

Gymnasium [REDACTED]

Q1, zweites Halbjahr 2021

Facharbeit Physik



Künstliche Gravitation im Weltall

Studie über die mögliche Umsetzung einer technischen Lösung zur
Erzeugung von künstlicher Gravitation durch Rotation

FACHARBEIT

Zur Vorbereitung auf das wissenschaftliche Arbeiten an Universitäten

Vorgelegt von:

Linus B. Hoffmann

[REDACTED]

[REDACTED]

linushoffmann@aol.com

Lehrer:

[REDACTED]

Ort, Datum:

Overath den 26.03.2021

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung (Begründung der Themenwahl).....	1
2. Konzepte und aktueller Stand der Technik bei Raumstationen.....	3
3. Anforderungen an zukünftige Raumstationen und interplanetare Raumschiffe.....	4
3.1 Raumstationen.....	4
3.2 Interplanetares Raumschiff.....	5
4. Physikalische Grundlagen für Raumstation mit künstlicher Schwerkraft.....	5
4.1 Geometrischer Aufbau.....	6
4.2 Betrachtungen zu Kräften in rotierenden Bezugssystemen.....	7
4.2.1 Zentrifugalkraft.....	8
4.2.2 Corioliskraft.....	9
4.2.3 Eulerkraft.....	14
4.3 Berechnungen zur Raumstation ($R=170[m]$) im Vergleich zur Erde.....	15
5. Quellenverzeichnis (Literatur u. Bilder).....	18
6. Abkürzungsverzeichnis.....	19

1. Einleitung (Begründung der Themenwahl)

Im Folgenden soll dargestellt werden, wie der Gedanke zur Themenauswahl der „*künstlichen Erzeugung von Schwerkraft durch Rotation*“ entwickelt wurde.

Beim Tag der Offenen Tür des DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt) in Köln, ergab sich die Möglichkeit, die ISS (International Space Station) Trainingsmodule von Innen und Außen anzuschauen. Eine weitere sehr interessante Station waren die aktuellen Forschungsarbeiten im DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin.

Dort wird in einer Kurzarm-Humanzentrifuge (im DLR Labor *envihab* → „*environment*“ = Umwelt und „*habitat*“ = Lebensraum) der Einfluss von künstlicher Schwerkraft auf das Schlafverhalten und somit die Gesundheit von Astronauten im Rahmen einer internationalen Studie untersucht. Diese Studie AGBRESA (**A**rtificial **G**ravity **B**ed **R**est **S**tudy **A**nalysis) [*I-Net1*] untersucht Effekte, die durch den Wegfall der Schwerkraft im All zu einer Reihe von physiologischen Veränderungen wie dem Abbau von Muskeln und Knochen sowie der Verschiebung der Körperflüssigkeiten in Richtung Kopf der Astronauten führen und wodurch das Herz-Kreislauf-System beeinträchtigt wird sowie Veränderungen im Auge stattfinden können.

Offensichtlich gibt es durch die Schwerelosigkeit im All auch Nachteile, welche sich bei Langzeitaufenthalten auf die physische- und psychische Konstitution der Astronauten auswirken können. Einige dieser Nachteile – wie z.B. auftretender Muskelschwund und Kalziumabbau im Skelett - versucht man durch regelmäßigen Sport (täglich ca. 2.5 Stunden) entgegenzuwirken. Daher liegt es nahe, dass für längere Aufenthalte im Weltraum durch die Simulation erdähnlicher Umgebungsbedingungen mittels künstlicher Schwerkraft der dortige Aufenthalt erheblich erleichtert werden kann.

Voruntersuchungen dazu werden in AGBRESA durchgeführt. Diese erste gemeinsame Langzeit-Bettruhestudie findet in Kooperation mit der DLR, ESA (European Space Agency), der NASA (National Aeronautics and Space Administration) und des BMWi (Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie) statt. Erstmals wird dabei der Einsatz von künstlicher Schwerkraft als mögliche Maßnahme gegen die negativen Effekte der Schwerelosigkeit auf den menschlichen Organismus untersucht.

Die Gravitation wird nach dem newtonschen Gravitationsgesetz durch zwei vorhandene Massen und deren Wechselwirkung untereinander beschrieben. Es wirkt folglich zwischen den Massen m_1 und m_2 eine anziehende Kraft, die zu m_1 und m_2 direkt und zum Quadrat ihres Abstandes r indirekt proportional (proportional zum Kehrwert) ist:

$$F_G = - \gamma \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad Gl.1$$

$$\gamma = 6,673 \cdot 10^{-11} \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \right], \text{ Gravitationskonstante}$$

Der Richtungsvektor von $\vec{F}$ ist antiparallel zum Abstand $\vec{r}$ und das Kraftfeld ist radial verlaufend (Abb.6). Die Gravitationskraft F_G auf einen Probekörper der Masse m_p (m_2 , z.B. Mensch) unter Einfluss der Masse M_E (m_1 , z.B. Erde) berechnet sich aus:

$$F_G = -\gamma \frac{M_E}{r_E^2} \cdot m_p \quad \text{Gl.2}$$

Erdmasse $M_E = 5,9723 \cdot 10^{24} \text{ [kg]}$

Entfernung der Körper $r_E = 6371 \cdot 10^3 \text{ [m]}$, (hier der Erdradius)

Mit dem zweiten newtonschen Axiom (dem Aktionsprinzip):

„Wirkt auf einen Körper eine Kraft, so wird er in Richtung der Kraft beschleunigt. Die Beschleunigung ist dabei direkt proportional zur Kraft und indirekt proportional zur Masse des Körpers.“

und somit gilt die Anwendung der Grundgleichung der Mechanik:

$$F = m_p \cdot a \quad \text{Gl.3}$$

und es ergibt sich die Gravitationsbeschleunigung g auf der Erdoberfläche, die ein Probekörper der Masse m_p dort ständig erfährt:

$$m_p \cdot g = -\gamma \frac{M_E}{r_E^2} \cdot m_p \rightarrow g = 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \quad \text{Gl.4}$$

Laut Albert Einstein ist ein Gravitationsfeld gleichzusetzen mit einem konstant beschleunigten Bezugssystem (Äquivalenzprinzip der ART (Allgemeine Relativitätstheorie)) [I-Net2]. Es ist daher denkbar, mit Hilfe eines rotierenden, konstant beschleunigten Bezugssystems, auch künstliche Schwerkraft zu erzeugen. Ein solches System könnte hilfreich sein bei Raumstationen oder sogar bei Raumschiffen für interplanetare Reisen (z.B. Marsmission).

Die in Gl.4 bestimmte Schwerebeschleunigung g des Erdgravitationsfeldes muss also in dem geplanten rotierenden Bezugssystem „Raumstation“ (im weiteren auch „Habitat“ genannt), durch den Wert der Zentrifugalbeschleunigung a_z erzeugt werden:

$$F_Z = m_A \cdot a_z = m_A \cdot \omega_H^2 \cdot r_H \quad \text{Gl.5}$$

F_Z = Zentrifugalkraft,

m_A = Masse des Astronauten,

ω_H = Winkelgeschwindigkeit des Habitats,

r_H = Radius des Habitats (äußerer Wohnbereich der Raumstation).

Die physikalischen Besonderheiten eines solchen rotierenden Bezugssystems werden in den folgenden Kapiteln näher untersucht.

