

Liebe Leserin, lieber Leser,

vor 40 Jahren, im Oktober 1975, hatten binnen dreier Tage zwei sowjetische Raumsonden die Venus erreicht gehabt. Venera 9/10 hatten Parkbahnen um die Venus eingeschlagen und hitze- und druckfeste Landeapparate abgesetzt. Beide Kapseln setzten weich auf und übermittelten ca. eine Stunde lang, was sie so vorfanden. Erstmals wurden auch Fotos von der Oberfläche via Orbiter zur Erde gesendet, was eine Sensation war. Die Messungen bestätigten, was Radioastronomen bereits Ende der 50er Jahre befürchteten: Venus ist höllisch heiß. Wir wissen, weshalb das so ist. Die Energiemenge, welche die Venus in einem gewissen Zeitraum von der Sonne einfängt, die also nicht von der Wolkenhülle ins All zurückgeworfen wird, muss sie auch im Gleichgewichtsfall über diesen Zeitraum wieder los werden – als (langwellige) Strahlung, da der leere Raum die Wärme nicht leitet. Die dicke CO₂-Atmosphäre aber legt sich wie ein Pelzmantel um den Planeten. Infolge des Treibhauseffekts wird Venus die am Boden der Atmosphäre ankommende Sonnenenergie erst bei fast 500° wieder los. Ohne Treibhauseffekt wäre die Venus trotz Sonnennähe kühler als die Erde – weil ihre (sphärische) Albedo, das Rückstrahlungsvermögen, die Albedo¹ der Erde um das Zweieinhalbfache übertrifft. Die Venus erhält, nach Abzug des reflektierten Lichts, weniger Sonnenstrahlung pro Quadratmeter Oberfläche als die Erde!

Die beiden Venussonden waren 4 1/2 Monate unterwegs gewesen: auf H o h - m a n n b a h n e n . So eine Übergangsbahn berührt die Bahnen von Erde und Zielplanet. Entsprechend dem 3. Keplerschen Gesetz dauert die Reise auf der Halbellipse $((1 + r)/2)^{3/2}/2$ Jahre, wobei r der Bahnradius bei einer angenommenen Kreisbahn des Zielplaneten ist (0,72 AE bei der Venus). Diese Route ist direkt und schnell, aber wegen des zweimaligen Bremsens energieaufwendig. Ins Auge gefasst wurde sie erstmals 1925 in dem Buch „Die Erreichbarkeit der Himmelskörper“ von dem deutschen Ingenieur Walter Hohmann (1880–1945).

Heutzutage ist „Billigfliegerei“ angesagt. Die Ausnutzung natürlicher Gegebenheiten, wie lokaler Minima in der interplanetaren „Energiewelt“,

¹Um die Erde abzukühlen müsste man sie bloß weißen!

und des himmelsmechanischen Chaos beim Drei-Körper-Problem hilft, treibstoffsparend ans Ziel zu gelangen. Das hat seinen Preis: Flugzeit.

Himmelsmechanik ist, dank des Computers und des Rufes nach treibstoffsparenden Routen, wieder *in!* Spaß beim Lesen wünscht

Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im Oktober

Merkur erreicht am 16. Oktober mit 18° seine größte westliche Elongation. Das ist nicht viel, beschert aber eine Morgensichtbarkeit des schnellfüßigen Wandelsterns vom 10. bis zum 29. Oktober. Gute Sichtbedingungen nahe dem Osthorizont sind Voraussetzung. Am 16. steht Merkur gut 1 1/2 Stunden vor der Sonne auf. Nicht entgehen lassen sollte man sich das nahe Beieinander von Mond, Merkur, Venus, Jupiter und Regulus am 11. Oktober in der Früh. Lediglich Saturn ist nicht von der Partie. Er ist, zumindest noch am Monatsanfang, den Abenden vorbehalten.

Der Morgenstern erreicht am 26. Oktober mit $46,5^\circ$ seine größte westliche Elongation. Einen Tag zuvor ist Venus halb zu sehen. Die Halbphase wird als Dichotomie bezeichnet.

