

Raumfahrt und Gravitation – Swing-by mit der Schwerkraft

Martin Bünnagel

■ **Jedes kleinste Materieteilchen zieht jedes andere an. Gravitation ist die Kraft, die alles verbindet. Sie formt Planeten und Galaxien, beeinflusst die Bahn von Satelliten und Experimente auf Raumstationen. Sie beschleunigt und bremst Sonden auf ihrem Weg zu den Planeten. Gravitation ist Schwerpunkt von Astrophysik und Geodäsie.**

Während die Anspannung im ESA-Satellitenkontrollzentrum in Darmstadt um 23:51 Uhr plötzlich sehr groß war, verlief der 20. August dieses Jahres auf der Internationalen Raumstation (ISS) wie jeder andere Tag. Dort dominierte Weltraumbotanik das wissenschaftliche Programm. Die NASA-Flugingenieurin Jeanette Epps untersuchte im Labormodul Kibo die Auswirkungen von Mikrogravitation auf den Wuchs von Pflanzen.

Auch in Darmstadt ging es um Gravitation – um ein präzises und zugleich gewagtes Manöver. Die Raumsonde Juice (Jupiter Icy Moons Explorer) näherte sich in diesen Minuten der Erde. In den Tagen zuvor von der Anziehungskraft des Mondes beschleunigt auf 6,4 Kilometer pro Sekunde (km/s), war sie jetzt nur noch 6.840 Kilometer von der Erdoberfläche entfernt. Und das Manöver Lunar Earth Gravity Assist (LEGA) der ESA war eine Premiere der Raumfahrt.

Während die über fünf Tonnen schwere Raumsonde Juice sich mit 15.000 Kilometern pro Stunde (km/h) der Erde näherte, umkreiste Jeanette Epps in ihrem ISS-Labor die Erde mit 28.000 km/h. Epps schwebte auch an diesem Tag scheinbar schwerelos durch ihr Labor.

Gravitation und Geodäsie

Für die Geodäsie spielt Gravitation eine zentrale Rolle, etwa bei der Bestimmung des Geoids als hypothetische, von der Schwerkraft bestimmte Oberfläche, die auf den Meeren mit dem mittleren Meeresspiegel in Ruhe übereinstimmt und auf den Landmassen eine Fortsetzung findet. In der Geodäsie dient das Geoid als Referenzfläche für Höhenmessungen, da es die unregelmäßige Verteilung der Erdmasse und die dadurch entstehenden Gravitationsanomalien berücksichtigt.

Mit gravimetrischen Methoden können diese Gravitationsanomalien untersucht werden, die auf Massenunterschiede in der Erdkruste, wie Bergketten, Erzvorkommen oder Ozeanbecken, hinweisen. Gravitation ist auch ein entscheidender Faktor bei der Nutzung von GNSS (Global Navigation Satellite System), da die Satellitenbahnen direkt beeinflusst werden. Die damit berechnete Höhenkoordinate muss aufs Geoid reduziert werden. Ohne die Korrektur

würden GNSS-basierte Höhenangaben erheblich von den tatsächlichen Gebrauchshöhen abweichen.

Und schließlich kann die Geodäsie durch die Vermessung der Bahnen von Satelliten wie GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) die Verteilung der Masse auf der Erde und Veränderungen im Gravitationsfeld untersuchen – etwa zur Beobachtung des Klimawandels (siehe dazu auch Franziska Konitzer, zfv Heft 6/2019, »Unterirdisches Grundwasser, überirdische Beobachtung«).

