Numerische Simulation eines Mondflugs

[1]

Besondere Lernleistung

von

Toni Happe

Gymnasium Martineum Halberstadt

Februar 2018 – Februar 2019

Inhaltsverzeichnis

Bildverzeichnis

Abbildungen sind nicht maßstabsgerecht.

Numerische Simulation eines Mondfluges

1. Einleitung

1.1. Hinführung

Seit dem Beginn der Menschheit zieht der Mond die Aufmerksamkeit Vieler auf sich. Am Anfang wurde er noch als ein religiöses Objekt betrachtet, doch sehr bald kam auch der Wunsch auf, einen Fuß auf ihn zu setzen und damit „ein[en] riesige[n] Sprung für die Menschheit“ [2] zu machen.

Als gegen Ende der 1940er Jahre der Kalte Krieg ausbrach, wurde immer mehr dafür gegeben das eigene Land als überlegen darzustellen, so unter anderem auch im „Wettlauf ins All.“ Im Oktober 1957 entschied diesen jedoch die Sowjetunion mit dem ersten von Menschen geschaffenen Satelliten „Sputnik 1“, dem ersten Lebewesen mit Hündin Laika, als auch dem ersten Menschen im All für sich und der „Wettlauf ins All“ wurde zu einem Wettlauf zum Mond. Nachdem die Vereinigten Staaten die vorherigen „Disziplinen“ dieses Wettkampfes nicht für sich entscheiden konnten wurde der Druck auf die NASA als erstes Land einen Menschen zum Mond zu fliegen immer größer. Am 21. Juli 1969 um 3:56 Uhr mitteleuropäischer Zeit war es schließlich soweit. Die Amerikaner Neil Armstrong und Buzz Aldrin setzten ihren Fuß auf den Mond und gewannen damit den Wettlauf zum Mond für die Vereinigten Staaten.

Doch wie war dieser Mondflug möglich und was musste hierfür berechnet werden? Mit diesen Fragen wird sich, in vereinfachter Form, als eindimensionaler Flug von der Erde zum Mond, in dieser Arbeit auseinandergesetzt.

Kommentiert [TH1]: Am Ende nochmal darauf zurückkommen (Rahmenbildung)
Nur harter aufschlag möglich → irgendwas zum bremsen nötig etc

1.2 Physikalische Grundlagen

Möchte man ein Raumschiff von der Erde starten, so wirken hauptsächlich 2 Kräfte auf dieses ein. Die Gravitationskraft der Erde und die des Mondes, wobei beide Kräfte von der momentanen Position des Raumschiffes, beziehungsweise dem Abstand zu den jeweiligen Körpern, als auch von den Massen des Raumschiffes und der Erde oder des Mondes abhängig sind. Hierfür wird die newtonsche Gravitationskraft verwendet, dessen Formel wie folgt lautet:

(die Bedeutung aller Variablen sind unter 1.3 Variablen, Konstanten und Werte in tabellarischer Form aufgelistet)

$\vec{F}_G = \gamma \cdot \frac{M_1 \cdot m_2}{r^2}$

$$[\vec{F}_G] = \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot \frac{kg \cdot kg}{m^2}$$

$$[\vec{F}_G] = \frac{m}{s^2} \cdot kg$$

$$[\vec{F}_G] = N$$

Nun werden jeweils die Werte für Erde und Mond eingesetzt und man erhält folgende Formeln, mit selbigen Einheiten wie bei der allgemeinen Formel:

Gravitationskraft der Erde:

$$\vec{F}_{ER} = \gamma \cdot \frac{M_E * m_R}{r_{ER}^2}$$

Gravitationskraft des Mondes:

