Die Gefahr des Abdriftens im Weltraum

In Bezug zum Beitrag „Astronauten bereiten Raumstation auf neues Labor vor" (SuW, Blick in die Forschung – Nachrichten, S. 18),
WIS-ID: 1183914

Gerhard Herms

Was geschieht mit einem Raumfahrer, der beim Außeneinsatz den Halt an der Außenhaut des Raumschiffes oder der Raumstation verliert oder sich von ihr abstößt? Hierüber bestehen in der Öffentlichkeit nur recht unklare oder sogar kuriose Vorstellungen – ein Grund, sich genauer mit den himmelsmechanischen Grundlagen zu beschäftigen.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Physik	Mechanik	Kräfteparallelogramm, Inertialsystem, beschleunigtes Bezugssystem, Schein- oder Trägheitskräfte, Zentrifugalkraft, Corioliskraft, Harmonische Schwingung
Astronomie	Himmelsmechanik, Raumfahrt	Gravitationsgesetz, Keplersche Gesetze
Fächerverknüpfung	Astro-Mathematik	Vektorprodukt

Der NASA-Astronaut Nicholas Patrick, Missions-Spezialist von STS-130 (Space Transportation System), beim Außenbordeinsatz bei der ISS (Internationale Raumstation) am 12. Februar 2010. Ein Halteseil verbindet ihn mit der Station. ©: NASA - http://spaceflight.nasa.gov/gallery/images/shuttle/sts-130/html/iss022e066880.html, Public Domain, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9501141.

Daniel: Wir haben uns gestern in der Hofpause über die Außeneinsätze auf der Raumstation ISS unterhalten. Dabei ging es um die Frage, was mit einem Astronauten passiert, wenn er bei fehlender Sicherheitsleine versehentlich einen Stoß erhält und er in den Raum hinaus schwebt. Robin, der immer alles fein auswendig lernt, meinte: „Das ist doch ganz klar! Es herrscht Schwerelosigkeit. Ein Körper, an dem keine Kraft angreift, bleibt im Zustand der Ruhe oder in geradlinig gleichförmiger Bewegung. Der Astronaut schwebt geradlinig mit gleichbleibender Geschwindigkeit in den freien Weltraum hinaus, immer weiter und weiter.“ Und das halte ich für Blödsinn!

Jan: Warum?

Daniel: Das würde doch bedeuten, dass man sich durch einen kleinen Stoß, also mit geringstem Energieaufwand, von der Umlaufbahn aus zu beliebig weit entfernten Zielen bewegen könnte.

Jan: Du hast Recht. Das erste Newtonsche Gesetz, auf das Robin seine Meinung stützt, gilt nur in einem Inertialsystem. Das ist ein Bezugssystem, das im Fixsternhimmel ruht oder sich geradlinig gleichförmig zu ihm bewegt.

Daniel: Wenn ich aber sage, dass der Astronaut, der sich an der Außenwand seines Raumschiffes festhält, im Zustand der Ruhe ist, dann benutze ich ein anderes Bezugssystem, nicht wahr?

Jan: Ganz recht! Es wird als „beschleunigtes Bezugssystem“ bezeichnet, weil es mit dem Raumschiff verbunden an dessen Kreisbewegung teilnimmt und so eine Radialbeschleunigung erfährt.

Daniel: Ich nehme an, dass es noch eine andere Art von beschleunigten Bezugssystemen gibt, nämlich solche, die sich geradlinig bewegen, aber dafür ihre Geschwindigkeit erhöhen oder verringern.

Jan: Richtig! In all diesen beschleunigten Bezugssystemen treten sogenannte Schein- oder Trägheitskräfte auf.

Daniel: Eine solche Trägheitskraft habe ich gerade vorhin erlebt, als der Bus scharf bremste!

Jan: Im beschleunigten Bezugssystem des auf einer Kreisbahn befindlichen Raumschiffes sind es zwei solcher Kräfte, nämlich die Zentrifugalkraft und die Corioliskraft.

Daniel: Die erstere ist mir ein Begriff, aber bezüglich Corioliskraft habe ich nur recht unklare Vorstellungen.