2. Konzepte und aktueller Stand der Technik bei Raumstationen

Erste schon sehr durchdachte und visionäre Konzepte einer bemannten Raumstation wurden bereits vom österreichisch-kroatischen Weltraumforscher Herman Potočnik (alias Herman Noordung, 1892-1929) bekannt. Er schlug bereits in seinem Buch „Das Problem der Befahrung des Weltraums – Der Raketenmotor“ eine radförmige, rotierende Weltraumstation als Lösung vor. Dieses Buch erschien im Jahr 1929 und seine Ideen wurden in den 50iger Jahren von Wernher von Braun wieder aufgegriffen, der diese in seine Studie einfließen ließ. Beide Konstruktionen haben die Form eines Rades mit einer zentralen Achse. Daraus kann man schließen, dass durch Rotation um diese Achse und somit im äußeren Bereich, durch Zentrifugalkräfte eine künstliche Schwerkraft erzeugt werden soll.

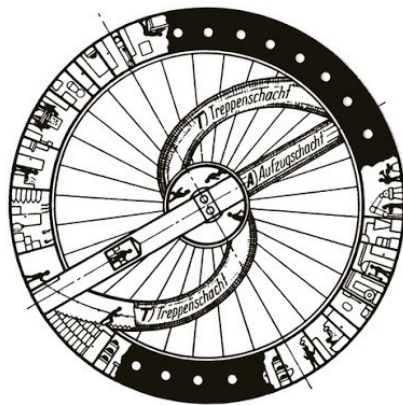


Abbildung 1: Das Wohnrad 1929, Herman Potočnik [I-Net3]



Abbildung 2: Von Brauns Raumstation 1952 [I-Net4]

Potočnik hat ein Wohnrad mit Speichen verspannt (Abb.1), sowie zwei zusätzliche Aufgänge verschiedener Form (radialer- und spiralförmiger Aufgang), ausgehend vom Zentrum bis zum äußeren Ring, vorgeschlagen. Das Modell von Brauns (Abb.2) sieht nur einen geraden, radialen Aufgang vor. Beim Betrachten der in einem rotierenden Bezugssystem auftretenden Scheinkräfte (hier insbesondere die Corioliskraft) ergeben spiralförmige Speichen für einen Übergang vom Rotationszentrum in den äußeren Ringbereich einer Raumstation durchaus Sinn. Dieses wird näher in Kapitel 4.2.2 erklärt.

Der aktuelle Stand der Technik bei Raum- bzw. Orbitalstationen ist zurzeit durch die ISS gegeben. Die ISS besteht aus modular zusammengesetzten Forschungsmodulen verschiedener Nationen. Die gesamte Raumstation ist in allen Bereichen schwerelos (Mikro-gravitation). Die Stromversorgung findet statt durch Solarenergie. Die Raumstation (Spannweite 109 m, Abb.3) würde von ihrer Größe her ein Fußballfeld ausfüllen.



Abbildung 3: Die Internationale Raumstation (ISS) [I-Net5]

3. Anforderungen an zukünftige Raumstationen und interplanetare Raumschiffe

Da sich der Mensch im Weltraum unter Schwerelosigkeit nicht in seinem natürlichen Lebensraum befindet, müssen insbesondere für Langzeitaufenthalte im Weltall bestimmte Vorkehrungen getroffen werden, um die körperliche Fitness und Gesundheit der Astronauten zu erhalten. Dabei ist die nicht vorhandene Schwerkraft ein großes Problem. Speziell der Langzeiteinfluss der wegfallenden Schwerkraft auf Körperflüssigkeiten im Gehirn oder des Gleichgewichtsorganes sind dabei im engeren Untersuchungsbereich der Forscher.

Weitere Probleme treten bei größerer Entfernung zur Erde und damit außerhalb des schützenden Erdmagnetfeldes auf. Die „harte“ Teilchenstrahlung der Sonne (hochenergetische Protonen durch Sonneneruption), schädigt nachgewiesenerweise Gewebe und Zell-DNA. Um dies zu verhindern muss versucht werden, die Lebensbedingungen im Weltall möglichst erdähnlich zu gestalten. D.h., dass man evtl. auch versuchen muss, künstliche Magnetfelder zum Schutz gegen die harte Strahlung der Sonne, sowie künstliche Schwerkraft für erdähnlichere Lebensbedingungen zu erzeugen.

Beide Technischen Lösungen sind für Raumstationen und Raumschiffe gleich anwendbar. Raumstationen im „low Orbit“ (ISS bei ca. 400 km über der Erde) sind teilweise noch durch das Erdmagnetfeld vor der harten Teilchenstrahlung geschützt. Begibt man sich auf interplanetare Reisen (innerhalb des Sonnensystems zwischen den Planeten) wie z.B. zum Mars (kürzest mögliche Reisezeit bei günstigster Konstellation auf den Umlaufbahnen von Erde und Mars ca. 9 Monate - allerdings nur alle 2 Jahre), so muss auch über Schutzräume und künstliche Magnetfelder zur Abwehr der hochenergetischen Teilchenstrahlung durch die Sonne, nachgedacht werden.

3.1 Raumstationen

Eine Raumstation sollte wie bereits angedeutet ein Habitat (Wohnunterkunft) mit erdähnlichen Bedingungen darstellen. Das beinhaltet ebenfalls Schutzräume mit passiven oder aktiven Mechanismen zur Abwehr harter Teilchenstrahlung. Mit passiven Mechanismen sind dicke Wandungen zur Absorption der Teilchenenergie gemeint,

wogegen ein aktiver Schutz vor der Strahlung durch eine Kombination von elektrischen (positives elektrisches Feld zur Ablenkung der hochenergetischen Protonen) und magnetischen Feldern (Größe des Erdmagnetfeldes durch Simulation mit stromdurchflossenen Leitersystem) zur Anwendung kommen könnte.

Die Schwerkraft kann über Rotation durch die entstehende Zentrifugalkraft ersetzt werden (Äquivalenzprinzip der ART). Im Außenbereich der rotierenden Station wäre das sogenannte Habitat (Wohnbereich) unter künstlicher Schwerkraft (Zentrifugalkraft) und im Bereich der Rotationsachse wäre der schwerelose Bereich zur Durchführung von Forschungen unter Mikrogravitation sowie die Andockstation für Versorgungsschiffe. Mit speziellen Zusatzantrieben im Außenbereich könnte die Station in Rotation versetzt oder abgebremst werden und Antriebe im Axialbereich könnten für Kurskorrekturen im Orbit benutzt werden. Eine Raumstation könnte wie in Kapitel 3.2, *Abb.4* aussehen. Dieses Konzept wird in Kapitel 4.1 aufgegriffen und es werden Berechnungen dazu angestellt.

3.2 Interplanetares Raumschiff

Ein interplanetares Raumschiff könnte tatsächlich genauso aufgebaut sein wie die beschriebene Raumstation (*Abb.4*). Die Strukturen in den unteren Abbildungen sind zueinander maßstabsgerecht dargestellt. Der Axialbereich soll einen Durchmesser von 10 [m] aufweisen, um dort genügend Platz für die Labore in der Schwerelosigkeit zur Verfügung zu haben und das Andocken von Versorgungsraumschiffen zu ermöglichen.



