

ERST RECHNEN, DANN FLIEGEN

WIE DAS VIRTUELLE TRIEBWERK DIE FORSCHUNG BEREICHERN KANN

Weitere Themen:

- ▶ **PROFESSIONELLES LIEGEN LASSEN**
Mit Betruhestudien Weltraum-Krankheiten auf der Spur
- ▶ **SONNE UND SALZ**
DLR-Forschung für solarthermische Kraftwerke

AUF DEN BRUCHTEIL EINER SEKUNDE

Mit Joduhr, Frequenzkamm und Laserterminal zu einer verbesserten Positions- und Zeitbestimmung

von Katja Lenz

© DLR

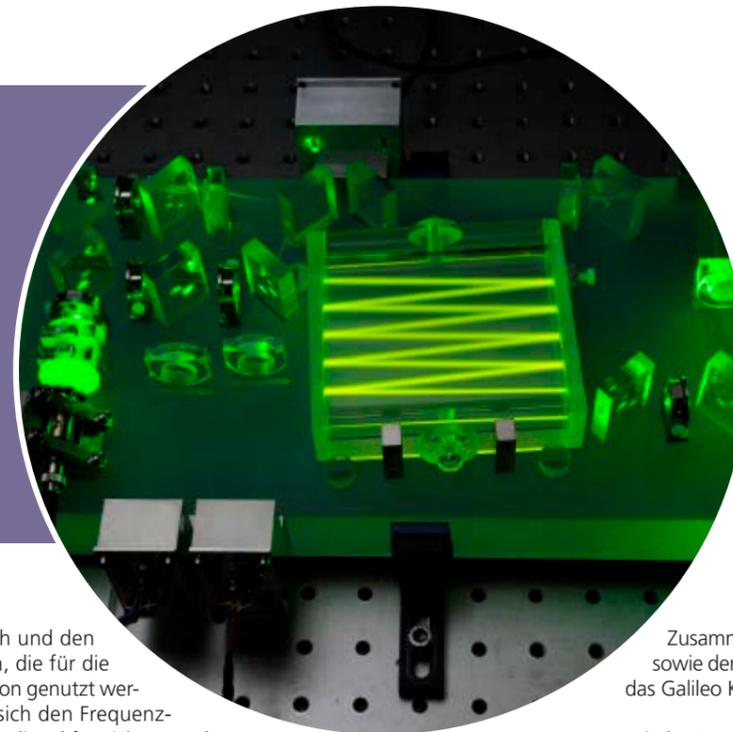


Seit Jahrtausenden erfinden Menschen immer bessere Geräte, um die Zeit zu messen. Mechanische Uhren, die auch als Armbanduhr oder Taschenuhr getragen werden, haben noch eine Ungenauigkeit von einer Sekunde am Tag. Bei Quarzuhren, die mit elektrischer Spannung arbeiten, ist es eine Sekunde im Jahr. Atomuhren verlieren etwa eine Sekunde in einer Million Jahren. Sie basieren auf der Schwingungsfrequenz bestimmter Atome. Und bei einer laseroptischen Uhr dauert es eine Milliarde Jahre, bis sie vielleicht eine Sekunde danebenliegt. Viel genauer geht es nicht mehr. Eine solche optische Uhr – konkreter eine auf Jod basierende Atomuhr – gehört zum Projekt Compasso. Sie soll die Satellitennavigation durch das Galileo-System so präzise wie nie zuvor machen.

Aber was hat eine Uhr überhaupt mit Navigation zu tun? „Uhren sind eine zentrale Technologie in jedem Satellitennavigationssystem“, sagt Dr. Stefan Schlüter, Compasso-Projektleiter im Galileo Kompetenzzentrum des DLR. Satelliten senden konstant Signale, mit denen der Empfänger seinen Standort bestimmen kann. Je präziser die Signal-Laufzeiten zwischen Sender und Empfänger ermittelt werden, desto genauer der Standort. Im neu gegründeten Galileo Kompetenzzentrum des DLR am Standort Oberpfaffenhofen werden neben der optischen Uhr auch ein Frequenzkamm und ein Terminal für den Einsatz in künftigen Generationen der Galileo-Satelliten vorbereitet.

Wie funktioniert die optische Uhr?