Jan: Jetzt nur so viel: Es ist eine Kraft, die an einem Körper angreift, wenn er sich im beschleunigten Bezugssystem bewegt. Doch nun wollen wir für die folgenden Betrachtungen ein paar grundlegende Dinge verabreden:

1. Der Schwerpunkt des Raumschiffes bewege sich auf einer Kreisbahn mit dem Radius r
2. Das Raumschiff habe keine Rotation, d. h. es bleibe immer zu sich selbst parallel.

Wenn Punkt 2) zutrifft, dann beschreibt jeder beliebige Punkt des Körpers eine Kreisbahn vom Radius r *(siehe Bild 1)* und alle Masseelemente gleicher Masse erfahren dieselbe Zentrifugalkraft nach Betrag und Richtung, gleichgültig wo sie sich im Körper befinden.

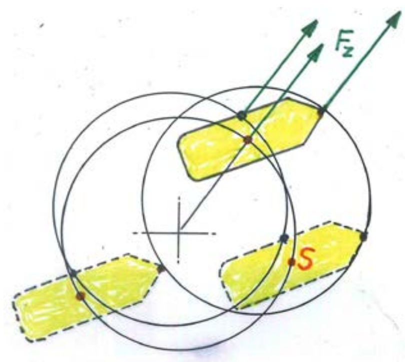

Abbildung 1: Wird der Schwerpunkt S eines ausgedehnten Körpers auf einem Kreis herumgeführt, während der Körper zu sich selbst parallel bleibt, beschreiben alle seine Punkte deckungsgleiche Kreise.

Daniel: Das überrascht mich, aber ich sehe es ein.

Jan: In der nächsten Zeichnung *(siehe Bild 2)* sind die Kräfte dargestellt, die an gleichgroßen Masseelementen des ausgedehnten Körpers angreifen. Was siehst du?

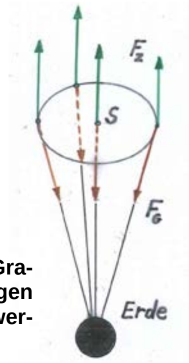

Abbildung 2: Zentrifugalkraft F_Z und Gravitationskraft F_G können sich wegen Richtungsabweichung nur im Schwerpunkt S exakt aufheben.

Daniel: Ich sehe die nach oben zeigenden Zentrifugalkräfte F_Z, die alle gleich groß und untereinander parallel sind. Die nach unten zeigenden Gravitations-kräfte F_G sind wohl vom gleichen Betrage, aber nicht mehr parallel, denn sie zeigen zum Mittelpunkt der Erde. Nur im Schwerpunkt S können sich die Gravitationskraft und die Zentrifugalkraft genau aufheben.

Jan: Sag das deinem Freund Robin! Schwerelosigkeit gibt es streng genommen nur im Schwerpunkt des Raumschiffes oder der Raumstation. - In der nächsten Darstellung *(Bild 3)* wird die Ebene gezeigt, die den Schwerpunkt S des Raumschiffes, den Erdmittelpunkt (nicht eingezeichnet) und eine Masse *m* enthält, die einen seitlichen Abstand *e* von S hat.

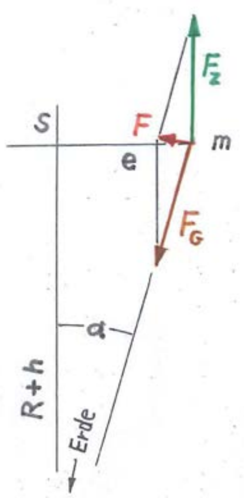

Abbildung 3: Eine Masse *m*, die in derselben Horizontalebene wie der Schwer-punkt S liegt, erfährt eine rücktreibende Kraft *F*, die mit dem Abstand *e* zwischen *m* und S anwächst (und zwar direkt proportional, sofern *e* nicht zu groß ist).

Daniel: Das könnte der außerhalb des Raumschiffes befindliche Astronaut sein, nicht wahr?

Jan: Ja! Aber sage mir lieber etwas darüber, was sich aus der Nichtparallelität von F_Z und F_G ergibt!

Daniel: Das Lot von S aus und das Lot von *m* aus schließen den sehr kleinen Winkel α ein. Diesen Winkel finde ich wieder im eingezeichneten Kräfteparallelogramm. Die Resultierende beider Kräfte ist *F*. Es gilt $\frac{F}{F_G} = \tan\alpha$ und andererseits: $\tan\alpha = \frac{e}{R+h}$, wenn *R* der Erdradius und *h* die Höhe des Raumschiffs über der Erdoberfläche ist. Aus beiden Gleichungen ergibt sich:

$F = \frac{F_G}{R+h} \cdot e$. Dabei habe ich angenommen, dass man wegen *e* << (*R* + *h*) davon absehen kann, dass die Gravitation bei *m* geringfügig kleiner ist als bei S.