Abbildung 4 Konzept für eine Raumstation und Größenvergleich mit dem Menschen [Quelle: Linus Hoffmann]

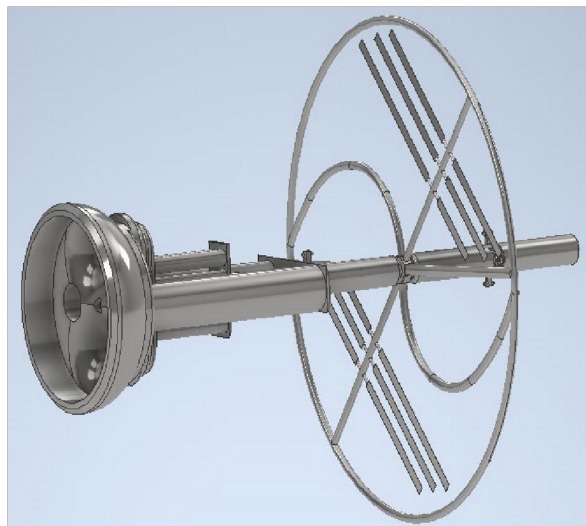


Abbildung 5 Konzept für ein interstellares Raumschiff [Quelle: Linus Hoffmann]

Für interplanetare Reisen könnte man den Hauptantrieb im Zentrum der rotierenden Station mit einer modular hinzuzufügenden Antriebs- und Tanksektion (*Abb.5*) versehen.

4. Physikalische Grundlagen für Raumstation mit künstlicher Schwerkraft

Wie bereits zu Beginn in der Einleitung angesprochen, ist aufgrund des Äquivalenzprinzips der ART in der Physik [I-Net2] zunächst festzustellen:

Es ist unmöglich zwischen den Effekten einer beschleunigten Bewegung und den Effekten des Gravitationsfeldes (Schwerebeschleunigung) zu unterscheiden. Schwere und träge Masse sind nicht unterscheidbar.

Es gilt:

„Gravitations- und Trägheitskräfte auf kleinen Abstands- und Zeitskalen sind in dem Sinn gleich, dass sie an ihren Wirkungen weder mit mechanischen noch irgendwelchen anderen Beobachtungen unterschieden werden können“. [I-Net2]

Die genannten „kleinen Abstands- und Zeitskalen“ beziehen sich auf ein homogenes (überall gleich groß) Gravitationsfeld. Natürlich ist bei Betrachtung großer Abstände das Gravitationsfeld der Erde ein radiales Feld und wird mit dem Abstand schwächer (geringere Feldliniendichte). In erster Näherung darf es allerdings bei kleinen Abständen (z.B. geometrische Ausdehnung der Orbitalstation ISS mit Spannweite von ca. 109 [m] in geringer Höhe von ca. 400 km [I-Net5]) als homogen angesehen werden. Man würde sich in der konstant hohen Umlaufbahn genau wie auf der Erdoberfläche im Gravitationsfeld auf einer Äquipotenziallinie befinden (Abb.6). Somit wäre das Äquivalenzprinzip (Abb.7) der ART hier anwendbar.

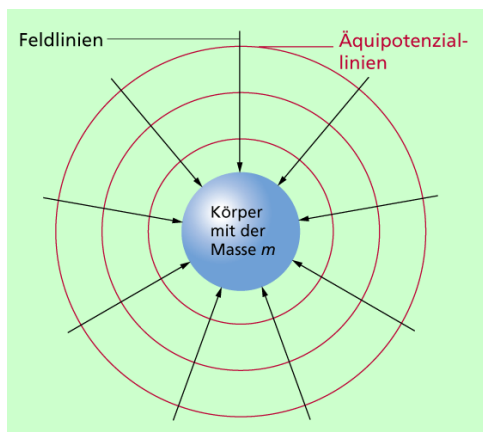


Abbildung 6: Äquipotenziallinien des Gravitationsfeldes [I-Net6]

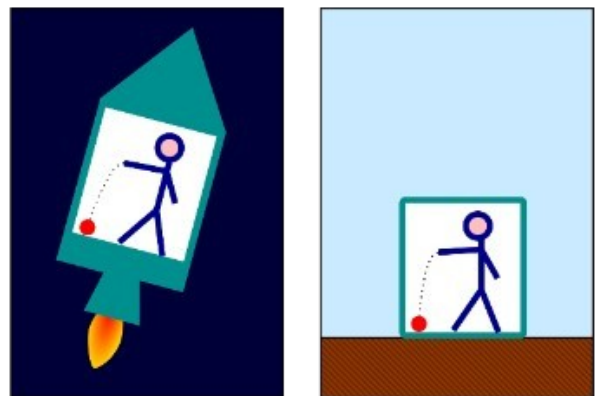


Abbildung 7: Äquivalenzprinzip der allgemeinen Relativitätstheorie [I-Net7]

Zu Veranschaulichung dieses Prinzips stelle man sich einen fensterlosen Raum vor, in dem man sich befindet. Bei gleicher Beschleunigung kann nicht bestimmt werden, ob dieser Raum sich im Schwerfeld eines Planeten (Abb.7, rechts) oder innerhalb einer beschleunigten Rakete (Abb.7, links) befindet.

4.1 Geometrischer Aufbau

Der Radius der Station wird mit $R=170$ m vorgeschlagen. Das entspricht einer etwas größeren Ausdehnung als die ISS und könnte als technisch realisierbar gelten. Die Röhrendurchmesser im äußeren Habitat (Kreisstruktur) und die verschiedenen Speichen-systeme (4 x geradlinig sowie 2 x spiralförmig, siehe Abb.4) sollen einen Durchmesser von jeweils ca. 5 m haben (genau wie die Labore der ISS [I-Net8]).

Größenbeispiele von der ISS:

Columbusmodul (Europäisches Forschungslabor) der ISS, Außendurchmesser: 4,477 m (Durchmesser inkl. Mikrometeoriten-Schutzschild von 13 cm Stärke aus mehreren Lagen Aluminium und [Kevlar](#) bzw. Nextel (keramisches Textilgewebe)). Der innere Durchmesser beträgt 4,215 m.

Die Form des spiralförmigen „Coriolisaufgangs“ entspricht mathematisch einer logarithmischen Spiralfunktion und sollte konstruktionstechnisch auf die durchschnittlich vor-liegende Fortbewegungsgeschwindigkeit der Bewohner des Habitats ausgeformt werden.

Die beiden direkt angrenzenden, geraden Speichen sollen Lastenaufzüge zum Transport von schweren Gegenständen aus dem schwerelosen Andockbereich ins unter Schwere befindliche Habitat, ermöglichen.

Zwei weitere Radialspeichen sollen zur Befestigung der Solarpanele mit gleichzeitigem Zugang für die Wartung, dienen.

Die Station stellt einen rotierenden Torus um eine in seinem Zentrum befindliche Achse dar. Diese Achse befindet sich im gravitationslosen Zustand und stellt gleichzeitig das Forschungslabor und die Andockstation für Versorgungsraumschiffe dar. Zur Umwandlung der Raumstation zu einem interplanetaren Raumschiff oder zum Transport in eine Mondumlaufbahn als „Lunar Gateway“ können an diese Achse Hauptantriebs- und Treibstofftankmodule angebracht werden.

Um die Station in Rotation zu versetzen oder abzubremesen, sollen Im äußeren Ringbereich Raketenmotoren symmetrisch, zwecks Tangentialbeschleunigung angebracht werden.

Für notwendige Bahnkorrekturen im Orbit – um Weltraumschrott auszuweichen - müssen Raketenantriebe in Axialrichtung an der Rotationsachse angebracht werden. Um gyroskopische Effekte (Kapitel 4.2.3) zu vermeiden, sollte lediglich eine radiale Verschiebung der Rotationsachse, in der Ebene der Umlaufbahn, durchgeführt werden.

