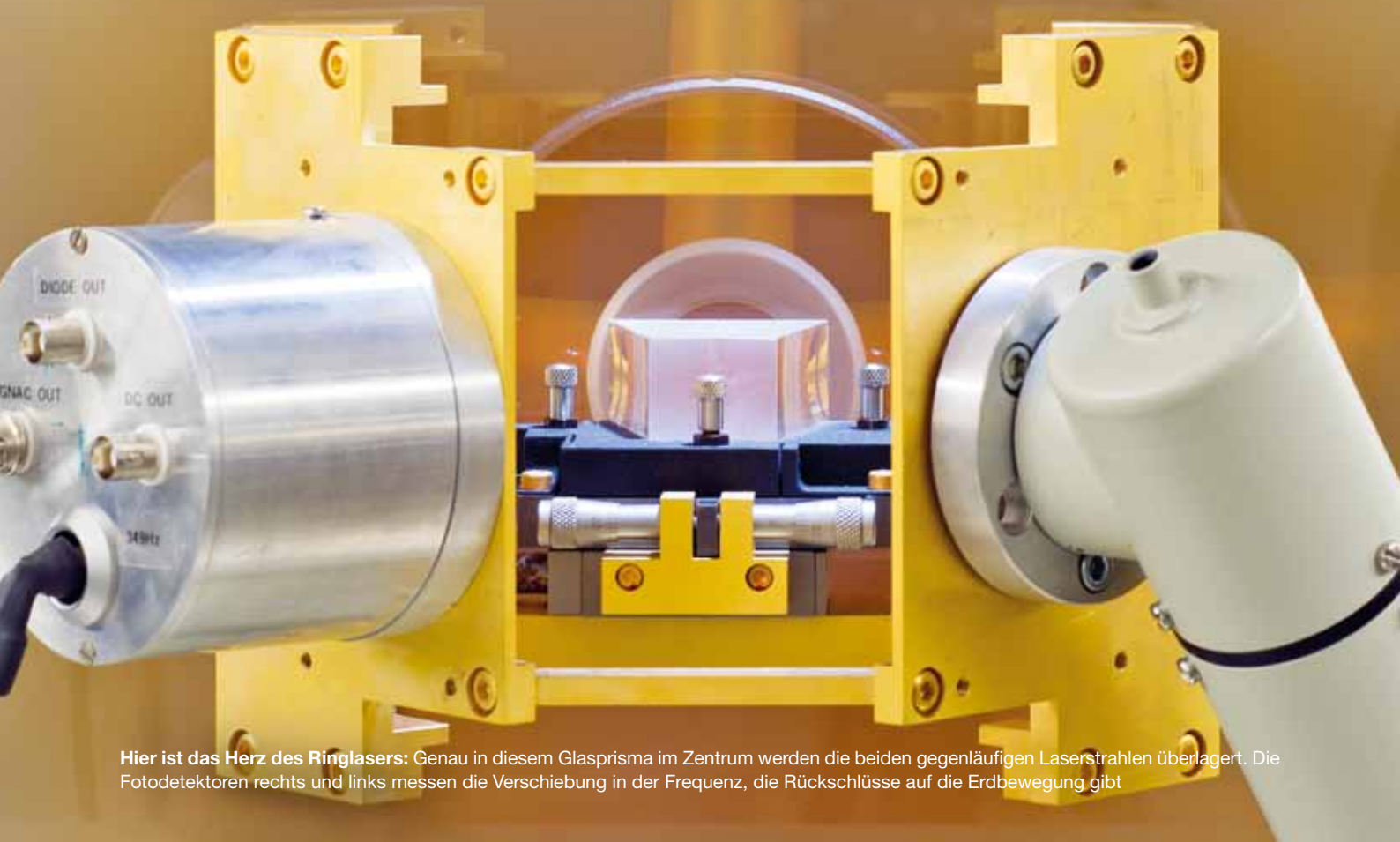
Unglaublich, aber wahr: Eine Gruppe von TUM Forschern schaut nicht ins All hinaus, wenn die Wissenschaftler die exakte Position und Neigung der Erde bestimmen wollen, sondern sie gehen in ein Labor, fünf Meter tief unter der Erde. Der Ringlaser, mit dem sie dort die nötigen Daten ermitteln, ist in seiner Art einmalig auf der Welt