Ganz allgemein besteht eine Uhr aus einem Pendel, das möglichst gleichmäßig schwingt, und einem Zähler, der diese Schwingungen erfasst. Je schneller die Schwingung, umso feiner die Zeitmessung. Bei optischen Uhren dient ein Atom als „Pendel“. „Das Atom sendet eine definierte Welle im optischen Frequenzbereich, also im sichtbaren Licht aus“, erklärt Stefan Schlüter. „Bei Compasso ist dies molekulares Jod mit einer Wellenlänge von 532 Nanometern.“ Licht mit dieser Wellenlänge ist grün. Der Frequenzkamm ist die Schnittstelle zwischen dem



Die Jod-basierte Frequenzreferenz, bei der eine Hyperfeinlinie von Jodmolekülen mit einem Laser gemessen wird, kann die Uhren der Galileo-Satelliten genauer machen. Die Frequenzreferenz wird im DLR-Institut für Quantentechnologien unter Leitung von Prof. Braxmaier und Dr. Schuldt entwickelt, deren langjährige Forschungsarbeiten auf dem Gebiet quantenoptischer wissenschaftlicher Weltraummissionen auch zu dem Missionskonzept Compasso führten.

Zusammenarbeit zwischen Forschung und Industrie sowie der Technologietransfer sind charakteristisch für das Galileo Kompetenzzentrum.

optischen Bereich und den Radiofrequenzen, die für die Satellitennavigation genutzt werden. Man kann sich den Frequenzkamm als ein Laserlineal für Licht vorstellen. Er besteht aus etwa 100.000 bis 1.000.000 schmalbandigen Laserfrequenzen. Die Kombination mit dem Frequenzkamm ist nötig, weil optische Uhren so extrem schnell schwingen. Es gibt keine anderen elektronischen Geräte, die in der Lage sind, diese Schwingungen noch zu zählen. Deswegen wandelt der Frequenzkamm sie so um, dass sie mit herkömmlichen Systemen verbunden werden können.

Die optische Joduhr wird vom DLR-Institut für Quantentechnologien entwickelt, der Frequenzkamm vom Industriepartner Menlo. Das Laserterminal kommt von der Firma Tesat. Weitere DLR-Institute sind beteiligt. Mit dem Laserterminal ist es möglich, das vom Frequenzkamm erzeugte Signal und die Zeitinformationen zum Boden zu übertragen und dabei gleichzeitig hochgenaue Entfernungsmessungen zu leisten. Die enge

Das europäische Satellitennavigationssystem Galileo ist seit 2016 in Betrieb und wird noch weiter vervollständigt. In wenigen Jahren werden 30 Satelliten die Erde in 23.222 Kilometern Höhe umkreisen. Schon jetzt gilt Galileo als sehr präzise. „Aber im Vergleich dazu ermöglichen die neuen Technologien eine bis zu zehnfach genauere und schnellere Positionsbestimmung – im Idealfall bis in den Zentimeterbereich. Zudem würden Robustheit und Autonomie des Systems zunehmen“, erklärt Stefan Schlüter. Es wäre also klar, auf welcher Spur und mit welchem Abstand ein Auto fährt. Auch für die Erdbeobachtung aus dem All ist die Genauigkeit wichtig: Über Zeitmessungen lassen sich Veränderungen auf der Erdoberfläche, wie Wasserhöhen oder Gletscherschmelzen, nachweisen. Oder für Finanzmärkte und Energieversorgung: Hier geht es nicht um den Standort, sondern um die hochpräzise Zeitinformation. Je kleiner die Unterteilung der Sekunden, desto mehr Aktionen können mit einem exakten Zeitstempel durchgeführt werden.