Uranus steht am 12. Oktober der Sonne gegenüber in den Fischen. Mit 5,7 Größenklassen liegt er an der Sichtbarkeitsgrenze für das unbewaffnete Auge. Ein Fernglas ist zu empfehlen, will man den grünlich-strahlenden Planeten sehen, den ersten der Neuzeit. Uranus war erst 1781 von Wilhelm Herschel (1738–1822) entdeckt worden. Gesehen hatten ihn andere zuvor, aber das stellte sich erst hernach heraus.

Sommerzeit (MESZ) endet am Sonntag, dem 25. Oktober.

Chaos auf interplanetarer „Autobahn“

Vor genau einem Jahr wurde eine hydrologische Besonderheit erwähnt: der Europäische Hauptwasserscheidepunkt im Lunghinpass (2645 m), oberhalb des Heidi-Dörfchens Grevasalvas. Wenige Meter entscheiden darüber, wohin nach der Schneeschmelze des Wassers Reise geht: zum Schwarzen Meer, zur Nordsee oder zur Adria. Die Gebirgslandschaft des Engadins ist, in den Augen des Physikers, eine „Energiewald“. Höhe steht für potentielle

Energie. Ein Hauptwasserscheidepunkt ist mathematisch gesehen ein Sattelpunkt in dieser Landschaft. Will ich nicht großräumig das Gebirge umgehen oder durchtunneln, ist der Weg über einen Pass der am wenigsten beschwerliche, was im übrigen schon die Römer wussten, die bei Grevasalvas die Alpen überquerten. Hinzu kommt, befindet sich eine Murren am Scheidepunkt, entscheidet ein „Windhauch“ darüber, in welches Tal sie rollt.

Im Sonnensystem das Gleiche: Die Energielandschaft wird durch Sonne, Planeten, Monde geprägt. Sie ist im Wandel, weil Wandelsterne wandeln. In den beiden energetisch tiefsten Tälern hocken die Giganten: Sonne und Jupiter. Das Kleinzeug, die anderen Planeten und deren Monde, verursacht mehr oder weniger große trichterförmige Einbrüche in dieser Landschaft, gravitative Einflussphären. Und dazwischen gibt es spezielle Punkte, sog. Lagrangepunkte², wo die zu überwindende „Höhe“ (effektives Potential) lokal minimal ist. Den Lagrangepunkt L_1 im Erde-Mond-System beschreibt eindrucksvoll, wenn auch nicht ganz korrekt, Jules Verne in seiner Erzählung „Von der Erde zum Mond“ (1865). Von uns aus gesehen, vorm Mond gelegen, heben sich dort die Anziehungskräfte von Erde und Mond unter Berücksichtigung der Fliehkraft auf, d. h. im mitrotierenden Koordinatensystem. (Ersetzt man Erde durch Jupiter und den Erdmond durch die Io, schwebt im Lagrangepunkt L_1 des Jupiter-Io-Systems der ominöse Big-Brother-Monolith aus Arthur C. Clarkes „2010“.) Hinterm Mond, auf der Verlängerung der Verbindungsgeraden Erde-Mond, gibt's den Punkt L_2 . Ein Raumschiff, welches sich um den Mond herum von L_1 nach L_2 begibt, kann dort den gravitativen Einflussbereich der Erde verlassen, ohne den vollen Preis für die Überwindung des Potentialwalles der Erde zahlen zu müssen. Der Mond senkt die energetische Schwelle für interplanetare Flüge! Hat man es bis zum L_1 im Erde-Mond-System geschafft, bedarf es lediglich einer Änderung der Fluggeschwindigkeit von 50 m/s, um zum L_1 oder L_2 im Sonne-Erde-System zu gelangen. Der gravitative Einfluss des Mondes verbilligt den Lastentransport dorthin erheblich. Mit dem „Swing-by“ hat dies nichts zu tun.