4.2 Betrachtungen zu Kräften in rotierenden Bezugssystemen

Da man sich bei der künstlichen Erzeugung der Schwerkraft durch Rotation als Astronaut in einem rotierenden Bezugssystem befinden würde, sind die dort auftretenden Kräfte zu betrachten. Man würde sich also in einem beschleunigten Bezugssystem befinden.

Jede Rotation oder andere Beschleunigung des Bezugssystems führt dazu, dass kräftefreie Körper sich nicht immer geradlinig-gleichförmig bewegen. Dies wird durch das Einwirken von Trägheitskräften beschrieben, die nicht von anderen Körpern erzeugt werden, sondern für den betreffenden Beobachter nur durch die Beschleunigung seines Bezugssystems auftreten.

Bei diesen auftretenden Trägheitskräften kann es sich um beschleunigte Translationsbewegungen und/oder um eine beschleunigte oder unbeschleunigte Rotationsbewegung handeln. Im Wesentlichen sind dies drei Trägheitskräfte, die Zentrifugalkraft, die Corioliskraft sowie die Eulerkraft. Letztere ist auch als Kreiselkraft bekannt. In den nachfolgenden Kapiteln werden diese Kräfte kurz erklärt. Um die Betrachtungen etwas zu vereinfachen, soll bei einer rotierenden Raumstation mit fest orientierter und mit konstanter Winkelgeschwindigkeit ω drehender Rotationsachse ausgegangen werden. Dabei wirken nur noch zwei Trägheitskräfte auf den sich im rotierenden Bezugssystem befindlichen Beobachter (Astronaut). Diese Trägheitskräfte sind die radial nach Außen gerichtete Zentrifugalkraft und die senkrecht (quer zur Bewegungsrichtung) dazu auftretende Corioliskraft. Anschaulich wird dieses in Kapitel 4.2.2 mit Gl.15 und Abb.9 erklärt werden.

4.2.1 Zentrifugalkraft

Da es sich bei der gleichförmigen Kreisbewegung um eine beschleunigte Bewegung handelt, treten für einen in dem rotierenden System befindlichen Beobachter Trägheitskräfte auf, die die entgegengesetzte Richtung wie die Beschleunigung haben und somit radial nach Außen gerichtet sind. Es kann also festgehalten werden:

Wenn ein Bezugssystem eine gleichmäßige Kreisbewegung mit der Winkelgeschwindigkeit ω ausführt, so stellt ein mitrotierender Beobachter fest, dass auf seinen Körper der Masse m , der in diesem Bezugssystem ruht, eine Trägheitskraft mit dem Betrag

$$F_z = m \cdot r \cdot \omega^2 = \frac{m \cdot v^2}{r}, \quad \text{Gl. 6}$$

der Beschleunigung $a_z = r \cdot \omega^2 = \frac{v^2}{r} \quad \text{Gl. 7}$

und der Winkelgeschwindigkeit $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} \quad \text{Gl. 8}$

mit $m = \text{Masse des Beobachters (Astronaut)} [\text{kg}]$

$r = \text{Abstand vom Rotationsmittelpunkt } [\text{m}]$

$\omega = \text{Winkelgeschwindigkeit } [\frac{1}{s}]$

$v = \text{Geschwindigkeit auf der Kreisbahn } [\frac{m}{s}]$

$T = \text{Zeit für einen Umlauf [s]}$

wirkt. Diese Trägheitskraft ist radial nach Außen gerichtet und wird als Zentrifugal- oder Fliehkraft bezeichnet.

Um die auf der Erdoberfläche an einem bestimmten Breitengrad vorherrschende Zentrifugalbeschleunigung a_z zu berechnen, benötigt man zunächst die Koordinaten der nördlichen Breite (Gymnasiums Herkenrath) [I-Net9]

Breite:	50°59'16.39'' N	dezimal: 50.988°
Länge:	7°11'25.13'' O	dezimal: 7.190°

Bestimmend für die Zentrifugalkraft auf der Erde sind neben der Masse m des bewegten Körpers, die Winkelgeschwindigkeit ω_E der Erde, sowie die geografische Breite mit dem Winkel $\phi = 50.988^\circ$ und der Abstand r erforderlich. Zur Ermittlung der Zentrifugalbeschleunigung reichen nach Gl.2 nur ω_E und der Abstand r (R) der Drehachse vom gegenwärtigen Aufenthaltsort (Herkenrath).

Abbildung 6 soll veranschaulichen, wie man mittels geometrischer Betrachtungen zum Abstand R_H gelangt.

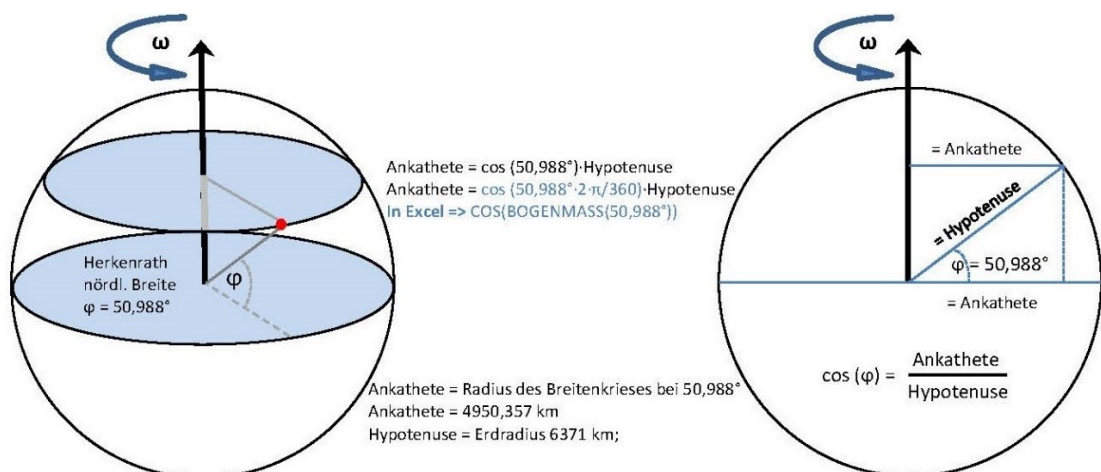


Abbildung 8: Abstand von der Drehachse auf der Koordinate nördlicher Breite des Gymnasiums Herkenrath entspricht $R_H = 4950,357 \text{ km}$ [Quelle: Linus Hoffmann].

$$a_z = r \cdot \omega^2 = 4950357 [m] \cdot \left(\frac{2\pi}{60 \cdot 60 \cdot 24} \right)^2 \left[\frac{1}{s^2} \right] = 0,0262 \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad \text{Gl.9}$$

Die Zentrifugalbeschleunigung wirkt der Schwerebeschleunigung der Erde entgegen. Eine Korrektur von g um den Wert a_z soll aber nicht gemacht werden, da diese nur einer Änderung in der zweiten Nachkommastelle entspräche. Auch evtl. Massenanomalien in der Erdkruste können in diesem Bereich liegen. Dafür liegen auch keine Daten zur Korrektur vor. Aus Gl.7 folgt auch die Umlaufgeschwindigkeit auf dem Breitenkreis des Gymnasiums Herkenrath:

$$a_z = \frac{v^2}{r} \rightarrow v = \sqrt{R_H \cdot a_z} = \sqrt{4950357[m] \cdot 0.0262 \left[\frac{m}{s^2}\right] \cdot 3,6} = 1296,5 \left[\frac{km}{h}\right] \quad \text{Gl.10}$$