Jan: Sehr gut! Aus demselben Grund darf man so tun, als ob die Resultierende *F* genau auf den Schwerpunkt S zeigt. Wir können dann davon sprechen, dass es eine rücktreibende Kraft gibt, die der Auslenkung *e* proportional ist. Kommt dir das bekannt vor? Wo kam im Physikunterricht schon einmal ein solches Kraftgesetz vor?

Daniel: Ich weiß nicht.

Jan: Ich helfe dir: Pendel! Harmonische Schwingung!

Daniel: Ach ja! So etwas gab es beim mathematischen Pendel, wenn die Ausschläge klein sind.

Jan: Richtig! Vielleicht erinnerst du dich auch noch an die Formel für die Schwingungsdauer *T*. Sie lautet in etwas allgemeinerer Schreibweise:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D}},$$

wobei D, die sogenannte Direktionskraft, in unserem Falle nichts anderes als Kraft F pro Auslenkung *e* ist. Damit ergibt sich nach kurzer Rechnung

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{(R+h)^3}{\Gamma M}},$$

wenn wir gleichzeitig noch F_G mit dem Gesetz der Massenanziehung ausdrücken, also durch:

$$F_G = \frac{\Gamma M m}{(R+h)^2}.$$

Darin ist M die Masse der Erde und Γ die Gravitationskonstante.

Daniel: Wenn ich richtig verstehe, würde der Astronaut, wenn er sich von der Außenhaut des Raumschiffes kräftig abstieße, weit in den Raum hinaus schweben, immer langsamer werden und dann auf demselben Wege wieder zurückkommen. Er würde sogar eine richtige Pendelbewegung ausführen, wenn das Raumschiff nicht im Wege wäre. Ist das so?

Jan: Genau so! Um das noch durch ein Modellbild mit einer rollenden Kugel zu veranschaulichen: Der schwerelose Zustand im System des Raumschiffes ist nicht vergleichbar mit einer großen Ebene, auf der eine Kugel gleichförmig dahin rollen kann, sondern mit einer kreisrunden Schüssel, deren tiefster Punkt im Schwerpunkt S liegt.

Daniel: „Kreisrunde Schüssel" deswegen, weil es gar nicht darauf ankommt, in welcher Richtung wir die Masse m auslenken, solange sie nur in der Horizontalebene bleibt, nicht wahr?

Jan: Richtig erkannt!

Daniel: Demnach kann der Astronaut gar nicht verloren gehen?

Jan: Ja! Allerdings nur bei dieser Abstoßrichtung, die ganz genau einen rechten Winkel mit dem Lot (d. h. mit der Verbindungsgeraden von S zum Mittelpunkt der Erdkugel) bilden muss. – Aber nun machen wir etwas ganz anders! Wir wollen einmal die Umlaufsdauer T_U des Raumschiffes auf seiner Kreisbahn in der Höhe *h* berechnen!

Daniel: Die bekomme ich ganz einfach, wenn ich den Kreisumfang $2\pi r = 2\pi(R+h)$ durch die Kreisbahngeschwindigkeit v des Raumschiffes dividiere. Die Formel für v habe ich aber nicht im Kopf.

Jan: Sie lautet: $v = \sqrt{\frac{\Gamma M}{r}}$.

Daniel: Damit bekomme ich $T_U = 2\pi r\sqrt{\frac{r}{\Gamma M}}$ oder $T_U = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{\Gamma M}}$.

Da $r = R + h$ ist, stimmt dieses Ergebnis haargenau mit der vorhin abgeleiteten Formel für die Schwingungsdauer des Astronauten überein.

Jan: Was bedeutet das?

Daniel: Ganz einfach! Eine halbe Schwingung hat der Astronaut genau dann vollbracht, wenn das Raumschiff den halben Umfang der Kreisbahn zurückgelegt hat.

Jan: Das kann man auch noch anders ausdrücken: Raumschiff und Astronaut bewegen sich „parallel" auf zwei gleichgroßen, aber zueinander gekippten Kreisbahnen *(Bild 4)*. Der Kippwinkel γ ist dabei umso größer, je kräftiger sich der Astronaut vom Raumschiff abstößt.