Fotos: Eckert, Heddergott / TUM



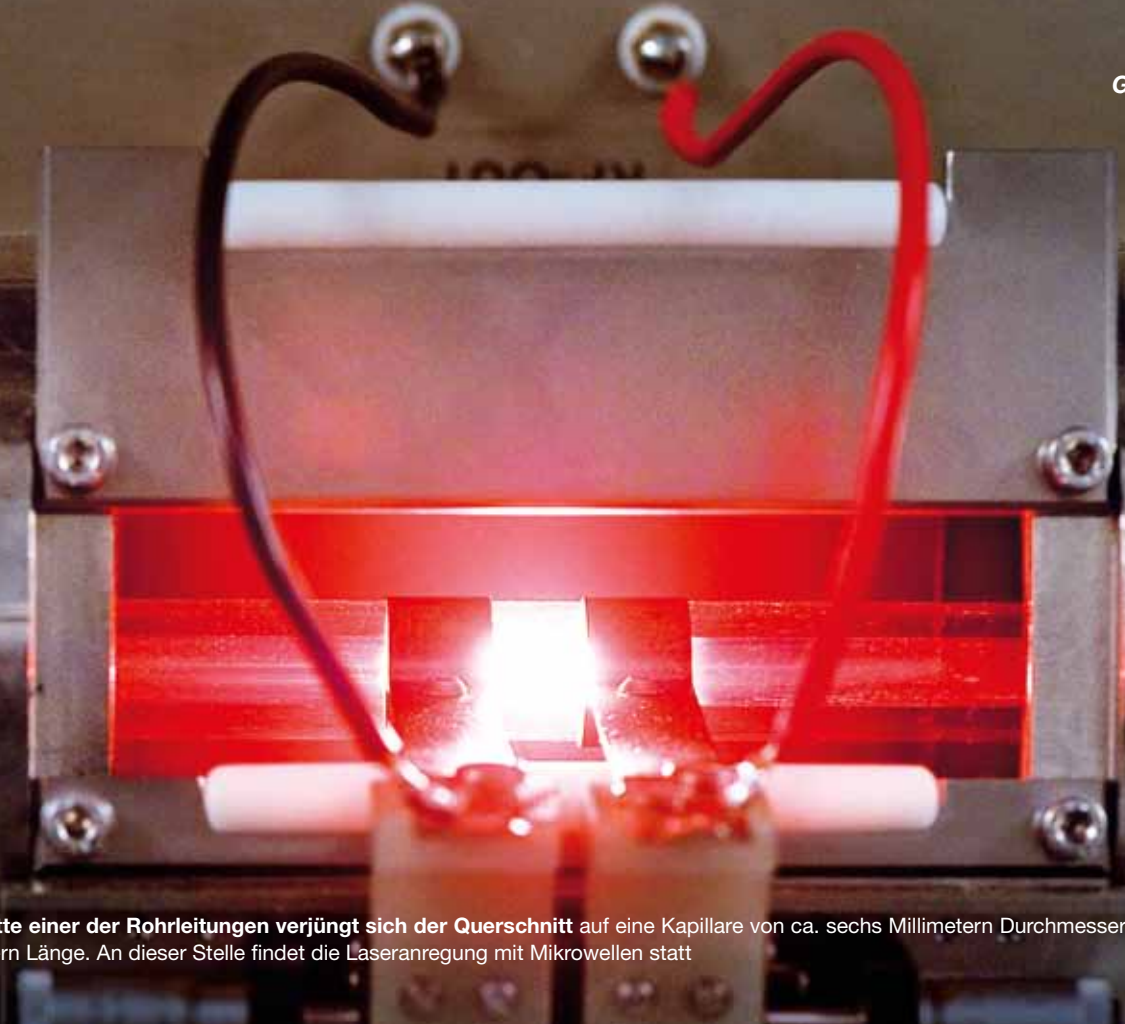
Das System ist hermetisch von der Außenwelt abgeschirmt: Wie ein Tresor umschließt eine luftdichte Metallwanne das Experiment (links oben). Sie sorgt dafür, dass Temperatur- und Luftdruckunterschiede von außen möglichst geringen Einfluss haben. Im großen Bild die Anlage im geöffneten Zustand. Links unten einer der Eckspiegel, die für die Qualität der Messungen eine besonders große Bedeutung besitzen



Hier ist das Herz des Ringlasers: Genau in diesem Glasprisma im Zentrum werden die beiden gegenläufigen Laserstrahlen überlagert. Die Fotodetektoren rechts und links messen die Verschiebung in der Frequenz, die Rückschlüsse auf die Erdbewegung gibt