$$\vec{F}_{MR} = \gamma \cdot \frac{M_M * m_R}{r_{MR}^2}$$

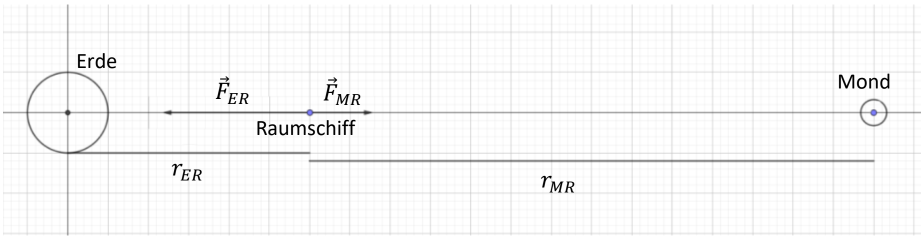


Abb. 1: Skizze des Aufbaus mit Beschriftungen der Kräfte und Abstände

Um die Entfernung des Raumschiffes zur Erde zu ermitteln muss, da sich die Erde bei den Koordinaten $P_E(0|0)$ befindet, lediglich der Punkt des Raumschiffes auf der x-Achse als Wert für die Entfernung angenommen werden. Für die des Mondes hingegen wird die Position dessen von der des Raumschiffes subtrahiert.

$$r_{ER} = P_R$$

$$r_{MR} = P_R - P_M$$

Kennt man nun die Werte beider Gravitationskräfte, kann die resultierende Kraft $\vec{F}_{RES}$ bestimmt werden, indem man beide Werte addiert, woraus anschließend auch die resultierende Beschleunigung auf das Raumschiff berechnet werden kann.

$$\vec{F}_{RES} = \vec{F}_{ER} + \vec{F}_{MR}$$

$$a_{RES} = \frac{\vec{F}_{RES}}{m_R}$$

$$[a_{RES}] = \frac{N}{kg}$$

$$[a_{RES}] = \frac{kg \cdot m}{kg \cdot s^2}$$

Die Flugbahn des Raumschiffs besteht prinzipiell aus zwei Abschnitten. Im ersten Abschnitt ist die Gravitationskraft der Erde größer als die des Mondes, weshalb auf die Raumkapsel eine Kraft entgegen ihrer Bewegungsrichtung wirkt und somit auch eine negative Beschleunigung auf sie einwirkt. Wurde eine ausreichend hohe Startgeschwindigkeit v_0 gewählt, so erreicht das Raumschiff einen Punkt, an welchem die Kraft der Erde, der des Mondes gleicht und auf dieses somit keine resultierende Beschleunigung mehr wirkt. Dieser Punkt wird auch als innerer oder erster Lagrange Punkt bezeichnet. Ab dieser Stelle ist die Gravitationskraft des Mondes nun stärker als die der Erde, weshalb die Raumkapsel jetzt nicht mehr abgebremst, sondern beschleunigt wird, bis sie letztendlich auf die Oberfläche des Mondes trifft.

Kommentiert [TH2]: Wirkt wirkt wirkt

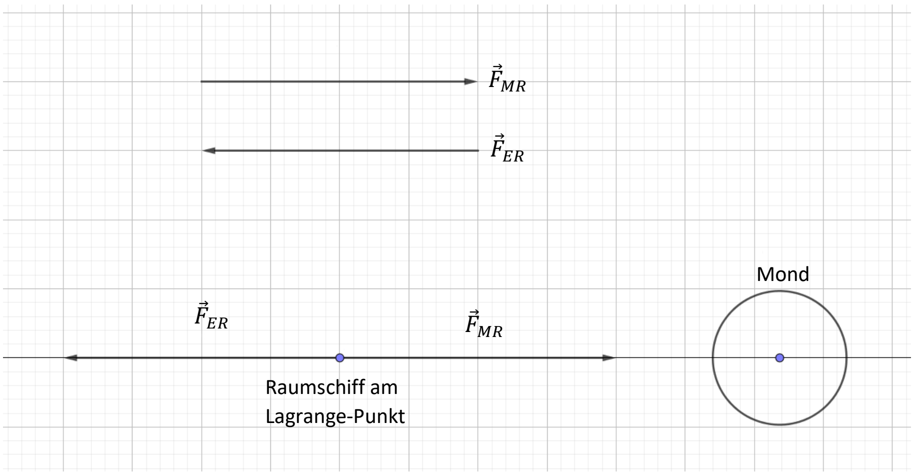


Abb. 2: Skizze des Lagrange-Punktes mit Veranschaulichung des Kräftegleichnis

1.3. Variablen, Konstanten und Werte

Kommentiert [TH3]: Eventuell komplett unter Umsetzung verschieben…

In der folgenden Tabelle sind alle verwendeten Variablen, Naturkonstanten und Anfangswerte jeweils mit ihrer Schreibweise im Text und Programmcode und ihrer Definition aufgelistet.