Freier Fall bei 90 Prozent Gravitationskraft

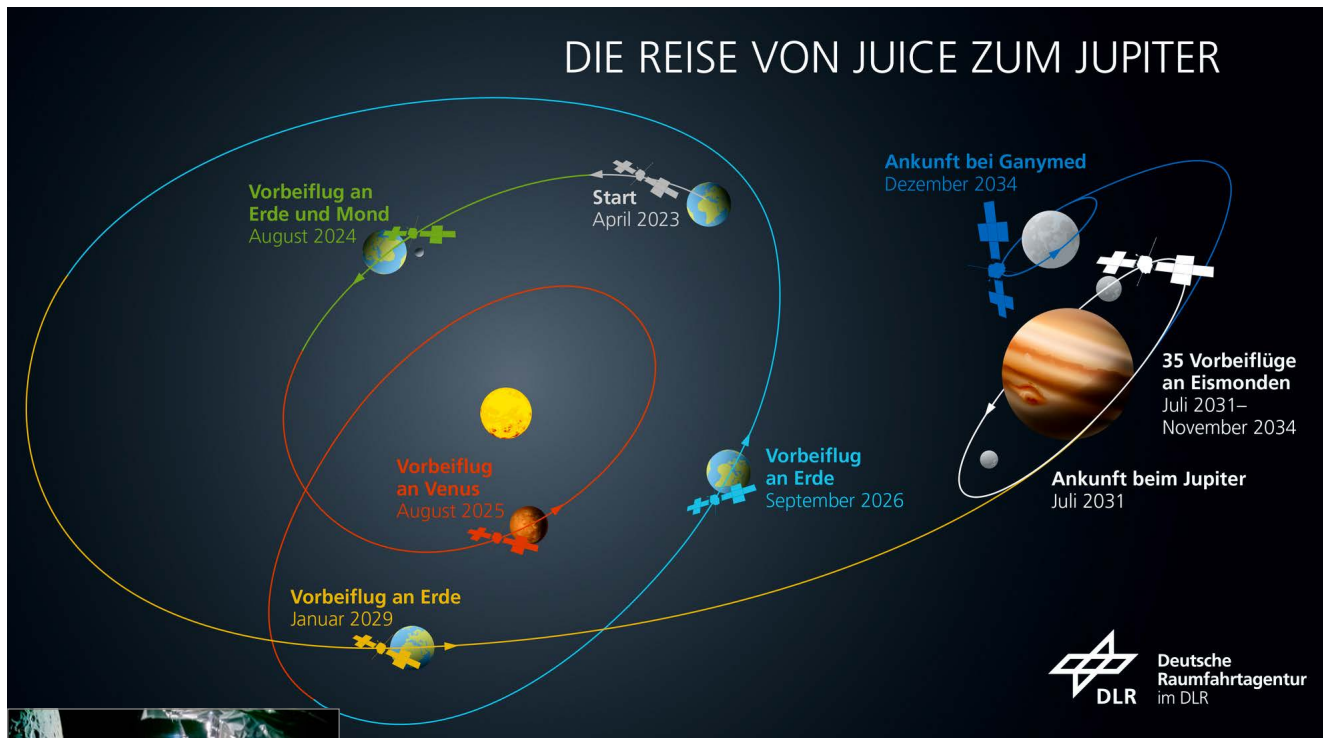
Gravitation ist die Kraft, die alles verbindet. Auch die Raumsonde Juice und Jeanette Epps. Wie an jedem Tag, befand sich die ISS auch an diesem 20. August in rund 400 Kilometern Höhe über der Erdoberfläche. Jeanette Epps wurde in diesen Minuten Richtung Erdmittelpunkt angezogen und mit ihr die 450 Tonnen schwere ISS. Auf Epps wirkten noch 88 % bis 90 % der Erdanziehungskraft.

Doch warum fiel sie nicht herunter? Weil sich die ISS auf ihrer näherungsweise Kreisbahn mit 28.000 km/h als geschlossenes System um die Erde bewegt und die Tangentialgeschwindigkeit die Raumstation in einer kontinuierlichen Bahn hält. Dabei wirkt eine zweite Kraft der Gravitationskraft entgegen. Es ist die Zentrifugalkraft (auch Fliehkraft genannt), die bei Jeanette Epps und ihren Kollegen im Zusammenspiel mit der auf sie wirkenden Gravitation das Gefühl der Schwerelosigkeit erzeugt. In diesem Zustand des freien Falls, ohne wirklich zu stürzen, erscheinen Astronauten und Objekte an Bord schwerelos – im Gleichgewicht zwischen Gravitationskraft und Zentrifugalkraft.

Mikrogravitation auf der ISS

Mit dem Zustand der sogenannten Mikrogravitation sind nicht vollständig eliminierbare Kräfte verbunden, die auch innerhalb der ISS auftreten. Weiterhin wirkt die Erdgravitation nicht gleichmäßig auf die ISS, was durch die Massenverteilung und geologische Strukturen auf der Erde, wie Gebirgsketten und Tiefseebecken, verursacht wird.