Ein Detail aus der optischen Strahl-Stabilisierung des Ringlasers. Sie überwacht die Justierung des Laserstrahls und regelt ihn bei Bedarf so nach, dass er auch über lange Zeiten stabil bleibt





In der Mitte einer der Rohrleitungen verjüngt sich der Querschnitt auf eine Kapillare von ca. sechs Millimetern Durchmesser und zehn Zentimetern Länge. An dieser Stelle findet die Laseranregung mit Mikrowellen statt

Die Super-Umlenkspiegel sind ein Kernelement des Ringlasers und haben letztlich seinen Erfolg ermöglicht. Sie besitzen eine Beschichtung aus mehreren Lagen, die genau die Laserfrequenz besonders gut und verlustarm reflektiert



Dieses Regelungssystem sorgt dafür, dass die Frequenz des Laserstrahls stabil gehalten wird. Unten: Prof. Karl Ulrich Schreiber, der Leiter des Projekts, justiert hier einen der Hochleistungsspiegel



Foto: Eckert, Haddergott / TUM

Wetzell im Bayerischen Wald ist ein sehr ruhiges Fleckchen Erde. Keine Großstadt in der Nähe, keine Autobahn, kein Flughafen. Das Dorf liegt eingebettet zwischen sanften Hügeln, die nach Osten zu allmählich ansteigen und schließlich – gerade noch in Sichtweite – im Großen Arber gipfeln. Aber hier, wo sich nichts zu rühren scheint außer vielleicht die Wipfel der Tannen, gerade hier beweisen Forscher tagtäglich, dass sich der Boden unter unseren Füßen nicht nur rasend schnell bewegt, sondern dabei auch noch ständig kippt und schaukelt.

Eigentlich sollte man davon ausgehen, dass sich die Erde gleichmäßig dreht, denn ein Tag ist so lang wie der andere. „Wenn man aber genau hinschaut, stellt man fest, dass das nicht hundertprozentig stimmt“, sagt Prof. Karl Ulrich Schreiber vom Geodätischen Observatorium in Wetzell. Denn die Erde ist nicht perfekt rund, ihre Gestalt ändert sich ständig, einerseits weil sich Massen in ihrem Inneren verschieben und andererseits weil große Gewichte von außen auf sie drücken: Ebbe und Flut, Eisplatten, Windstaus und vor allem Hochdruckgebiete. Hinzu kommen noch die Einflüsse von Sonne, Mond und anderen Planeten. Wie bei einem Brummkreisel, den man antippt, schlingert deshalb die Rotationsachse der Erde ständig ein wenig. Man könnte auch sagen, Nord- und Südpol, also die beiden Enden der Erdachse, wandern etwas um den Idealpunkt herum.

Im Vergleich zu der ungeheuer großen Masse des Erdkreises sind die Störungen winzig klein: „Sie bewegen sich im ppb-Bereich“, sagt Schreiber. Das bedeutet „parts per billion“, also einen Teil auf eine Milliarde, unspürbar im Alltag. Wichtig werden diese Abweichungen von der idealen Rotation jedoch, sobald man die exakte Position von Satelliten wissen will. Denn ein Satellit richtet sich nur nach dem

Geozentrum der Erde, also ihrem Schwerpunkt. Was außen herum wackelt oder schlingert, ist ihm egal. Das gilt auch für die 32 GPS-Satelliten, die wir heutzutage zur Navigation auf der Erde benutzen. Jeder von ihnen sendet ständig seine aktuelle Position und die genaue Uhrzeit aus. Hat man Kontakt mit drei GPS-Sendern, kann man über die Laufzeiten der Signale die eigene Lage auf der Erde ausrechnen. In der Praxis sind aber die Uhren in den GPS-Empfängern nicht genau genug, um Laufzeiten korrekt messen zu können. Deshalb wird das Signal eines vierten Satelliten benötigt, mit dem dann auch noch die exakte Zeit im Empfänger bestimmt wird.