Beim Lagrangepunkt L_1 des Sonne-Erde-Systems ist die Sonnensonde SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) geparkt, d. h. sie umkreist diesen Punkt, als ob dort etwas wäre. (Der Vorteil eines solchen Halo-orbits: Die Sonde steht nicht direkt vor der Sonne, was den Funkverkehr mit der Erde

²Insgesamt gibt es bei zwei gravitierenden Körpern fünf Lagrange- oder Librations(Gleichgewichts)punkte. Die ersten drei wurden von Leonhard Euler (1707–1783) entdeckt, die verbleibenden zwei von Joseph-Louis Lagrange (1736–1813).

beeinträchtigte.). Obgleich der Sonne um 1,5 Millionen Kilometer näher als die Erde, beträgt SOHO's Umlaufzeit um die Sonne exakt ein Jahr! (Ein in L_1 befindlicher Körper spürt wegen der Erde eine scheinbar verringerte Anziehung durch die Sonne. Diese zerrt in ihre Richtung, die Erde in Gegenrichtung.) Das mit dem „exakt ein Jahr“ gilt auch für den sonnenabgewandten Lagrangepunkt L_2 , wo sich übrigens diverse andere Weltraumobservatorien tummeln. Und nun kommt's: Der bequemste Weg zur Venus durch die Energielandschaft des Sonnensystems führt über die Pässe Sonne-Erde L_1 und Sonne-Venus L_2 . Es ist ein „Schleichweg“, geeignet für Frachtschiffe mit unverderblicher Ware. Verglichen mit einer Übergangsbahn à la Hohmann dauert die Fahrt viermal länger, kommt aber mit einem Drittel des Treibstoffs³ aus!

Die physikalischen Grundlagen sind simpel (die Berechnungen sind es nicht): Newtons $1/r^2$ -Gesetz der universellen Schwerkraft ist alles, was benötigt wird. Im Falle von zwei Körpern, Sonne und Planet, ist die Keplerellipse (bzw. allgemeiner ein Kegelschnitt) die exakte Lösung des Problems. Das herausgefunden zu haben, war Newtons (1642–1727) Verdienst. (Das Gesetz hatten andere schon vor ihm erraten gehabt.) Bei mehr als zwei Körpern wird's vertrackt, selbst wenn der dritte Körper so gut wie nichts wiegt (sog. eingeschränktes Drei-Körper-Problem). Wie kompliziert, das überschritt um 1900 die Vorstellungskraft des Durchschnittsgelehrten. Es bedurfte der Intuition eines Henri Poincaré (1854–1912), das himmelsmechanische Chaos zu „sehen“, das sich mit dem Drei-Körper-Problem mathematisch auftut. Aber erst durch den Computer wurde es in den 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts möglich, das Chaos graphisch und technisch Herr zu werden. Deterministisches Chaos heißt, dass eine kleine Änderung eine Riesenwirkung nach sich zieht. Das ist gemeint, ist vom „Schmetterlingseffekt“ die Rede. Und genau der ereignet sich nahe der erwähnten Lagrangepunkte. Um es irdisch-bildlich auszudrücken: Man erklimmt mit Schwung gerade so den Sattelpunkt, kommt also genau dort zum Stehen. Wohin die Reise geht, das entscheidet wegen der instabilen Lage dann ein winziger Impuls ... zum Schwarzen Meer, zur Nordsee oder zur Adria. Nach dem Schups in die richtige Richtung muss man sich bloß noch fallen bzw. rollen lassen! Man bedenke, dass das Bergbeispiel hinkt: Im Kosmos herrscht Reibungsfreiheit! Man rollt auf der anderen Talseite wieder bergauf!

³Vorausgesetzt ist allerdings ein Ionentriebwerk im Dauerbetrieb. Ohne Bremsen ist Venus nicht erreichbar.