4.2.2 Corioliskraft

Gaspard Gustave de Coriolis (französischer Mathematiker und Physiker, 1792-1843) fand heraus, dass im Unterschied zu den beiden bereits bekannten Scheinkräften die in rotierenden Bezugssystemen wirken, der [Zentrifugalkraft](#) und der [Eulerkraft](#) (Kreiselkraft), eine weitere Scheinkraft, die Corioliskraft wirkt. Diese Trägheitskraft wirkt nur auf Körper, die sich relativ zum rotierenden Bezugssystem (z. B. relativ zur Erdoberfläche oder zu einer rotierenden Raumstation) bewegen. Wenn ein Bezugssystem eine gleichmäßige Kreisbewegung mit der Winkelgeschwindigkeit ω ausführt, so stellt ein mitrotierender Beobachter also fest, dass auf seinen Körper der Masse m , wenn er sich relativ zu diesem Bezugssystem bewegt, eine Trägheitskraft mit dem Betrag

$$F_C = 2 \cdot m \cdot v \cdot \omega = \frac{2 \cdot m \cdot v \cdot (2 \cdot \pi)}{T} = \frac{4 \cdot m \cdot v \cdot \pi}{T} \quad \text{Gl.11}$$

wirkt. Diese Kraft wirkt immer senkrecht zur Drehachse und senkrecht zur Relativbewegung des Körpers, auf den sie wirkt. Die Corioliskraft ist der Rotationsgeschwindigkeit ω des Rotationssystems proportional.

Die auf der Erde bestehende Horizontalkomponente der Corioliskraft (*Abb.8*, links, in oberer Kreisscheibe verlaufend) berechnet sich aus:

$$F_C = 2 m v \omega \sin(\alpha) \quad \text{Gl.12}$$

mit dem Coriolisparameter als Konstante des gleichmäßig rotierenden Bezugssystems:

$$f_c = 2 \omega \sin(\alpha) \quad \text{Gl.13}$$

Daraus folgt

$$F_C = m v f_c \quad \text{Gl.14}$$

mit m = Masse des Astronauten [kg], v = Geschwindigkeit des Astronauten [m/s], ω = Winkelgeschwindigkeit der Erde ($2\pi/(60 \cdot 60 \cdot 24[s]) = 7,272 \cdot 10^{-5} [s^{-1}]$), α = Winkel zwischen $\vec{v}$ und $\vec{\omega}$.

Die Corioliskraft $\vec{F}_C$ ist der Bewegungsgeschwindigkeit proportional, steht senkrecht auf dem Bewegungsvektor (Geschwindigkeit $\vec{v}$) und dem Drehvektor $\vec{\omega}$ der

Erdrotation. Der Vektor $\vec{F}_c$ ergibt sich also aus dem Kreuzprodukt der Vektoren $\vec{v}$ und $\vec{\omega}$.

$$\vec{F}_c = 2 \cdot m \cdot \vec{v} \times \vec{\omega}, \quad \text{Gl.15}$$

Zur Veranschaulichung der Richtungen der Vektoren kann man die rechte Hand-Regel aus Abb.9a verwenden.

Die sich aus den Coriolisfaktorgrößen auf der Erde ergebenden Beschleunigungen sind sehr gering im Vergleich zu den mit sehr viel höherem ω rotierenden Raumstationen zur Erlangung der Zentrifugalbeschleunigung von $a_z = 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$.

Nehmen wir erst einmal einen Radius des Torus der Raumstation (äußerer Ring) an, der ca. den dreifachen Ausmaßen der gegenwärtigen ISS entspricht und man deshalb davon ausgehen darf, dass diese Größe technisch machbar ist. Dies wäre ca. $R=170[m]$. Mit Gl.7 und mit Gl.8 ergibt sich dann eine Umlaufzeit in Gl.17 von:

$$9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] = 170[m] \cdot \omega^2 = 170[m] \cdot \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \left[\frac{1}{s^2} \right] \quad \text{Gl.16}$$

$$\rightarrow T = \sqrt{\frac{170[m] \cdot 4 \cdot \pi^2}{9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]}} = 26,16 \text{ s} \quad \text{Gl.17}$$

$$\rightarrow \omega_H = 0,24 \left[\frac{1}{s} \right] \quad \text{Gl.18}$$

Der spiralförmige „Coriolisaufgang“ zum Habitat (Abb.9) und die hier in Körperlängsachse wirkende Corioliskraft bei der Bewegung des Astronauten von der Rotationsachse nach Außen, sollte sich so auswirken, dass der Astronaut sich anfänglich vom schwebelosen Labor startend an beidseitig angebrachten Handläufen in den spiralförmig angeordneten „Coriolisaufgang“ hineinzieht und sich dabei gleichzeitig auf der Lauffläche mit den Füßen weiterbewegt. Dieses soll zunächst mit der Geschwindigkeit

$v = 1 \left[\frac{m}{s} \right]$ passieren. Nach Gl.12 und mit dem eingeschlossenen Winkel $\alpha=90^\circ$

zwischen den Vektoren $\vec{v}$ und $\vec{\omega}$ sowie der Masse $m=90 \text{ [kg]}$ des Astronauten, ergibt sich eine Corioliskraft von:

$$F_c = 2 \cdot 90[kg] \cdot 1 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 0,24 \left[\frac{1}{s} \right] \cdot \sin(90^\circ) = 4,32 \text{ [daN]} \quad \text{Gl.19}$$

Die hier für die Kraft verwendete Einheit Deka Newton (daN) wurde der Anschauung wegen genommen, da diese in etwa der Gewichtskraft entspricht.

Sich mit dieser Geschwindigkeit aus Gl.19 nach Außen bewegend erfährt der Astronaut nach Abb.9 eine Corioliskraft von 4,32 [daN] in Körperlängsachse, d.h. in der Ebene senkrecht zur Richtung der Rotationsachse des Habitats (roter Pfeil). Zunehmend nach

Corioliskraft von der Rotationsachse weg und macht den Astronauten etwas schwerer.