Quasare als Fixpunkte am Himmel

Die Ermittlung der Laufzeit gelingt jedoch nur dann, wenn man den Abstand von der Erdoberfläche zum Satelliten genau kennt. Und wenn die Erde eiert, verändert der sich laufend. „Einen Punkt für die GPS-Ortung zentimetergenau zu bestimmen, ist ein hochdynamischer Vorgang – schließlich bewegen wir uns in unseren Breiten pro Sekunde um circa 350 Meter nach Osten“, sagt Karl Ulrich Schreiber. „Zusätzlich gilt: Wenn man die leichten Abweichungen der Erdachse nicht mit einberechnet, driftet die Ortung mit der Zeit weg.“ Wie aber kann man ein Schlingern der Erde messen, wenn man keine festen Punkte hat, an denen man sich orientieren kann? Zu Hilfe kommen den Wissenschaftlern sogenannte Quasare. Das sind extrem hell leuchtende Objekte im Weltall, die so weit von uns entfernt sind, dass sie ihre Position am Himmel nie ändern.

Mindestens zweimal pro Woche richten Schreiber und seine Kollegen am Geodätischen Observatorium ihr Radioteleskop auf diese Fixpunkte aus und messen die Richtung. ▶

Zusammen mit insgesamt 29 anderen Teleskopen, die über die ganze Erde verteilt sind, ermitteln sie so die jeweils exakte Erdposition. Die Daten werden anschließend zentral ausgewertet und bilden die Grundlage für den International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), für den das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) in Frankfurt verantwortlich ist. Diese Organisation verbreitet jederzeit die aktuellen Daten, die dann in die GPS-Berechnungen einfließen und dafür sorgen, dass die Navis in unseren Autos auf wenige Meter genau funktionieren.

Die Erde als Flugzeug

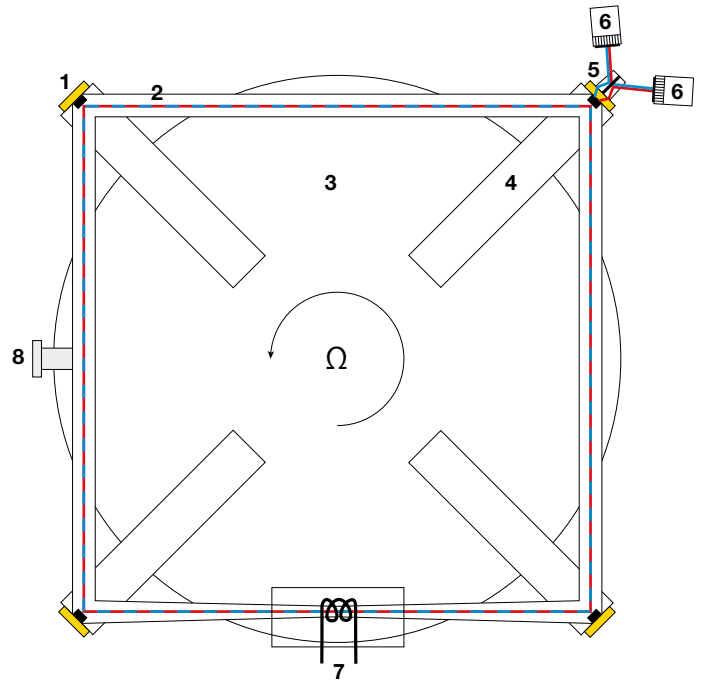
Das System ist gut eingespielt, aber besonders elegant ist es nicht. Um wie viel angenehmer wäre ein Gerät, das die Rotationsgeschwindigkeit und die Neigung der Drehachse direkt und selbstständig messen und per Online-Dienst verbreiten könnte! Hinzu kommt, dass man die Daten der Radioteleskope durch ein zweites, unabhängiges Messverfahren besser absichern könnte. „Was wäre beispielsweise, wenn die Positionen der Quasare nicht stabil sind?“, fragt der Physiker Schreiber.

Schon als er 1989 als Postdoc an das Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie der TU München kam, begann er sich mit dem Thema zu beschäftigen. Sein damaliger Professor Manfred Schneider hatte vorgeschlagen, einen Laserkreisel – auch Gyroskop genannt – zu benutzen, um die Geschwindigkeit der Erdrotation unabhängig von äußeren Fixpunkten zu messen. Derartige Geräte befinden sich heute in jedem Schiff und Flugzeug und sorgen dort zusammen mit Beschleunigungssensoren für die Navigation. Sie beruhen darauf, dass zwei Laserstrahlen in entgegengesetzten Richtungen einen Ring durchlaufen.