Anfangswerte

Bezeichnung im Text	**Bezeichnung im Programmcode**	**Wert**	**Beschreibung**
v_0	v[0]	Wird durch den Nutzer eingegeben	Startgeschwindigkeit des Raumschiffes
t_0	t[0]	$0s$	Startpunkt der Variable für die Zeit
P_{R0}	PR[0]	$3.844 \cdot 10^8 m$ ($\triangleq r_E$)	Startpunkt des Raumschiffes; entspricht dem Erdradius r_E

Naturkonstanten und weitere feste Werte

Bezeichnung im Text	**Bezeichnung im Programmcode**	**Wert**	**Beschreibung**
γ	G	$6{,}67408 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg * s^2}$	Gravitationskonstante
m_R	mR	$5000\ kg$	Masse des Raumschiffs
m_M	mM	$7{,}349 \cdot\ 10^{22}\ kg$	Masse des Mondes
m_E	mE	$5{,}972 \cdot 10^{24}\ kg$	Masse der Erde
P_E	PE	0	Mittelpunkt der Erde
P_M	PM		Mittelpunkt des Mondes
r_E	rE	$6371 \cdot 10^3 m$	Erdradius
r_M	rM	$1737 \cdot 10^3 m$	Mondradius
r_{EM}	rEM	$3844 \cdot 10^5$	Entfernung zwischen Erde und Mond

Variablen

Bezeichnung im Text	**Bezeichnung im Programmcode**	**Beschreibung**
i	i	Fortlaufende (Hilfs)-Variable, erhöht sich um 1 bei jedem Durchgang
t	t[i]	Zeitpunkt bei Durchgang i
P_R	PR[i]	Punkt des Raumschiffes
$\vec{F}_{ER}$	FE	Gravitationskraft der Erde
$\vec{F}_{MR}$	FM	Gravitationskraft des Mondes
$\vec{F}_{RES}$	FRES	Resultierende Kraft
$\vec{a}_E$	aE	In Richtung der Erde wirkende Beschleunigung
$\vec{a}_M$	aM	In Richtung des Mondes wirkende Beschleunigung
$\vec{a}_{Res}$	aR	Resultierende Beschleunigung
v	v[i]	Geschwindigkeit des Raumschiffs

1.4 Ziel

Das Ziel dieser Arbeit ist es die grundlegenden physikalischen Vorgänge während eines Mondfluges und die dabei wirkenden Kräfte zu veranschaulichen. Dies erfolgt in Form einer numerischen Simulation in der Programmiersprache Python mithilfe des Runge-Kutta-Verfahren der vierten Ordnung (näheres unter *2.2 Numerische Umsetzung*), bei welcher der Nutzer die Startgeschwindigkeit des Raumschiffes v_0 eingeben kann und auf dieser basierend eine Voraussage über die Flugbahn getroffen wird. Die berechneten Daten werden in einer tabellenförmig aufgebauten Textdatei („Ausgabe.dat", wird im selben Verzeichnis wie das Programm erstellt) ausgegeben. Diese „Tabelle" besteht aus sieben Spalten, welche jeweils durch ein Tabulator-Zeichen voneinander getrennt sind und in der hier dargestellten Reihenfolge gespeichert werden:

Text	t	P_R	v	$\vec{a}_{Res}$	$\vec{F}_{RES}$	$\vec{F}_{ER}$	$\vec{F}_{MR}$
Programm	t[i]	PR[i]	v[i]	aR	FRES	FE	FM

Diese Datei kann nun mit einem beliebigen Programm zur Visualisierung von Blockdaten, wie zum Beispiel qtGrace (Windows) oder Grace (Linux) ausgelesen und in verschiedenen Zusammenhängen und Abhängigkeiten dargestellt werden.