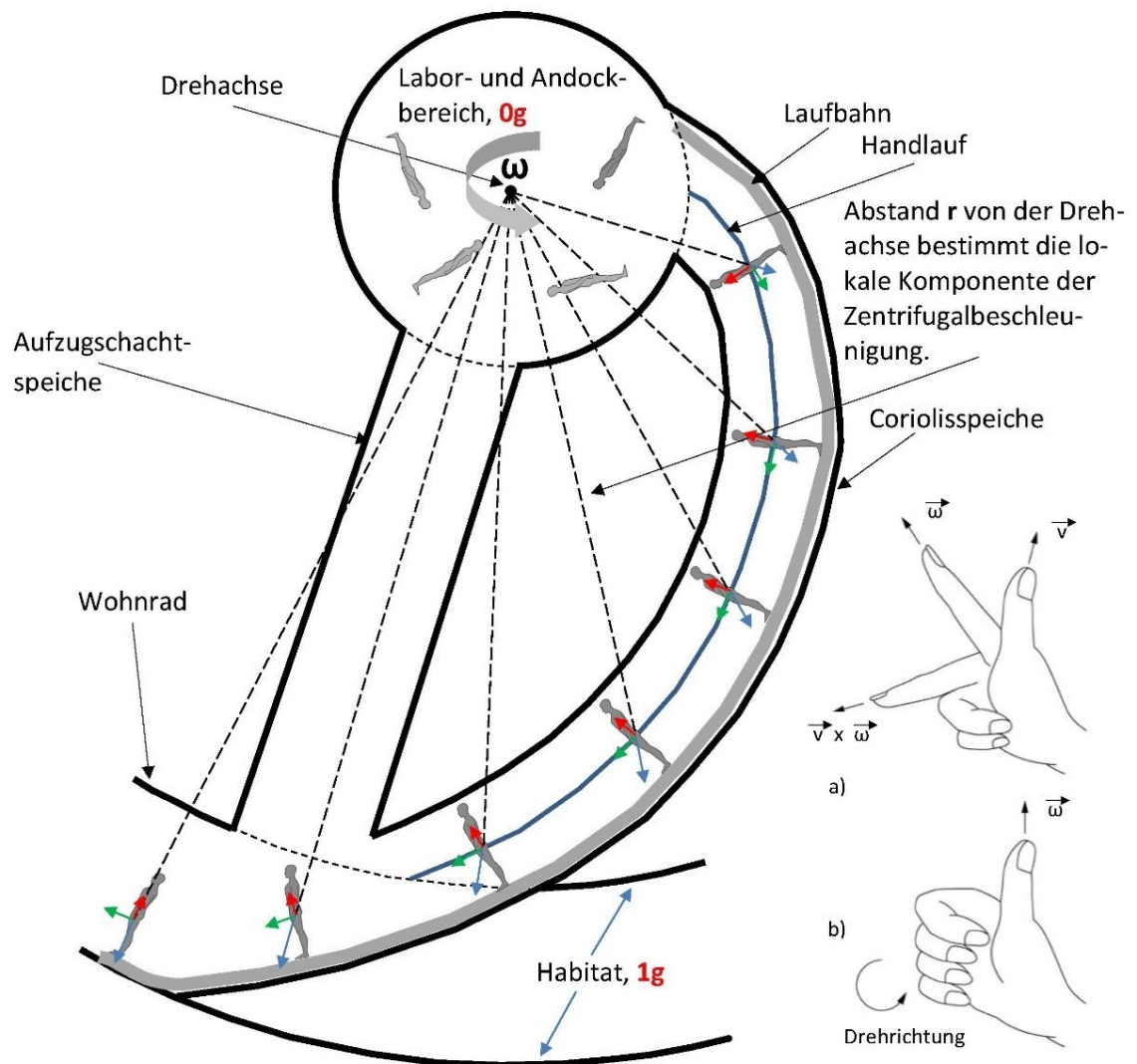


Abbildung 9: Der Astronaut bewegt sich von Innen nach Außen nicht auf, sondern in der Drehebene. Die Corioliskraft wirkt somit in Richtung seiner Körperlängsachse und hat keinen „umwerfenden“ Effekt wie auf einer Spielplatzdreh-scheibe, sondern schwächt die „zunehmende Schwerkraft“ nach Außen etwas ab. **Corioliskraft** (roter Pfeil), **Bewegungsgeschwindigkeit** (grüner Pfeil), **Zentrifugalkomponente** (blauer Pfeil) [Quelle: Linus Hoffmann]

Ein weiterer Vorteil dieses spiralförmigen Aufgangs ist, dass die Corioliskraft während der stetig ansteigenden Zentrifugalkraft bei der Bewegung nach Außen, mit deren Kraftvektor eine leicht vorantreibende Kraft in Richtung des Bewegungsvektors (grün) ergibt. Von Innen nach Außen bewegend wird der Astronaut das Gefühl haben, sich bergab zu bewegen und dabei schwerer zu werden. Auf dem Rückweg wäre dieser Effekt bremsend, als ob man bergauf geht aber dabei immer leichter wird. Man erreicht dadurch ein kontrolliertes Bewegen in der Röhre, ohne unkontrolliert anzustoßen. Bei

einem geraden Arm würde die Corioliskraft einen Körper auf eine Wandungsseite drücken und die dann wirkende Reibungskraft dafür sorgen, dass der Rest des Oberkörpers aufgrund der Zentrifugalkraft nach Außen gedrückt wird (Folge: unkontrolliertes nach vorne Fallen).

Die Corioliskraft ergibt bei gleichbleibender Geschwindigkeit (*z. B. $1[m/s]$* entgegen der Rotation) im Habitatbereich eine Verringerung der Zentrifugalkomponente und somit der Gewichtskraft des Astronauten um ca. 4,32 kg. Ändert der Astronaut im Habitatbereich die Bewegungsrichtung (in *Abb.9* also in Drehrichtung) und behält die Geschwindigkeit *$v = 1[m/s]$* bei, so würde er um ca. 4,32 kg schwerer, bei höheren Fortbewegungsgeschwindigkeiten entsprechend mehr (dadurch variable Möglichkeiten der sportlichen Ertüchtigung).

Betreibt man im Habitat Laufsport, so hängt die körperliche Belastung also von der Bewegungsrichtung (laufen mit oder entgegen der Drehbewegung des Habitats) ab. Nach *Gl.14* würde man bei Verdoppelung der Geschwindigkeit auch eine Verdoppelung der Corioliskraft erzielen. Es kann also festgehalten werden, dass es drei Fälle der relativen Bewegung zum rotierenden Bezugssystem gibt, bei denen die Corioliskraft nur in den folgend ersten beiden Fällen wirkt:

1. Fall: Radiale Bewegung

*Bei Bewegungen auf rotierenden Körpern, die radial nach Außen gehen, führt das zu einer Ablenkung relativ zur drehenden Unterlage entgegengesetzt der Drehrichtung (siehe rechte Hand Regel, *Abb.9a*).*

2. Fall: Tangentiale Bewegung

*Betrachtet man eine drehende Scheibe, auf der sich ein Körper bei festbleibendem Abstand zum Drehpunkt zusätzlich in Drehrichtung bewegt, so ergibt sich aus der Vektorrechnung (rechte Handregel *Abb.9a*), dass die Corioliskraft ebenfalls in Bewegungsrichtung nach rechts wirkt, also nach Außen. Nach Außen spürt auch der sich mitdrehende Beobachter die Zentrifugalkraft, d.h. die Corioliskraft verstärkt hier die Zentrifugalkraft. Bewegt sich der Körper gegen die Drehrichtung, so wird die Zentrifugalkraft entsprechend abgeschwächt.*

3. Fall: Axiale Bewegung

Der Körper bewegt sich entlang (parallel) der Drehachse. In diesem Fall tritt keine Corioliskraft auf.

Bei gegebener Masse und Bewegungsgeschwindigkeit eines Probekörpers (Astronaut) im rotierenden Bezugssystem ist der Coriolisfaktor der durch die Rotationsgeschwindigkeit des Systems (Raumstation oder Erde) Einfluss nehmende Faktor auf die Corioliskraft:

Coriolisfaktor auf der Erde mit *Gl.13*:

$$f_{c, Erde (Herkenrath)} = 2 \cdot \omega = 1,45 \cdot 10^{-4} [s^{-1}] \quad Gl.20$$

Coriolisfaktor in Raumstation mit Gl.18:

$$f_{c, Raumstation} = 2 \cdot \omega = 4,80 \cdot 10^{-1} [s^{-1}] \quad Gl.21$$

Die Corioliskraft auf die Bewohner im Habitat ist im Vergleich zur Erde ca. 3310-mal stärker. Aus diesem Grund ist es wichtig zu wissen, was dieses schlimmsten Falls auf den menschlichen Körper auf lange Zeit für Auswirkungen haben kann.

Eine letzte Betrachtung zu der laut Abb.9 vorhandenen Kräfteverteilung von Corioliskraft und Zentrifugalkraft im angenommenen Habitat (Radius $R=170$ [m]), ist der prozentuale Unterschied der wirkenden Kräfte.