Dreht sich die Anordnung, hat einer der beiden Strahlen einen geringfügig längeren Weg als der andere. Wenn man die beiden Lichtstrahlen am Ende wieder überlagert, sind ihre Wellen etwas gegeneinander verschoben, Fachleute sprechen von einer Verschiebung der optischen Frequenz. Sie erzeugt ein Interferenzmuster, das die Verschiebung anzeigt. Moderne Laserkreisel verwenden meist aufgerollte – teilweise kilometerlange – Glasfaserkabel, in denen der Laserstrahl läuft. Ursprünglich hatte der französische Physiker Georges Sagnac 1913 diesen nun nach ihm benannten Effekt demonstriert, dabei aber eine Anordnung mit mehreren Spiegeln verwendet.

„Man kann sozusagen die Erde als Flugzeug betrachten und sie mit einem Laserkreisel verbinden, der anzeigt, wie sie sich dreht“, sagt Karl Ulrich Schreiber. Er beschloss, seine Habilitationsarbeit der Aufgabe zu widmen und zusammen mit Kollegen der neuseeländischen University of Canterbury ein solches Instrument zu entwerfen. Von Anfang an war klar, dass man eine mindestens eine Million Mal größere Genauigkeit erzielen musste, als sie ein handelsübliches Laser-Gyroskop aufweist. „Damals sind wir beinahe ausgelacht worden, weil dies kaum jemand für möglich hielt“, erzählt Schreiber.

Die Formeln zur Berechnung der Frequenzverschiebung ergeben, dass der Ringlaser umso genauer arbeitet, je größer er ist. Das Ziel war also klar: Ein möglichst großes Gerät musste her. Praktische Überlegungen standen dem jedoch entgegen: „Je größer ein Ringlaser ist, desto wackeliger wird er, das macht ihn instabil“, sagt Schreiber. Schließlich ermittelte er ein Optimum zwischen beiden Anforderungen und landete bei einer umschlossenen Fläche von 16 Quadratmetern.



Betonpfeiler auf massivem Fels

Damit er die Drehbewegung der Erde messen kann, muss der Ringlaser fest mit dem Untergrund verbunden sein. So baute man in Wettzell dafür ein sogenanntes Monument, einen massiven Betonpfeiler, der in rund sechs Metern Tiefe auf massiven Fels der Erdkruste gegründet ist, damit ausschließlich die Erdrotation auf die Laserstrahlen wirkt. Darauf liegt im Untergrundlabor, das von dicken Styrodur-, Ton- und Erdschichten bedeckt ist, die eigentliche Konstruktion, eine neun Tonnen schwere Platte aus Zerodur, so auf, dass sie sich nicht durchbiegt. Dieses Material hat den Vorteil, dass es sich bei Erwärmung so gut wie nicht ausdehnt, deshalb wird es auch für die handelsüblichen Ceran-Kochfelder im Haushalt benutzt. Bei den hier nötigen Ausmaßen musste die Herstellerfirma Schott allerdings an die Grenzen ihrer technischen Möglichkeiten gehen: Die kreisrunde, polierte Platte hat einen Durchmesser von vier Metern. Darauf wurden zusätzlich noch vier Zerodur-Balken montiert, die nun die Eckpunkte mit den Laserspiegeln tragen. So gelang es, die anvisierte Größe von 16 Quadratmetern zu erreichen.

Mikrowellen regen den Laser an

Als Laser wählten die Forscher einen Helium/Neon-Gaslaser, dessen Strahl zwischen den vier Spiegeln im Kreis umläuft, der eigentlich ein Quadrat ist. Das Licht wird geführt in luftleer gepumpten Röhren, die von der Umgebung abgeschlossen sind. In der Mitte einer der Rohrleitungen verjüngt sich der Querschnitt auf eine Kapillare von ca. sechs Millimetern Durchmesser und zehn Zentimetern Länge. An dieser Stelle findet die Laseranregung mit Mikrowellen statt. Der eine Strahl durchläuft das Rohrsystem im

- | | |
|-----------------------------|------------------------|
| 1 Spiegel und Spiegelhalter | 5 Strahlenteilerprisma |
| 2 Mantelrohr | 6 Detektor |
| 3 Zerodur-Grundplatte | 7 Laseranregung |
| 4 Zerodur-Strahl | 8 UHV-Interface |

Das Grundprinzip des Ringlasers: Es beruht darauf, dass zwei Laserstrahlen in entgegengesetzter Richtung eine Strecke durchlaufen. Dreht sich die Anordnung, hat einer der beiden Strahlen einen geringfügig längeren Weg als der andere. Wenn man die beiden Lichtstrahlen am Ende wieder überlagert, sind ihre Wellen etwas gegeneinander verschoben. So lassen sich Neigungen der Erdachse nachweisen