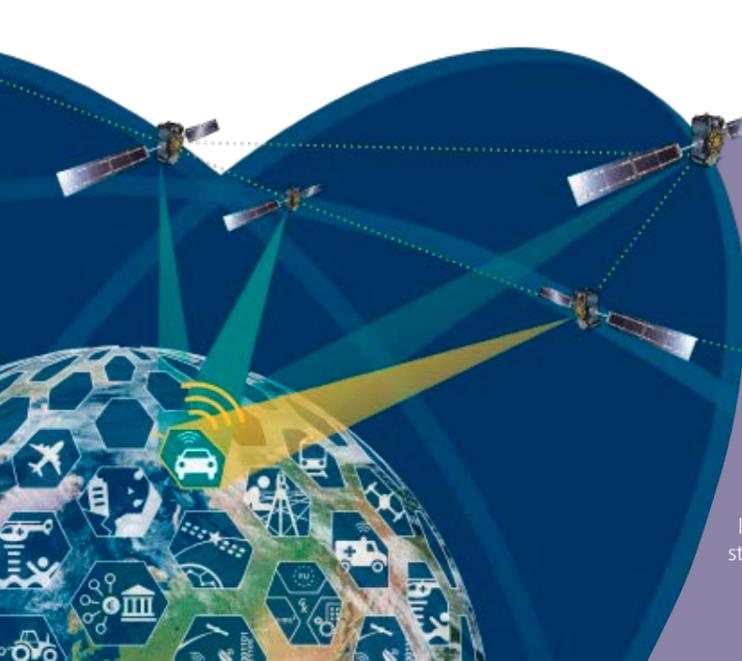
Aus dem Columbus-Kontrollzentrum wird Compasso voraussichtlich ab 2025 betrieben werden.

DAS GALILEO KOMPETENZZENTRUM

Die besten Navigationstechnologien, die den höchsten Nutzen bringen – daran arbeitet das Galileo Kompetenzzentrum am DLR-Standort in Oberpfaffenhofen. Gegründet wurde es im Jahr 2019, die offizielle Eröffnung fand im Oktober 2021 statt. Hier werden die Nutzerinnen und Nutzer, die Bodeneinrichtungen und die Satelliten gleichermaßen betrachtet. Ziel ist es, zukunftsfähige Konzepte und Technologien für das europäische Satellitennavigationssystem umzusetzen und einen Beitrag zur Weiterentwicklung von Galileo zu leisten. Aktuell sind 40 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für das Galileo Kompetenzzentrum tätig und es wird stetig ausgebaut: Im Jahr 2024 sollen bis zu 150 Personen an den Themen arbeiten.

Eine Hauptaufgabe liegt in der technischen Umsetzung und Demonstration zukunftsfähiger Konzepte und Technologien. Die wissenschaftlichen Grundlagen stellen die Institute und Einrichtungen des DLR bereit, mit denen das Galileo Kompetenzzentrum eng zusammenarbeitet. So kann es auf fundiertes wissenschaftlich-technisches Fachwissen und die jahrelange Erfahrung mit den Anforderungen verschiedener Nutzergruppen zurückgreifen. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Verwendung und Förderung der Quantentechnologien. Mit seiner Expertise soll das Kompetenzzentrum ein Ansprechpartner für Politik, Forschung, Industrie, Europäische Kommission und weitere Partner sein.





VIER SATELLITEN FÜR EINE POSITION

Für die Positionsbestimmung muss der jeweilige Abstand der Satelliten zum Empfangsgerät auf der Erde ermittelt werden. Dieser ergibt sich aus der Zeitspanne, die das Signal braucht, bis es vom Satelliten dort ankommt. Die Positionen der Satelliten sind bekannt, aber da die Uhren des Empfängers und des Galileo-Systems nicht synchronisiert sind, werden mindestens vier Satelliten zur absoluten Positionsbestimmung benötigt. Die Satelliten-Uhren müssen extrem genau arbeiten: Eine Zeitungenauigkeit von nur einer Millisekunde ergibt einen Fehler auf der Erde von 300 Kilometern. Das entspricht ungefähr der Entfernung zwischen Köln und Bremen. Je mehr Satelliten empfangen werden und zusammenarbeiten, desto genauer und stabiler ist die Positionsbestimmung auf der Erde.

Testphase auf dem Forschungsbalkon der ISS

Bevor die neuen Technologien in die Satelliten eingebaut werden, müssen sie sich bewähren. Zuerst im Labor auf der Erde, dann auf der Internationalen Raumstation ISS. Auch dafür ist das Galileo Kompetenzzentrum zuständig. Es bringt die Entwicklungen der DLR-Institute gemeinsam mit der Industrie so voran, dass sie für die Galileo-Satelliten und die Bodensysteme vorbereitet sind. Voraussichtlich 2025 fliegen die optische Uhr, der Frequenzkamm und das Laserterminal in einem Raumtransporter zur ISS. Sie werden dann in die Bartolomeo-Plattform integriert – ein „Balkon“ am europäischen Columbus-Modul der ISS. Die Plattform hat auf fünf Quadratmetern Platz für Forschung im freien Weltraum. Eineinhalb Jahre bleiben die Compasso-Komponenten dort, dann kehren sie für Analysen zur Erde zurück.