Befindet sich der Astronaut im Außenbereich des Habitats in Ruhe, so ist die unterschiedliche Komponente der Zentrifugalbeschleunigung zwischen Kopf und Fuß und deren Auswirkungen auf den menschlichen Organismus primär zu untersuchen. Corioliskräfte würden wegen der hauptsächlich Tangentialbewegung im Habitat (siehe 2.Fall) in Radialrichtung – wie die Zentrifugalkraft - wirken.

Unterschiede der Zentrifugalbeschleunigung bei einem $h=1,85$ [m] großen Menschen zwischen Kopf und Fuß lassen sich wie folgt einfach durch das Verhältnis zwischen der Körpergröße und dem Radius der Station berechnen:

$$p_R \% = \frac{a_{ZF, Fuß} - a_{ZF, Kopf}}{a_{ZF, Fuß}} = \frac{\omega^2 \cdot r - \omega^2 \cdot (r-h)}{\omega^2 \cdot r} = \frac{h}{r} \rightarrow p_R \% = \frac{1,85 [m]}{170 [m]} = 0,01 = 1\% \quad Gl.22$$

Die tatsächlichen Auswirkungen dieser Differenz von 1% müssen experimentell durch Versuche mit einer Zentrifuge (für *envihab*, Gl.23) auf der Erde ermittelt werden:

$$p^* \% = \frac{h}{r} \rightarrow p^* \% = \frac{1,85 [m]}{3,80 [m]} = 0,49 = 49\% \quad Gl.23$$

In der *envihab**-Humanzentrifuge des DLR in Köln (Abb.10) erzielt man nach Gl.23 sehr hohe Werte für die Differenzen der Zentrifugalbeschleunigungen zwischen Kopf und Fuß und kann - wenn es Effekte gibt – diese bei sehr hohen Beschleunigungswerten gut nachweisen. Verläuft es hier hinsichtlich der Auswirkungen auf den menschlichen Körper unkritisch, so ist dieses erst recht bei größeren Radien der Zentrifuge (bis hin zur Abmessung der Raumstation) der Fall.



Abbildung 10: DLR Kurzarmzentrifuge des envihab. [I-Net10]

4.2.3 Eulerkraft

In der [klassischen Mechanik](#) ist die Eulerkraft (benannt nach [Leonhard Euler](#), 1707, Schweizer Mathematiker und Physiker),

„die auf einen Körper wirkende [Scheinkraft](#) (Trägheitskraft), die in einem [rotierenden Bezugssystem](#) auftritt, wenn die Richtung der Rotationsachse oder deren Rotationsgeschwindigkeit sich zeitlich ändern“

Diese Kraft wird auch Kreiselkraft genannt und soll hier nur der Vollständigkeit wegen aufgeführt werden:

$$\vec{F}_{Euler} = -m \cdot \frac{d\vec{\omega}}{dt} \times \vec{r} = -m \cdot \vec{\alpha} \times \vec{r} \quad Gl.24$$

mit

der Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$ des Bezugssystems,

der Winkelbeschleunigung $\vec{\alpha}$ des Bezugssystems,

dem Ortsvektor $\vec{r}$ des Punktes im Bezugssystem

Bei Wirkung eines Kippmomentes auf die Richtung der Rotationsachse, würde die Achse eines Kreisels (Raumstation) in Präzession geraten (z.B. durch falsches Andocken eines Raumschiffs). Es zeigt sich eine Kraftwirkung senkrecht zur Kipprichtung der Rotations-achse. Die Achse beschreibt dann einen Umlauf auf dem Mantel eines gedachten Kegels (Abb.11). Eine zweite mögliche Bewegung der Kreiselachse ist die Nutation (der Präzession überlagerte Taumelbewegung). Dies passiert, wenn der [Drehimpuls](#) nicht parallel zu einer der [Hauptträgheitsachsen](#) des Kreisels ausgerichtet ist. Dies kann man konstruktiv durch eine symmetrische Massenverteilung der Raumstation zur Rotationsachse minimieren.

Ändert sich der Betrag der Winkelgeschwindigkeit (durch Abbremsung oder Beschleunigung der Rotation), so kann man merken, dass das Trägheitsverhalten bezüglich der Rotation nicht nur von der Masse eines Körpers, sondern auch von deren räumlicher Verteilung abhängt.

Die Kreiselkräfte sollen hier außer Acht gelassen werden, da in einem rotierenden Bezugssystem mit konstanter Winkelgeschwindigkeit und Achsausrichtung, sowie einer symmetrischen Massenverteilung, nur die beiden Scheinkräfte Coriolis- und Zentrifugalkraft wirken. Eine solche Station würde mit ständig gleicher Achsausrichtung und Drehgeschwindigkeit stabil auf einem Orbit um die Erde oder den Mond kreisen können.

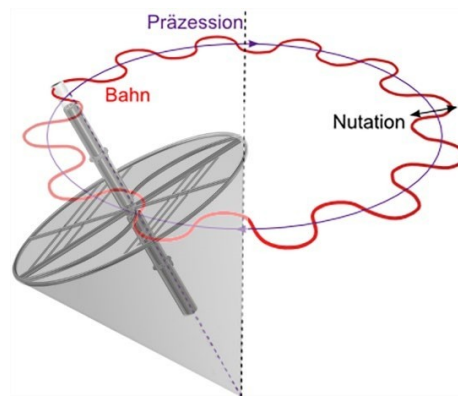


Abbildung 11: Bildliche Beschreibung der Präzession sowie Nutation [I-Net11]

4.3 Berechnungen zur Raumstation (R=170[m]) im Vergleich zur Erde

Folgende Berechnungen wurden anhand der in dieser Arbeit verwandten Formeln durchgeführt. Es wurde dabei ein Torus für die Raumstation mit einem Radius von 170 [m] vorausgesetzt. Diese Größe stellt zumindest eine technische Machbarkeit in Aussicht, wenn man sie mit der gegenwärtigen Spannweite der ISS von 109 [m] vergleicht.

Zu Tabelle 1:

Die Rechnungen zeigen hier im System Erde, das beispielsweise ein Lehrer, der sich mit der Masse von $m=90$ [kg] und einer Schrittgeschwindigkeit von $v = 1$ [m/s] vom Parkplatz zu den Klassenräumen im Gymnasium Herkenrath bewegt, dort eine seitlich zu seiner Bewegungsrichtung ablenkende Corioliskraft von 0,0013 [daN] erfährt. Das entspricht einer Gewichtskraft von ungefähr 1,3[g]. Hat der Lehrer es sehr eilig ($v = 3$ [m/s]) um nicht zu spät zum Unterricht zu kommen, so entspricht die seitliche Ablenkung schon 3,9[g]. Die Kraft ist also bei konstanter Erdrotation direkt proportional zur Masse und Fortbewegungsgeschwindigkeit des Lehrers.

Bewegt sich ein Panzer mit der erheblich höheren Masse von 50 [t] mit derselben oben genannten Schrittgeschwindigkeit, so entspricht die ihn seitlich ablenkende Kraft einer Gewichtskraft von bereits 727,2[g].

Schaut man sich nun die wirkenden Corioliskräfte in der vorgegebenen Raumstation an, so sieht man, dass aufgrund des ca. 3310-fach größeren Coriolisfaktors (siehe Tab.2, unten, mittels Gl. 14, 20, 21) auch die Kräfte um diesen Faktor ansteigen. Bei $v = 1 \text{ [m/s]}$ erfährt der Astronaut eine seitliche Kraft von $4,32 \text{ [daN]}$ und würde es dort oben theoretisch einen Panzer geben, so würde dieser bei derselben Geschwindigkeit v bereits eine seitliche Ablenkung von $2,4 \text{ [t]}$ Gewichtskraft erfahren.