2. Methoden

2.1 Zusätzliche Variablen

Um die notwendigen Berechnungen des Programms realisieren und erläutern zu können müssen zu Beginn einige weitere Variablen eingeführt werden.

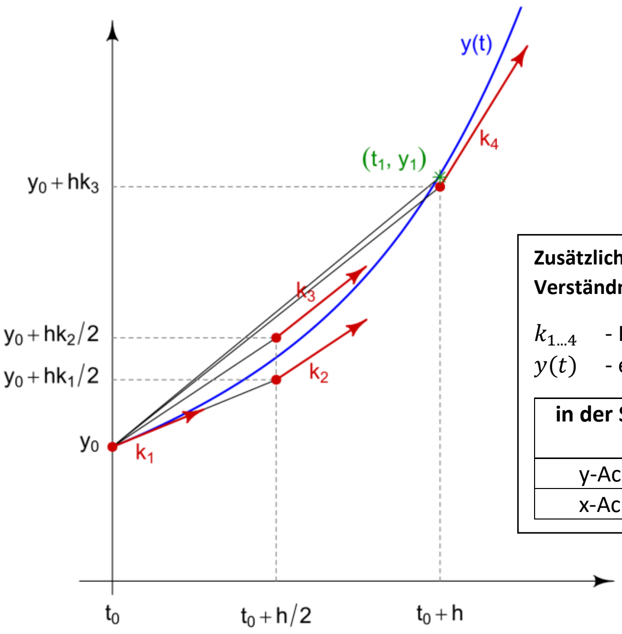
Bezeichnung im Text	**Bezeichnung im Programmcode**	**Wert**	**Beschreibung**
-	n	1000000	Im Programm festgelegte Anzahl an maximalen Durchgängen
i	i	-	Fortlaufende (Hilfs)-Variable, erhöht sich um 1 bei jedem Durchgang
h	h	1	Schrittweite

2.2 Numerische Umsetzung

Wie bereits im Voraus beschrieben wirken auf das Raumschiff zeitgleich die Gravitationskräfte von Mond und Erde ein. Es handelt sich hierbei um ein Anfangswertproblem, da die einzige wirklich exakt bekannte Position des Raumschiffes dessen Startpunkt ist. Die darauffolgenden Positionen können also nur näherungsweise über die wirkende Beschleunigung vorhergesagt werden. Um diese Berechnung so genau wie möglich zu gestalten, wird hier das Runge-Kutta-Verfahren der vierten Ordnung (auch „klassisches Runge-Kutta-Verfahren“ oder „RK4“) zur Hilfe genommen.

Dieses Verfahren unterscheidet sich von anderen Verfahren, wie zum Beispiel dem Euler-Verfahren, bei welchem die Steigung am Anfang eines Intervalls bestimmt, mithilfe dessen am Ende dieses Intervalls ein neuer Punkt zur Anstiegsberechnung ermittelt werden kann. Das RK4 hingegen lässt sich in vier Teilschritte unterteilen. Zuerst wird wie bei Euler der Anstieg k_1 an der Stelle 0 (t_0) des Intervalls berechnet.

Anschließend wird eine halbe Schrittweite ($\frac{h}{2}$) in y-Richtung weitergegangen und an dem Schnittpunkt von k_1 mit $t_0 + \frac{h}{2}$ erneut der Anstieg (k_2) berechnet, welcher nun wieder an y_0 angelegt wird. Darauffolgend wird wie bereits für k_2 die Steigung k_3 berechnet, welche ebenfalls bei t_0 angelegt wird. Zuletzt wird der Schnittpunkt von k_3 mit $t_0 + h$ berechnet, welcher wiederum den Startpunkt für das sich anschließende, nächste Intervall darstellt.