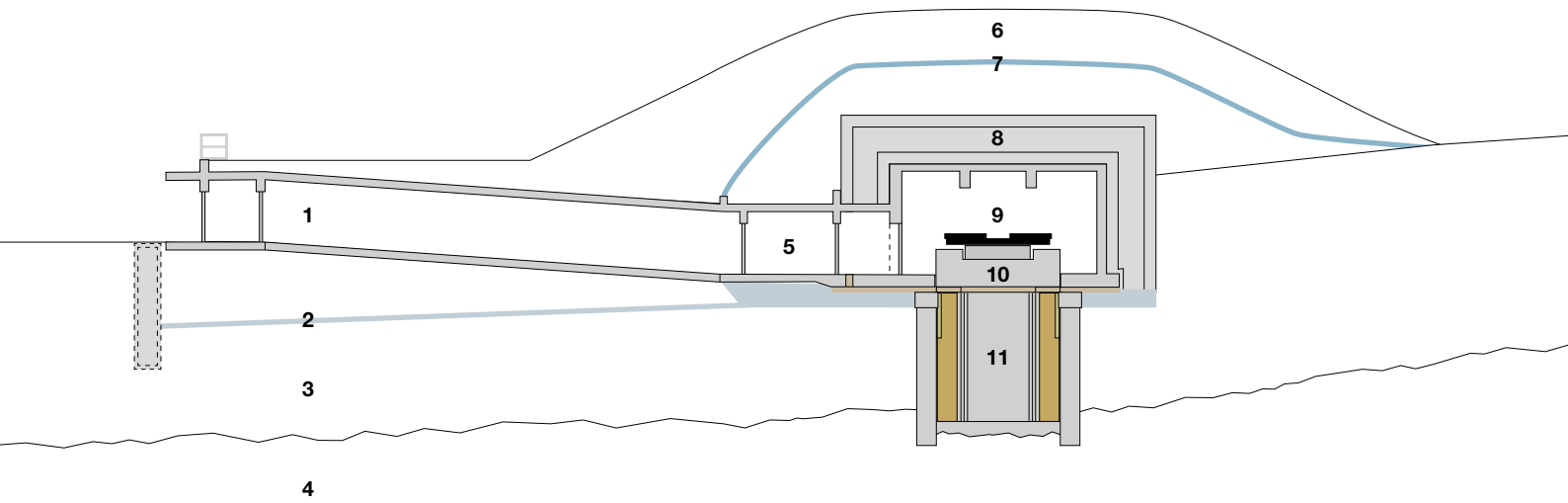
Uhrzeigersinn, der andere in entgegengesetzter Richtung. „Das Prinzip eines Ringlasers ist relativ einfach“, sagt Schreibers Kollege, der Geophysiker Dr. André Gebauer. „Die große Schwierigkeit bestand jedoch darin, den Laser so stabil zu halten, dass wir ein sehr schwaches geophysikalisches Signal störungsfrei messen können – und das über Monate hinweg.“ Das heißt, die Wissenschaftler mussten Änderungen in den Laserfrequenzen ausschließen, die nicht von der Drehbewegung der Erde, sondern von Umwelteinflüssen wie Variationen im Luftdruck, mechanischen Schwingungen oder Temperatur herrühren. „Wie schwierig das werden würde, haben wir anfangs nicht geahnt, sonst wären wir das Wagnis wahrscheinlich gar nicht eingegangen“, sagt Karl Ulrich Schreiber heute im Rückblick. „Manchmal war es zum Verzweifeln. Aber das ist normal in der Wissenschaft. Solange man einen Weg nach vorne sehen kann, geht man voran. Alles braucht eben seine Zeit.“