AM PROJEKT COMPASSO BETEILIGTE DLR-INSTITUTE UND -EINRICHTUNGEN

- Galileo Kompetenzzentrum
- Institut für Kommunikation und Navigation
- Institut für Quantentechnologien
- Institut für Softwaretechnologie
- Raumflugbetrieb und Astronautentraining
- Institut für Raumfahrtssysteme
- Institut für Optische Sensorsysteme



Compasso-Projektleiter Dr. Stefan Schlüter prüft am Bildschirm die Signale des Frequenzkamms.

Welche Vorteile bringt die Genauigkeit bei der Satellitennavigation?

Compasso nutzt neue Technologien aus der Quantenoptik. Im Vergleich zu herkömmlichen Systemen versprechen die Entwicklungen eine höhere Genauigkeit, Ausfallsicherheit und erweiterte Anwendungen. „Der Verkehrsbereich ist ohne globale Satellitennavigations-signale gar nicht mehr vorstellbar“, sagt Stefan Schlüter. „Das reicht von der Individualreise über Bahn-, Schiffs- und Luftverkehr bis hin zum automatisierten Fahren.“ Im Bahnverkehr könnten durch hochgenaue Positionsbestimmungen Zusammenstöße vermieden werden. Der Schiffsverkehr könnte Küsten- und Hafennavigation optimieren. Die Seenotrettung würde von einer zuverlässigeren Ortung profitieren. In der Luftfahrt wären Präzisionslandungen trotz schlechter Sicht möglich. Und für die Landwirtschaft bringt eine bessere Navigation eine Einsparung von Düngemitteln und Treibstoff.

Der Name Compasso leitet sich von dem ersten kommerziellen, wissenschaftlichen Instrument ab, das der italienische Astronom Galileo Galilei (1564–1642) entwickelt hat: ein geometrischer und militärischer „Kompass“. Er ähnelt einem Proportionszirkel aus zwei Linealen und gilt als ein Vorläufer des Rechenschiebers. Außerdem konnten mit ihm Entfernungen auf Seekarten gemessen werden. Navigation war zu Galileo Galileis Zeiten noch mit großen Unsicherheiten verbunden. Das ist Geschichte – heute funktioniert Navigation über winzige Sekundenbruchteile von hochgenauen Taktgebern.

Katja Lenz ist Presseredakteurin im DLR.



Die Joduhr ist eine Entwicklung aus dem Institut für Quantentechnologien. Die Technologie wird nun zusammen mit dem Galileo Kompetenzzentrum welt-raumfähig gemacht.

NACHGEFRAGT

Hier beantworten unsere Forscherinnen und Forscher Fragen aus der Community

Wer Fragen stellt, wird verstehen, warum etwas geschieht und warum Dinge in einer bestimmten Weise funktionieren. Besonders in der Wissenschaft ist eine solche neugierige Herangehensweise unverzichtbar, denn nur so lassen sich komplexe Themen durchdringen und können verstanden werden. Regelmäßig erreichen uns Fragen zu den verschiedensten wissenschaftlichen Themen über unsere Social-Media-Kanäle, per Brief oder E-Mail. Wenn auch Ihnen eine Frage unter den Nägeln brennt, schreiben Sie uns an magazin@dlr.de.

Frage von Tobias H. via E-Mail

Ich bin Berufspendler und interessiere mich aus Umweltgründen für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben. Das SLRV vom DLR wäre eine echte Alternative zu meinem jetzigen Auto. Gibt es im DLR konkrete Pläne, das SLRV als Serienauto im privaten Verkauf anzubieten?



Das SLRV (Safe Light Regional Vehicle) ist ein Kleinfahrzeug mit Brennstoffzellenantrieb. Seine Karosserie ist in Sandwichbauweise konstruiert, weshalb sie nur 90 Kilogramm wiegt, und es tankt Wasserstoff. Obwohl das SLRV schon teilweise auf der Straße unterwegs war, handelt es sich um einen Forschungsprototypen. Sprich, das DLR wird diesen für seine Forschung nutzen – für eigene Projekte und gemeinsam mit Partnern aus Industrie und Wissenschaft. Bevor ein Fahrzeug wie das SLRV seinen Weg auf die Straße finden kann, müssten noch einige Weiterentwicklungen und entsprechende Investitionen erfolgen – in Bezug auf Sicherheit für Straßenzulassung, Design, Ausstattung, Stauräume oder Komplettverkleidung zum Schutz gegen Nässe. Da es sich beim DLR um eine zu weiten Teilen öffentlich finanzierte Forschungseinrichtung handelt, entwickeln wir Technologien bis hin zu den Prototypen. Eine Entwicklung für den Markt und die Serie ist dann bei Interesse die Aufgabe von Unternehmen. Hierbei kann das DLR beraten und es unterstützt und lizenziert zum Beispiel bestimmte Technologien oder Ansätze.