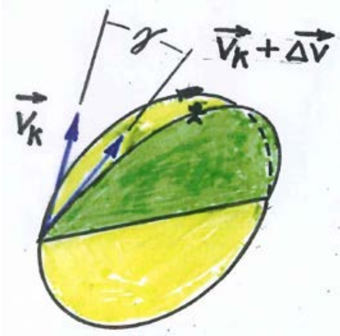

Abbildung 4: Stößt sich der Raumfahrer genau in Richtung der Querachse vom Raumschiff ab, bewegen sich beide auf zwei gegeneinander gekippten Kreisbahnen gleicher Größe (Kippwinkel γ).

Daniel: Die Zeitdauer bis zur Rückkehr zum Raumschiff bleibt dieselbe, nur sein Maximalabstand vom Schiff wächst mit der Abstoßkraft.

Jan: Das Ergebnis hätten wir viel einfacher haben können, wenn wir das Ganze vom Inertialsystem aus betrachtet hätten. Bei dem bisher besprochenen Abstoß vom Raumschiff (quer zur Flugrichtung und horizontal) wird die Geschwindigkeit des Astronauten nur in der Richtung verändert. (Eine gegenläufige Änderung der Raumschiffgeschwindigkeit ist auf Grund des Massenverhältnisses in der Praxis rund 100-mal kleiner und kann außer Betracht bleiben). Die Gesamtenergie des Astronauten ist daher nach dem Absprung genau so groß wie vorher. Seine Kreisbahn bleibt in ihrer Größe erhalten und wird nur um einen kleinen Winkel γ gekippt.

Daniel: Ich muss sagen, die Beschreibung vom beschleunigten Bezugssystem aus fand ich besser.

Jan: Nicht so voreilig mit deinem Urteil! Du musst bedenken, dass uns noch die Betrachtung zweier weiterer Spezialfälle bevorsteht, nämlich Absprung genau in Flugrichtung und Absprung in Richtung der Hochachse. Dafür müssen wir uns die Corioliskraft näher ansehen.
Sie wird definiert durch $\vec{F} = 2m(\vec{v} \times \vec{\omega})$ und ihr Betrag durch: $F = 2mv\omega \cdot \sin\theta$. Der Vektor $\vec{v}$ beschreibt die Geschwindigkeit der Masse m relativ zum beschleunigten Bezugssystem. Der Winkelgeschwindigkeitsvektor $\vec{\omega}$ liegt in der Drehachse, sein Betrag gibt die Winkelgeschwindigkeit ω an und sein Richtungssinn wird durch die Schraubenregel gegeben *(Bild 5)*.

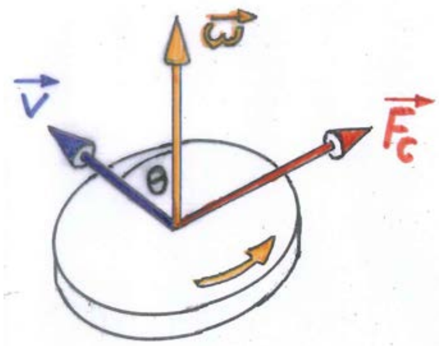

Abbildung 5: Zur Definition der Corioliskraft.

Daniel: Die Größe θ ist der Winkel zwischen Geschwindigkeitsvektor $\vec{v}$ und Winkelgeschwindigkeitsvektor $\vec{\omega}$, nicht wahr?

Jan: Richtig! Aber kannst du mir vielleicht sagen, warum bei unseren bisherigen Überlegungen von der Corioliskraft keine Rede war?

Daniel: Nach dem eben Gesagten ganz einfach zu beantworten: Die Absprungrichtung war genau parallel zum Winkelgeschwindigkeitsvektor, θ also gleich Null. Folglich war der Betrag der Corioliskraft gleich Null.

Jan: Genau! In allen anderen Fällen ergibt sich die Bahn des abgesprungenen Astronauten durch das Zusammenwirken der Resultierenden aus Gravitations- und Zentrifugalkraft und der Corioliskraft, und das ist nicht mehr ohne weiteres überschaubar.

Daniel: Das sehe ich ein.