Zusätzliche Erklärungen zum Verständnis

$k_{1\ldots4}$ - Hilfssteigungen
$y(t)$ - echte Lösung

in der Skizze	entspricht hier
y-Achse	P_R
x-Achse	t

Abb. 3: RK4 mit den vier Hilfssteigungen [3]

Auf den Mondflug bezogen wird die Position des Raumschiffes im RK4 berechnet, wobei die Differentialgleichung hierfür sowohl von der Geschwindigkeit v, als auch von deren Ableitung, der Beschleunigung $\vec{a}_{Res}$ abhängig ist. Die Formeln für die einzelnen Hilfssteigungen ($k_{1\ldots4}$ für $P_R[i]$ und $l_{1\ldots4}$ für $v[i]$) lauten wie folgt, wobei $v[i-1]$ für die zuletzt berechnete Geschwindigkeit steht:

$k_1 = v[i-1]$
$l_1 = \vec{a}_{Res}$
$k_2 = v[i-1] + \frac{h}{2} \cdot l_1$
$l_2 = \vec{a}_{Res}$

$k_3 = v[i-1] + \frac{h}{2} \cdot l_2$
$l_3 = \vec{a}_{Res}$
$k_4 = v[i-1] + \frac{h}{2} \cdot l_3$
$l_4 = \vec{a}_{Res}$

Aus den zuvor errechneten Hilfssteigungen kann nun die nächste Näherung für die Position des Raumschiffes errechnet werden. Hierbei haben die Hilfssteigungen unterschiedliche Wichtungen. $P_R[i-1]$ steht hierbei für die zuletzt berechnete und $P_R[i]$ für die in diesem Durchgang neu errechnete Position des Raumschiffes.

$$P_R[i] = P_R[i-1] + \frac{h}{6} \cdot (k_1 + 2 \cdot k_2 + 2 \cdot k_3 + k_4)$$

Selbiges wird im Anschluss für die Geschwindigkeit getan, um an $v[i]$ zu gelangen:

$$v[i] = v[i-1] + \frac{h}{6} \cdot (l_1 + 2 \cdot l_2 + 2 \cdot l_3 + l_4)$$

2.3 Implementierung

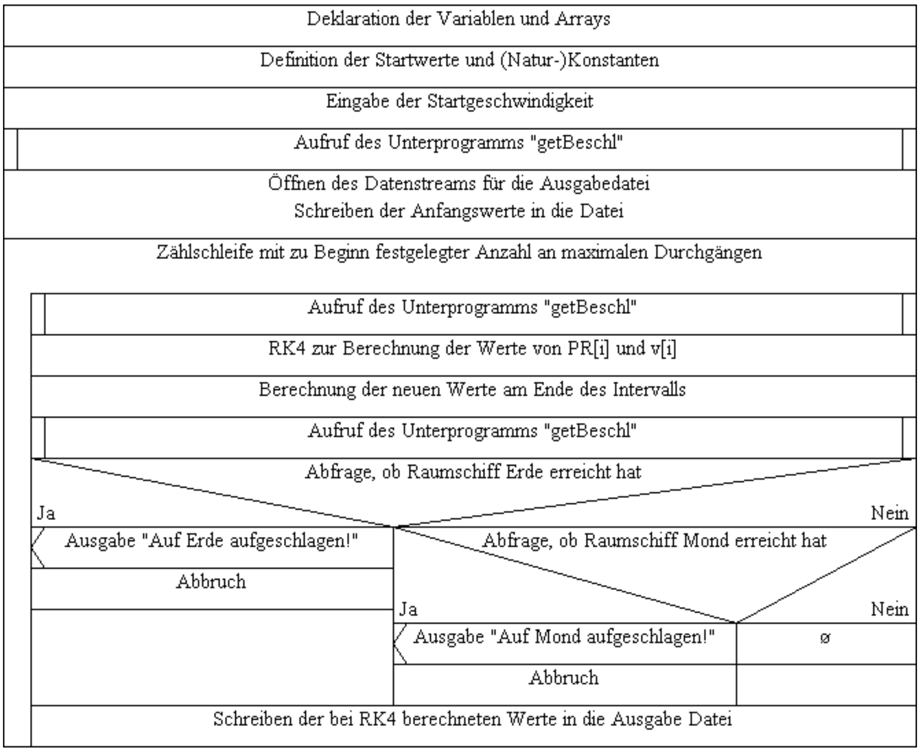


Abb. 4: Struktogramm des Hauptprogramms

Festlegung der Naturkonstanten
Berechnung der Gravitationskraft der Erde
Berechnung der Gravitationskraft des Mondes
Berechnung der resultierenden Kraft
Berechnung der resultierenden Beschleunigung
Rückgabe der Beschleunigung und allen berechneten Kräften