In mühsamer Feinarbeit verminderten die Forscher im Lauf der Jahre die Fehlerquellen. So wurde über das Instrument eine Druckkabine gebaut, die das Experiment von der Außenwelt abschirmt, Änderungen des Luftdrucks und der Temperatur registriert und automatisch gegensteuert. Ohnehin gelangt man in das Untergrundlabor nur durch einen 20 Meter langen Tunnel mit fünf Kühlraumtüren und einer Schleuse. Außerdem wurde der Laser optimiert, störende Oberschwingungen hat man unterdrückt und die Stabilität wurde verbessert. Am meisten brachte aber die Verbesserung der Spiegel. Den Forschern halfen da die Entwicklungen, die eigentlich den Detektoren für Gravitationswellen galten. Auch dort muss man Laserstrahlen stabil halten und braucht Spiegel, die möglichst geringe Streuverluste zei-

gen. Nachdem Schreiber und seine Kollegen im Jahr 2009 erneut bessere Spiegel eingesetzt hatten, gelang ihnen endlich der Durchbruch: Der Ringlaser lief im darauf folgenden Jahr 80 Tage am Stück und lieferte solide Ergebnisse. Deren Auswertung bewies, dass die Wettzeller Forscher die mit konventionellen Mitteln erzielten Daten ihrer Kollegen mit den Radioteleskopen genau bestätigen konnten. Die Diagramme, die 2011 in den *Physical Review Letters* veröffentlicht wurden, zeigen deutlich den sogenannten Chandler Wobble. Es handelt sich dabei um eine Rotation der Erdachse, die rund 435 Tage dauert und nach ihrem Entdecker, dem amerikanischen Astronomen Seth Carlo Chandler, benannt ist. Diese Bewegung ist überlagert vom jährlichen Annual Wobble, der durch die elliptische Bahn um die Sonne verursacht wird. Die beiden Effekte zusammen ergeben eine unregelmäßige Wanderung der Erdachse auf einer kreisähnlichen Linie mit einem Radius von maximal sechs Metern.

Erdbebenwellen aus Japan

Wie genau der Wettzeller Ringlaser arbeitet, konnten die Forscher am 11. März 2011 erleben: Als an diesem Tag im japanischen Tohoku-Oki die Erde bebte und unter anderem die Katastrophe von Fukushima verursachte, zeigte der Ringlaser einen Ausschlag an. Eigentlich dürfte er auf Erdbebenwellen nicht ansprechen, wenn diese quer durch den Globus laufen und die Erdoberfläche nur heben und senken. In diesem Fall konnten die Wissenschaftler aber eine Komponente der seismischen Erregung nachweisen, die sich wie Schlangen entlang der Erdoberfläche ausbreitet. Sie bewirkt, dass sich Bereiche der Erdoberfläche hin- und herdrehen. Diese Bewegung kön- ▶

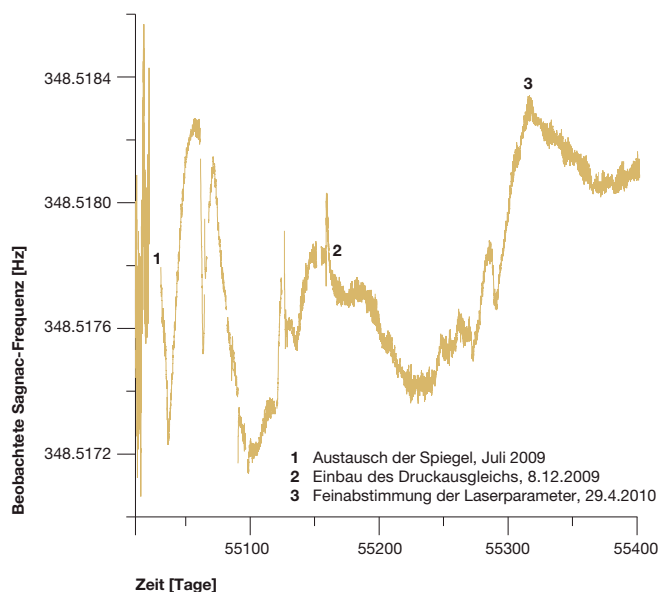
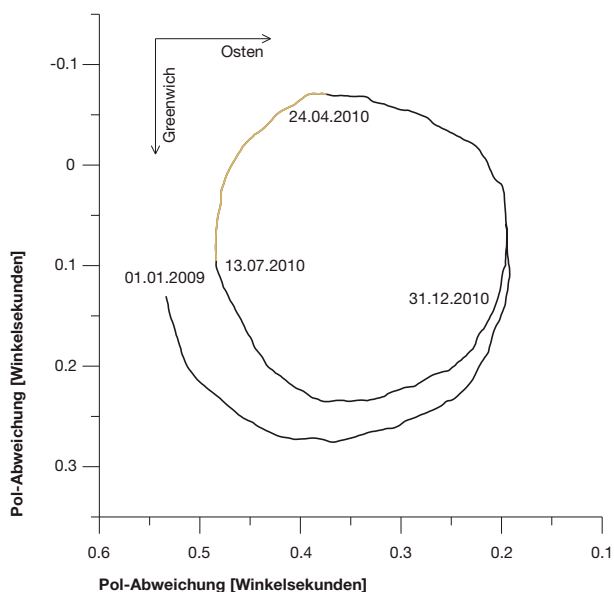