Jan: Es kommt noch etwas hinzu: Die Resultierende aus Gravitations- und Zentralkraft war in dem bisher betrachteten Fall stets zum Schwerpunkt hingerichtet. Sie war eine rücktreibende Kraft, im Modell versinnbildlicht durch eine Schüssel. Überlege doch bitte mal, wie das auf der Hochachse des Raumschiffes ist, also auf der durch Erdmittelpunkt und Raumschiffschwerpunkt definierten Geraden!

Daniel: Während die Zentrifugalkräfte überall gleich sind, nimmt die Gravitationskraft mit zunehmender Höhe ab. Das hat zur Folge, dass die Resultierende keine rücktreibende Kraft mehr ist! Sie weist vom Schwerpunkt aus weg. Das würde bedeuten, dass ein Körper zum Erdmittelpunkt hin beschleunigt wird oder aber in entgegengesetzter Richtung hinaus in das Weltall. Oh, ich glaube jetzt, dass Robin doch Recht hat! Oder könnte vielleicht die Massenanziehung zwischen Astronauten und Raumschiff helfen?

Jan: Unmöglich! Die Massenanziehung ist viel kleiner als die vorhin beschriebene rücktreibende Kraft F. Selbst, wenn der Astronaut nur 3 m vom Schwerpunkt seines Raumschiffes von 7000 kg Masse entfernt ist, macht die Massenanziehung nur 1,3 % von F aus (in 400 km Höhe).

Daniel: Dabei nimmt die Massenanziehung auch noch mit dem Quadrat der Entfernung e ab, während F linear zunimmt. Ich sehe kein Land!

Jan: Du vergisst die Corioliskraft! Da $\vec{\omega}$ und $\vec{v}$ einen rechten Winkel einschließen, kommt sie voll zu Wirkung, und zwar umso stärker, je schneller der Körper wird. Dadurch wird der Körper auf eine gekrümmte Bahn gezwungen, die in der Bahnebene des Raumschiffes liegt.

Daniel: Aha! - Ich fand es gut, wie du vorhin die wirkenden Kräfte mit der Kugel in der runden Schüssel veranschaulicht hast. Wie muss ich mir das nun vorstellen, wenn wegtreibende Kräfte im Spiel sind?

Jan: Die Schüssel versinnbildlichte die Kräfte in der Horizontalebene, die alle zum Schwerpunkt S gerichtet sind. Nun geht es jedoch um eine Ebene E, welche auf der Horizontalebene senkrecht steht und die Gerade enthält, auf der Erdmittelpunkt und Raumschiffschwerpunkt S liegen *(Bild 6)*. Hier finden wir Kräfte, die vom Schwerpunkt S wegzeigen (in der Nähe der besagten Geraden) und solche, die zu ihm hinzeigen (in der Nähe der Horizontalebene). Diese Verhältnisse können wir in unserem Modell durch eine Sattelfläche darstellen *(Bild 7)*.

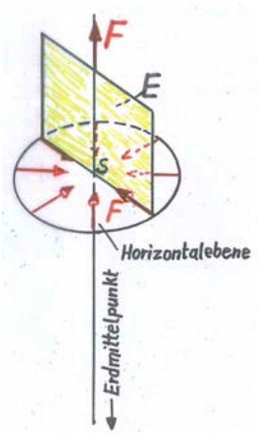

Abbildung 6: In der zur Horizontalebene senkrechten Ebene E, welche die Verbindungsgerade zwischen Erdmittelpunkt und Raumschiffschwerpunkt S enthält, gibt es sowohl anziehende als auch wegstoßende Kräfte *F*.

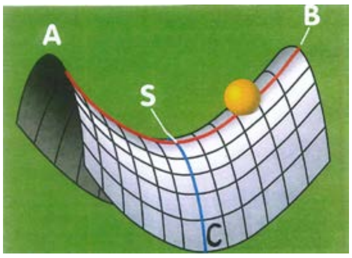

Abbildung 7: Das Kraftfeld in der Ebene E des vorhergehenden Bildes kann im Modell durch eine Sattelfläche veranschaulicht werden.

Daniel: Das sieht aber interessant aus! Am auffälligsten ist, dass es im Gegensatz zur Schüssel keine Gleichgewichtslage für die Kugel gibt.

Jan: Doch, doch! Im Schwerpunkt S ist sie im Gleichgewicht - allerdings nur im labilen Gleichgewicht.