Für Leser, denen das Reisen durch 6-dimensionale Räume nichts ausmacht, noch das folgende. Ein antriebsloser Raumflugkörper kann nur eine Bahn im 6-dimensionalen Phasenraum (bestehend aus drei Orts- und drei Impulskordinaten) einschlagen, bei der die Summe aus potentieller und kinetischer Energie konstant ist. Bei Energieerhaltung verringert sich zwangsläufig die Anzahl der Freiheitsgrade (die Dimensionalität des Problems) um eins, also auf fünf⁴. Wie von topologisch denkenden Himmelsmechanikern herausgefunden, windet sich so eine Bahn auf der zylindrischen Oberfläche eines „Schlauchs“. Lässt man den Impulsunterraum samt Geschwindigkeitsvektor unter den Tisch fallen, ist so eine „Verkehrsader“ im Ortsraum visualisierbar. In einem Sattelpunkt (Lagrangepunkt) durchdringen Schläuche einander. Dank des dort herrschenden himmelsmechanischen Chaos kann man im Prinzip ohne Energieaufwand „den Schlauch wechseln“! Das Umsteigen ermöglicht, sich von einem Lagrangepunkt eines Planeten zu einem anderen Lagrangepunkt eines anderen Planeten zu hangeln, bzw. zwischen den Monden eines mondreichen Planeten kostengünstig zu manövrieren. Da sich die Energielandschaft andauernd ändert, muss man ggf. nahe einem Lagrangepunkt etwas warten, bevor man sich zum nächsten Pass, einem Lagrangepunkt des nächsten Zwischenziels, fallen lassen kann. Ganz ohne Nachhilfe, d. h. gezielte Schubstöße (oder auch durch kontinuierlichen Schub), wird der anvisierte Pass in der Energielandschaft nur in seltenen Fällen zu erklimmen sein. Die günstigste Flugroute herauszufinden, d. h. die technisch erforderliche minimale Geschwindigkeitsänderung, ist ein anspruchsvolles Problem der numerischen Mathematik.

Eine künstlerische Darstellung einer interplanetaren „Autobahn“⁵ ist bei der NASA zu finden. Das Bild erinnert an natürlichen Transportrouten auf der Erde: Meeresströmungen, Jetstreams (Strahlströme).

Neben Raumsschiffen, die seit wenigen Jahren diese Pässe in der interplanetaren Energielandschaft überqueren, geraten seit Jahrmilliarden auch Meteorite und Kometen durch die winzigen Lagrange-Tore in die „Verkehrsadern“ zwischen den Welten. Sie bevölkern, zeitweilig und ohne Absicht, die gravitative Einflussphäre von Planeten (insbesondere Jupiter!), grob gesprochen

⁴Bei einer Bewegung in der Ebene sogar auf nur drei, was graphisch darstellbar ist.

⁵Ein solcher „Superhighway“, der sich mit der Wanderung der Planeten ständig ändert, ist nicht zu verwechseln mit der galaktischen „Hyperraum-Expressroute“ aus Douglas Adams’ (1952–2001) „Per Anhalter durch die Galaxis“, deren Bau die Erde bedauerlicherweise im Wege steht.

den Bereich zwischen L_1 und L_2 . Das schließt übrigens auch die bisher nicht erwähnten, von Joseph-Louis Lagrange (1736–1813) um 1760 aufgefundenen entlegenen Punkte L_4 und L_5 ein, wo die sog. Trojaner pendeln. Diese Asteroidenreservoirs scheinen sich im Laufe der Zeiten allerdings eher zu leeren denn zu füllen.

Wie u. a. irdische Marsmeteorite bezeugen, findet in Maßen ein stofflicher Austausch zwischen den Planeten (und Monden) statt – und das ohne einen einzigen Tropfen Treibstoff⁶! Ähnlichkeiten mit sporadischen Ereignissen auf der Erde – das Besiedeln der Kontinente in der Vorzeit, aber auch das Verbreiten von Schadstoffen in Schwaden, Chemikalien, Fallout, Sporen etc., durch den Luftozean und die Meere – sind nicht zufällig. Auch hinieden ist es Chaos in Gestalt von turbulenten Strömungen, was den Transport steuert.

⁶Zusammenstöße von Asteroiden oder das Ausgasen von Kometen können die Geschwindigkeitsänderungen bewirken, die zum Treffen und Durchfliegen des nächsten Lagrange-Tores vonnöten sind.