- | | |
|---------------------|------------------------|
| 1 Eingangstunnel | 7 Wassersiegel |
| 2 Dränage | 8 Thermische Isolation |
| 3 Verwitterter Fels | 9 Ringlaser |
| 4 Felsmassiv | 10 Betonfundament |
| 5 DAQ Kontrolle | 11 Betonpfeiler |
| 6 Erdhügel | |

Aufbau des Untergrundlabors in Wetzell: Der Ringlaser ruht auf einem Betonpfeiler, der in rund sechs Metern Tiefe auf massiven Fels gegründet ist. Über dem Labor, das durch Luft- und Druckschleusen von der Außenwelt getrennt ist, liegen dicke Styrodur-, Ton- und Erdschichten. Unten der Laborhügel von außen



Grafik: edlundsepp nach TUM; Foto: Eckert/TUM



Die Messergebnisse (links): Von Norden aus betrachtet umschreibt der Nordpol im Lauf des Jahres ungefähr einen Kreis mit einem Radius von maximal sechs Metern. Bei diesem Chandler Wobble genannten Effekt handelt es sich um eine Rotation der Erdachse, die rund 435 Tage dauert und nach ihrem Entdecker, dem amerikanischen Astronomen Seth Carlo Chandler, benannt ist. Diese Bewegung ist überlagert vom jährlichen Annual Wobble, der durch die elliptische Bahn um die Sonne verursacht wird. In der Kurve oben ist die mit herkömmlichen Verfahren gemessene Bewegung des Nordpols vom 1.1.2009 bis zum 31.12.2010 eingezeichnet. Das Stück Messkurve vom 24.4.2010 bis zum 13.7.2010 stammt vom Ringlaser und fügt sich perfekt in die Kurve ein

Meilensteine bei der Verbesserung des Ringlasers (rechts): Diese Kurve zeigt, wie sich die Messergebnisse allmählich stabilisierten. Mehrere grundsätzliche Verbesserungen trugen dazu bei: der Austausch der Spiegel (1), der Einbau des Druckausgleichs (2) und die Feinabstimmung der Laserparameter (3). Jedes Mal wurde die Stabilität der Messwerte besser

nen normale Seismografen so nicht sehen, da sie Translationen von Rotationen nicht unterscheiden können. Die mühselige Entwicklungsarbeit in Wettzell hat sich offenbar gelohnt, man hat alle Konkurrenten abgehängt. Ein anderer Ringlaser wie beispielsweise der UG-2 in Neuseeland mit beachtlichen 832 Quadratmetern war aufgrund seiner Größe und heterogenen Struktur zu „klapprig“, um ernsthaft ein Ergebnis zu liefern. Der GEOsensor, ein Ringlaser für seismische Beobachtungen, steht in Piñon Flat, ca. 200 Kilometer nordöstlich von San Diego in Kalifornien. Er spielt im Moment keine große Rolle, da er Probleme mit dem Betrieb hat.

Zum Messen in den Keller gehen

So ist der Ringlaser in Wettzell das einzige wirklich produktive Messgerät dieser Art und zeigt obendrein die größte Genauigkeit und Stabilität. „In der Vergangenheit hat es mehrere Versuche gegeben, große Ringlaser zu bauen, aber nur unser System hat ‚abgeliefert‘, freut sich Schreiber. „Dazu war aus meiner Sicht die neue Spiegeltechnik im Windschatten der Gravitationswellenantennen die entscheidende Technologie.“

Das nächste Ziel seiner Forschergruppe ist nun zum einen, die Genauigkeit der Konstruktion so zu erhöhen, dass sie Veränderungen der Erdrotationsgeschwindigkeit eines einzelnen Tages erfassen kann. Zum anderen wollen die Wissenschaftler den Ringlaser für einen dauerhaften Betrieb rüsten, bei dem die Apparatur auch über Jahre keine Abweichungen produziert. Karl Ulrich Schreiber: „Salopp gesagt: Wir wollen künftig mal eben in den Keller gehen können und nachschauen, wie schnell sich die Erde gerade dreht.“

Brigitte Röthlein