Erde (Bereich Herkenrath) Corioliskraft auf bewegliche Objekte verschiedener Massen und Geschwindigkeiten Umlaufzeit $T_{\text{Erde}} = 86400 \text{ [s]}$, $\omega_E = 7.27 \cdot 10^{-5} \text{ [s}^{-1}\text{]}$				
Erde, Oberfläche	Masse	Bewegungsgeschwindigkeit der Masse m senkrecht zur Erdachse	Coriolisfaktor	Corioliskraft
1g	$m \text{ [kg]}$	$v \text{ [m/s]}$	$f_{\text{CE}} \text{ [1/s]}$	$F_{\text{CE}} \text{ [daN]}$
Mensch 1	90	1	1,45E-04	0,0013
Mensch 2	130	1	1,45E-04	0,0019
Panzer	50 000	1	1,45E-04	0,7272
Wind (1 m ³ Luft)	1	10	1,45E-04	0,0001
Gewehr kugel	0,02	1000	1,45E-04	0,0003
Raumstation Corioliskraft auf bewegliche Objekte verschiedener Massen und Geschwindigkeiten Umlaufzeit $T_{\text{Raumstation}} = 26.16 \text{ [s]}$, $r = 170 \text{ [m]}$, $\omega_H = 0.2402 \text{ [s}^{-1}\text{]}$, $\alpha_{(\omega, v)} = 90^\circ$				
Raumstation, Außen, Zentrifugalbeschleunigung	Masse	Bewegungsgeschwindigkeit der Masse m senkrecht zur Drehachse	Coriolisfaktor	Corioliskraft
1g	$m \text{ [kg]}$	$v \text{ [m/s]}$	$f_{\text{CR}} \text{ [1/s]}$	$F_{\text{CR}} \text{ [daN]}$
Astronaut 1	90	1	4,80E-01	4,32
Astronaut 2	130	1	4,80E-01	6,24
Klimaanlage (1 m ³ Luft)	1	1	4,80E-01	0,048
Panzer	50 000	1	4,80E-01	2401,83

Tabelle 1: Corioliskraft auf bewegliche Objekte verschiedener Massen und Geschwindigkeiten auf der Erde und in der Raumstation.

Zu Tabelle 2:

Diese Rechnungen (Gl.14, 17, 18) zeigen die Vervielfachung des Verhältnisses der Coriolisfaktoren zwischen Erde und unterschiedlichen Rotationssystemen (mit unterschiedlichen Radien), um auf die Zentrifugalbeschleunigung von 1g zu kommen.

Raumstation/Erde Verhältnis der Coriolisfaktoren Raumstation/Erde bei unterschiedl. Habitatradien $m_{\text{Astronaut}} = 90 \text{ kg}$, $a_z = 1g$					
Radius Habitat	Umlaufzeit	Umlaufgeschwindigkeit im Habitat (außen)	Coriolisfaktor Station	Coriolisfaktor Erde	Verhältnis $f_{\text{CR}}/f_{\text{CE}}$
$r \text{ [m]}$	$T \text{ [s]}$	$v \text{ [m/s]}$	$f_{\text{CR}} \text{ [1/s]}$	$f_{\text{CE}} \text{ [1/s]}$	$[-]$
3,80*	3,91	6,1	3,21	1,45E-04	28438
42,5	13,08	20,42	9,61E-01	1,45E-04	8501
85	18,49	28,87	6,79E-01	1,45E-04	6011
170	26,16	40,83	4,80E-01	1,45E-04	3310

Tabelle 2: Verhältnis der Coriolisfaktoren Raumstation/Erde bei unterschiedlichen Habitatradien. Envihab * DLR Kurzarmzentrifuge ($r = 3,80 \text{ [m]}$). Astronaut liegt mit den Füßen nach außen.

Dabei bemerkt man, dass die Kurzarmzentrifuge des *envihab* *-Labors der DLR den größten Coriolisfaktor besitzt und somit sehr gut für Untersuchungen geeignet ist, um evtl. vorhandene Effekte dieser Beschleunigungen auf die Physiognomie des menschlichen Körpers zu verstärken und dadurch besser nachzuweisen.

Zu Tabelle 3:

Die Rechnungen (*Gl.6,11, 14* und *Gl.18*) zeigen im System Raumstation eine Zunahme der Zentrifugalkraft mit zunehmendem Abstand zur Drehachse.

Raumstation Anstieg der Zentrifugalbeschleunigung mit wachsendem Abstand zur Drehachse $m_{\text{Astronaut}} = 90 \text{ kg}$, $v_{\text{Astronaut}} = 1 \text{ m/s}$, $a_{\text{Zentrifugal}} = 1g$, $\omega = 0.2402 \text{ s}^{-1}$, $\alpha_{(\omega,v)} = 90^\circ$		
Abstand des äußeren Randes des Habitats zur Drehachse	Corioliskraft	Zentrifugalkraft
r [m]	F_c [daN]	F_z [daN]
5	4,32	2,60
10	4,32	5,19
15	4,32	7,79
20	4,32	10,38
25	4,32	12,98
30	4,32	15,58
35	4,32	18,17
40	4,32	20,77
50	4,32	25,96
155	4,32	80,47
160	4,32	83,07
165	4,32	85,67
170	4,32	88,26

Tabelle 3: Anstieg der Zentrifugalkraft mit wachsendem Abstand zur Drehachse, während sich ein 90 [kg] schwerer Astronaut mit $v = 1 \text{ m/s}$ nach Außen bewegt.

5. Quellenverzeichnis (Literatur u. Bilder)

[I-Net1]:

https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Betruhestudie_AGBRESA_Der_Einfluss_kuenstlicher_Schwerkraft_auf_die_Gesundheit_von_Astronauten

[I-Net2]:

[https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%84quivalenzprinzip_\(Physik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%84quivalenzprinzip_(Physik))

[I-Net3]:

[Herman Potočník – Wikipedia](#)

[I-Net4]:

https://de.wikipedia.org/wiki/Rotierende_Raumstation

[I-Net5]:

https://de.wikipedia.org/wiki/Internationale_Raumstation

[I-Net6]:

Schülerlexikon Physik, online, <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/gravitationsfelder>

[I-Net7]:

[https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%84quivalenzprinzip_\(Physik\)#/media/Datei:Elevator_gravity.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%84quivalenzprinzip_(Physik)#/media/Datei:Elevator_gravity.svg)

[I-Net8]:

[\[https://de.wikipedia.org/wiki/Columbus_\(ISS-Modul\)#Spezifikationen\]](https://de.wikipedia.org/wiki/Columbus_(ISS-Modul)#Spezifikationen)

[I-Net9]:

Google Earth

[I-Net10]:

<https://www.dlr.de/envi/ab/desktopdefault.aspx/tabid-8667/#gallery/23780>

[I-Net11]:

[LP – Kreisbewegung \(uni-goettingen.de\)](#)

6. Abkürzungsverzeichnis

AGBRESA	Artificial Gravity Bed Rest Study
ART	Allgemeine Relativitäts Theorie
BMWi	Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
ESA	European Space Agency
envihab	(„ envi ronment“ = Umwelt und „ hab itat“ = Lebensraum)
ISS	International Space Station
NASA	National Aeronautics and Space Administration