Daniel: Meinetwegen! Ich meine doch nur, dass sie sich bei der kleinsten Störung unvermeidlich in Richtung des stärksten Gefälles in Bewegung setzen und auf Nimmerwiedersehen davon rollen wird (etwa auf der blauen Linie von S nach C).

Jan: Einverstanden. Aber es gibt auch die Möglichkeit, die Kugel schwingen zu lassen. Dazu müssten wir sie genau auf der Kammlinie (etwa zwischen den Punkten
A und B auf der roten Linie) rollen lassen.

Daniel: Das ist aber eine höchst kipplige Angelegenheit!

Jan: Ja. Ich gebe ja zu, dass unsere Betrachtungen in diesem Punkt recht akademischen Charakter haben. Die Schwingung kommt nur zustande, wenn die Richtung der Auslenkung superpräzise eingehalten wird. Selbst wenn dem so wäre, würden schon die kleinsten Störungen zu einem schnellen Ende der Gratwanderung führen.

Daniel: Ich gewinne mehr und mehr den Eindruck, dass unser Vorgehen kaum noch handgreifliche Erkenntnisse liefert.

Jan: Deswegen ist es höchste Zeit, dass wir zum unbeschleunigten Bezugssystem übergehen. Der zuletzt anvisierte Fall (Absprung in der Hochachse) stellt sich in diesem System wie folgt dar: Der Astronaut hat anfangs dieselbe Geschwindigkeit wie das Raumschiff, nämlich die Kreisbahngeschwindigkeit v_K nach Betrag und Richtung. Durch den Absprung entsteht ein kleiner Geschwindigkeitsvektor $\Delta\vec{v}$, der zum Vektor $\vec{v}_K$ im rechten Winkel hinzugefügt werden muss. Da $\Delta v << v_K$, hat der resultierende Geschwindigkeitsvektor praktisch denselben Betrag, aber eine um den kleinen Winkel δ veränderte Richtung.

Daniel: Die kinetische Energie des Astronauten wird also nicht verändert, somit auch nicht seine Gesamtenergie. Das bedeutet, dass die Bahnellipse, auf die sich der Astronaut begibt, eine große Achse hat, die dem Durchmesser der anfänglichen Kreisbahn entspricht.

Jan: Sehr gut! Das können wir uns in dieser Zeichnung *(Bild 8)* näher ansehen.

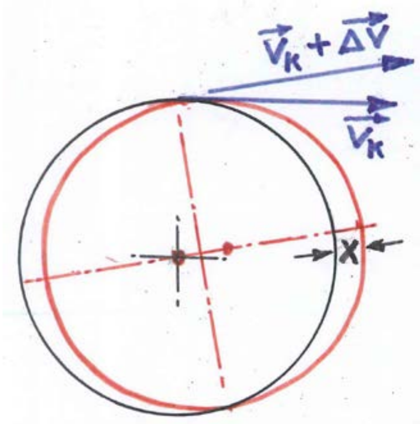

Abbildung 8: Stößt sich der Raumfahrer in Richtung der Hochachse vom Raumschiff ab, beschreibt er eine Ellipsenbahn (rot) mit gleicher Umlaufzeit (große Halbachse gleich Kreisbahnradius).

Daniel: Ich muss aber sagen, dass ich nicht weiß, wie ich die Ellipse in der richtigen Lage und in der richtigen Form konstruieren könnte.

Jan: Dazu findest du etwas in der Zeitschrift „Raumfahrt Concret“; Heft 78, S. 34 - 35. Doch weiter! Aus den beiden ähnlichen Dreiecken folgt: $\dfrac{\Delta v}{v_K} = \dfrac{x}{R+h}$,

wobei x der größte Abstand der elliptischen Bahn von der Kreisbahn ist.

Daniel: Kleinen Moment bitte! – Ich berechne schnell mal, wie groß x werden kann, wenn sich der Astronaut in 400 km Höhe, wo v_K etwa 7600 m/s beträgt, mit 3 m/s auf der Hochachse nach oben abstößt. – Ich bekomme 2,7 km für den größten Abstand beider Bahnen. Obwohl in der jetzt betrachteten Richtung die vorhin diskutierte rücktreibende Kraft F überhaupt nicht existiert, besteht für den Raumfahrer absolut keine Gefahr, in die Unendlichkeit hinaus zu verschwinden. Im Gegenteil, er trifft nach einem halben Umlauf ganz von allein wieder auf das Raumschiff.