Diese regionalen Gravitationsunterschiede liegen in der Größenordnung von etwa $\pm 0,2\%$ relativ zur Durchschnittsgravitation der Erde. Die Effekte sind klein und wirken eher indirekt, indem sie bei der ISS eine Präzession verursachen, also eine langsame Rotation der Bahnebene. Denn durch die kleinen Schwankungen in der Erdanziehungskraft sowie durch lokale Gravitationsanomalien und Gezeitenkräfte erfährt die ISS minimale Beschleunigungen in der Größenordnung von 10^{-6} bis $10^{-7} g$ – also



Quelle: Deutsche Raumfahrtagentur im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)



Quelle: European Space Agency (ESA)

← Selfie der Jupiter-Sonde Juice (Jupiter Icy Moons Explorer) am 19. August 2024 beim Swing-By-Manöver am Mond

einem Bruchteil der Erdbeschleunigung (g). In der Nähe der Erdoberfläche ist sie annähernd konstant und liegt bei $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Die wirkenden Kräfte führen auch dazu, dass sich die ISS und Objekte im Inneren der ISS minimal bewegen, was für empfindliche wissenschaftliche Experimente an Bord relevant ist. So überwacht das »Space Acceleration Measurement« (SAMS) kontinuierlich die Beschleunigungen an Bord der ISS. Und das ARIS (Active Rack Isolation System) sorgt bei empfindlichen Experimenten auf der ISS für eine Schwingungsisolierung.

Swing-By mit der Erde

Während Jeanette Epps begann, Kohlendioxidflaschen im botanischen Weltraumhabitat zu überprüfen, brachen im ESA-Kontrollzentrum in Darmstadt die entscheidenden Minuten an. Gestartet im April 2023 vom Weltraumbahnhof Kourou (Französisch Guayana), war die Raumsonde Juice auf dem Weg zum Jupiter und seinen Monden. Doch um Treibstoff zu sparen – die 3,5 Tonnen Treibstoff an Bord würden für einen Direktflug zum Jupiter nicht reichen – kehrte sie nun zur Erde zurück, nachdem sie einen Tag zuvor den Mond in einem Abstand von nur 750 Kilometern passiert hatte. Dabei beschleunige Juice auf 15.000 km/h. Solche Vorbeiflüge werden Swing-By-Manöver genannt

und dienen seit Jahrzehnten Kurs- und Geschwindigkeitsanpassungen von Raumfahrzeugen.

Das Grundprinzip beruht auf der Wechselwirkung zwischen einem leichtgewichtigen Raumfahrzeug und einem massiven Himmelskörper, wie einem Planeten. Bei einem Swing-By können Raumfahrzeuge beschleunigt oder abgebremst werden. Die Annäherung erfolgt dabei in einem bestimmten Winkel und einer definierten Geschwindigkeit. Wenn der Planet sich in dieselbe Richtung bewegt wie die Sonde, erhält diese zusätzliche Geschwindigkeit. Bewegt sich der Planet auf die Sonde zu, bremst das Raumfahrzeug ab. Die Voyager 1- und 2-Missionen nutzten in den 1970er Jahren so zum Beispiel Swing-by-Manöver im Orbit von Jupiter und Saturn, um ihre Geschwindigkeit um bis zu 18 km/s zu erhöhen und so in das äußere Sonnensystem gelangen zu können.

Aber einen Swing-By mit Mond und Erde, wie bei der Sonde Juice, gab es in der Raumfahrt noch nie. In diesen entscheidenden Minuten lenkte die Gravitation die Raumsonde Juice um 23:58 Uhr über Südostasien und dem Pazifik auf eine neue Flugbahn in Richtung Venus und bremste sie um 4,8 Kilometer pro Sekunde ab. Erreicht sie im August 2025 die Venus, erfolgen 2026 und 2029 noch zwei weitere Swing-By-Manöver mit der Erde, bevor Juice die weite Reise zum Jupiter schließlich antreten wird, um dessen Orbit im Jahr 2031 zu erreichen.

Jeanette Epps verstaute am Ende der beiden Versuchsdurchläufe an diesem 20. August 2024 ihre Pflanzenproben in einem wissenschaftlichen Gefrierschrank, um sie zur weiteren Analyse auf der Erde zu konservieren. Die Ergebnisse können als Grundlage für landwirtschaftliche Techniken im Weltraum dienen, um Besatzungen zu versorgen, die tiefer in den Weltraum vordringen werden – zum Beispiel bei Flügen zum Mars.

Kontakt: martin.buennagel@zon-verlag.de