Michael Kriescher arbeitet in der Abteilung Fahrzeugarchitekturen und Leichtbaukonzepte des DLR-Instituts für Fahrzeugkonzepte

Frage von Andrej D. via E-Mail

Ich habe vor kurzem den Film „Don't look up“ gesehen, in welchem ein Asteroid die Erde zerstört. Seitdem lässt mir dieses Szenario keine Ruhe. Kann es auch in der Wirklichkeit passieren, dass ein Asteroid in der nächsten Zeit unserer Erde gefährlich wird?



Sie können ruhig schlafen! Die Wahrscheinlichkeit, dass uns zu Lebzeiten etwas durch einen Asteroideneinschlag zustößt, ist nahezu Null. Von den etwas mehr als einer Million Asteroiden, die heute bekannt sind, kreisen fast alle im Raum zwischen Mars und Jupiter um die Sonne. Etwa 27.000 Asteroiden mit Durchmessern von mehr als 100 Metern bewegen sich auf Bahnen, die sie auch ins innere Sonnensystem führen und dabei die Erdbahn kreuzen. Diese Erdbahnkreuzer – wir nennen sie die NEOs (Near Earth Objects) – werden mit Teleskopen sehr genau beobachtet, um ihre Bahnen zu kennen. Von ihnen ist gegenwärtig keiner bekannt, der in diesem Jahrhundert mit der Erde kollidieren könnte. Einige davon, auch das ist Teil der Wahrheit, werden der Erde in den kommenden Jahrzehnten aber nahe kommen: Das

sind die „potenziell gefährlichen Asteroiden“, die die Erde in weniger als siebeneinhalb Millionen Kilometern passieren. Auch in dieser Gruppe, etwa einem Fünftel der bekannten NEOs, ist kein Asteroid, der die Erde treffen wird. Die Vorbeiflugentfernungen betragen in der Regel mindestens mehrere Zehntausend Kilometer, meist sind sie weiter entfernt als der Mond (400.000 Kilometer). Was wir nicht so genau wissen, ist, wie sich die Bahnen dieser Asteroiden durch nahe Vorbeiflüge an der Erde verändern, ob sie ihr also bei der nächsten Begegnung näherkommen werden oder ob sie sich weiter von der Erde entfernen.

Die Körper, die kleiner sind als 100 Meter, sind nicht alle bekannt. Auch sie können beträchtlichen Schaden anrichten, wie beispielsweise der 60 Meter große Asteroid, der 1908 in Sibirien in der Region Tunguska Wälder von der Fläche Berlins zerstörte, oder erst 2013 der 20 Meter große Asteroid, der in 30 Kilometern Höhe über der Stadt Tscheljabinsk in Westsibirien explodierte und Tausende von Fensterscheiben in der Millionenstadt splintern ließ (Todesopfer gab es aber keine). Ereignisse wie Tunguska passieren nach allem, was wir wissen, statistisch betrachtet ein bis zwei Mal pro Jahrhundert.

Ulrich Köhler ist verantwortlich für die Öffentlichkeitsarbeit am DLR-Institut für Planetenforschung

Titelbild

Das Triebwerk ist das Herzstück des Flugzeugantriebs. Im DLR wird es auf Herz und Nieren getestet: digital auf dem Rechner und real auf Prüfständen wie hier auf dem M2VP (Mehrstufen-Zweiwellen-Axialverdichter-Prüfstand) des Instituts für Antriebstechnik in Köln. Wie in vielen Bereichen steigt auch in der Forschung die Bedeutung von Simulationen. Für die Luftfahrt entwickeln die DLR-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler beispielweise eine Plattform, auf der sie neue Konzepte und Ideen für virtuelle Triebwerke erproben.