Jan: Stopp! Nach einem halben Umlauf kreuzt er die Kreisbahn des Raumschiffes. Er ist aber zu spät da, weil er die erdferne Hälfte seiner Ellipsenbahn langsamer durchläuft als die erdnahe. Erst nach einem ganzen Umlauf trifft er wieder auf das Raumschiff.

Daniel: Stimmt! Interessant ist es auch, auf das andere Bezugssystem umzuschalten: Der an Bord des Raumschiffes zurückgebliebene Kommandant hat den Eindruck, das sich sein Kollege zuerst genau auf der Hochachse nach oben von ihm entfernt und sich dann immer mehr entgegen der Flugrichtung nach hinten schiebt. Nach der halben Umlaufszeit befindet er sich nach unten absteigend genau „hinter dem Heck“, um danach wieder aufzuholen, bis die Annäherung zum Schluss wieder genau in der Hochachse – aber diesmal von unten - erfolgt.

Jan: Nun gut! Wir müssen noch den dritten Spezialfall - Absprung genau in oder genau entgegen der Fahrtrichtung - diskutieren. Dadurch wird nur der Betrag der Geschwindigkeit erhöht bzw. erniedrigt, was bedeutet, dass sich der Astronaut von der Kreisbahn auf eine außerhalb des Kreises (bzw. innerhalb des Kreises) liegende Ellipse begibt *(Bild 9).* Um eine möglichst konkrete Vorstellung zu bekommen, wollen wir annehmen, dass der Absprung in Flugrichtung, und zwar mit $\Delta v = 3\,\mathrm{m/s}$ erfolgt, so wie du es vorhin angenommen hattest. Mit den Formeln der Bahnmechanik lässt sich leicht berechnen, wie weit sich die Bahn des Astronauten maximal von der Kreisbahn des Raumschiffes entfernt. Augenblick bitte - hier steht es in meinen Notizen: Es sind etwa 11 km.

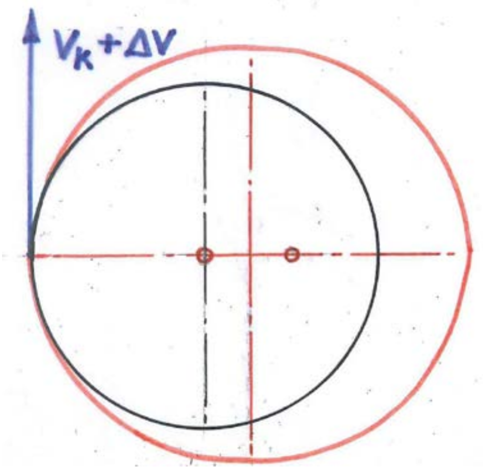

Abbildung 9: Nach einem Absprung in Flugrichtung nach vorn beschreibt der Raumfahrer eine Bahnellipse, deren große Achse den Durchmesser der Kreisbahn übertrifft. Der Raumfahrer benötigt daher mehr Zeit für einen Umlauf.

Daniel: Das ist rund 4-mal mehr als in dem vorhin berechneten Beispiel – aber keineswegs furchteinflößend. Der Astronaut müsste bei günstiger Beleuchtung für den Raumschiffkommandanten sogar noch sichtbar sein.

Jan: Du vergisst, dass die Geschwindigkeit des Astronauten bei seinem Aufstieg zum Apogäum abnimmt. Er erreicht die Stelle, wo beide Bahnen ihren Maximalabstand haben, etwa 7 s später als das Raumschiff. In dieser Zeitspanne hat es sich auf seiner Bahn um mehr als 50 km nach vorn geschoben.

Daniel: Oh weh! Das wäre das Ende; denn von Runde zu Runde kommen ja mehr als 100 km Vorsprung dazu.

Jan: Du siehst, dass die Gefahr für den Raumfahrer nicht darin besteht, dass er – wie Robin sich das vorstellt – immer weiter in ungeheure Entfernungen abdriftet, sondern darin, dass er trotz ziemlich benachbarter Bahnen nicht mehr zur richtigen Zeit am richtigen Ort sein kann. Die 3 Spezialfälle, die wir diskutiert haben, geben einen Rahmen vor, in dem sich bei einem Absprung in beliebiger Richtung das Schicksal des Astronauten abspielen wird.