Abb. 5: Struktogramm des Unterprogramms „getBeschl“

Der Ablauf des Programms lässt sich in zwei Abschnitte unterteilen, in das Haupt- und das Unterprogramm „getBeschl“. Im Hauptprogramm werden zuerst alle Variablen, wie die Schrittweite, die Arrays für Zeit, Position und Geschwindigkeit und die Anzahl an maximalen Wiederholungen n, welche ebenfalls die Größe der Arrays (in Python gibt es keine direkten Arrays, dafür aber sogenannte Listen, die denselben Zweck erfüllen) definieren. Anschließend werden Naturkonstanten, wie die Radien von Mond und Erde und die Entfernung beider voneinander sowie die Startwerte deklariert. Die Startgeschwindigkeit kann frei vom Nutzer gewählt werden und wird in Metern pro Sekunde angegeben.

Wurde das Hauptprogramm bis zu diesem Punkt ausgeführt wird „getBeschl“ zum ersten Mal aufgerufen. Hierbei wird lediglich die Position des Raumschiffes zur Zeit 0 übertragen. Im Unterprogramm werden weitere Konstanten deklariert, unter anderem die Massen der Körper sowie die Gravitationskonstante. Die ersten beiden Berechnungen, die im Unterprogramm Ablaufen sind die der Gravitationskräfte von Erde und Mond, aus welchen im Anschluss die Resultierende Kraft $\vec{F}_{RES}$ errechnet wird. Teilt man diese nun durch die Masse des Raumschiffes erhält man die resultierende Beschleunigung $\vec{a}_{Res}$, welche zusammen mit allen berechneten Kräften zurückgegeben wird.

Zurück im Hauptprogramm angekommen wird nun die Ausgabedatei „Ausgabe.dat“ erstellt (falls bereits eine Datei mit diesem Namen vorhanden war wird diese überschrieben beziehungsweise gelöscht) in welche die Werte des nullten Durchgangs geschrieben werden.

Gefolgt wird dies von einer Zählschleife, welche n-mal ausgeführt wird und den Zähler i jeweils um Eins erhöht. In dieser Schleife wird erneut „getBeschl“ ausgeführt, wobei dieses Mal $P_R[i-1]$ in das Programm übergeben wird. Anschließend wird das Runge-Kutta-Verfahren wie unter *2.2 Numerische Umsetzung* beschrieben durchgeführt, wobei letztendlich die neuen Werte für Position und Geschwindigkeit am Ende des Intervalls berechnet und die Zeit t um h weitergesetzt werden. Sind nun alle Berechnungen abgeschlossen wird getestet, ob das Raumschiff inzwischen die Oberfläche des Monds erreicht hat, beziehungsweise, ob die Geschwindigkeit nicht ausreichend war, sodass das Raumschiff zurück auf die Erdoberfläche gestürzt ist. Ist eins der beiden der Fall, so wird eine Meldung ausgegeben und das Programm unterbrochen. Wird das Programm jedoch nicht unterbrochen werden die neu berechneten Werte ebenfalls in die Datei geschrieben.

3. Ergebnisse

Sollen die ausgegebenen Daten nun wie unter *1.4 Ziel* beschrieben dargestellt werden, eröffnen sich verschiedene Möglichkeiten in welchen Abhängigkeiten die Werte zueinander dargestellt werden können. Die hierbei entstehenden Bilder können stark variieren und sind von der eingegebenen Startgeschwindigkeit v_0 abhängig. Wird diese zum Beispiel zu klein gewählt, so erreicht das Raumschiff niemals den Mond, sondern seine Bewegungsrichtung wird vor Erreichen des Lagrange Punktes L_1 umgekehrt und stürzt damit zurück auf die Erdoberfläche.

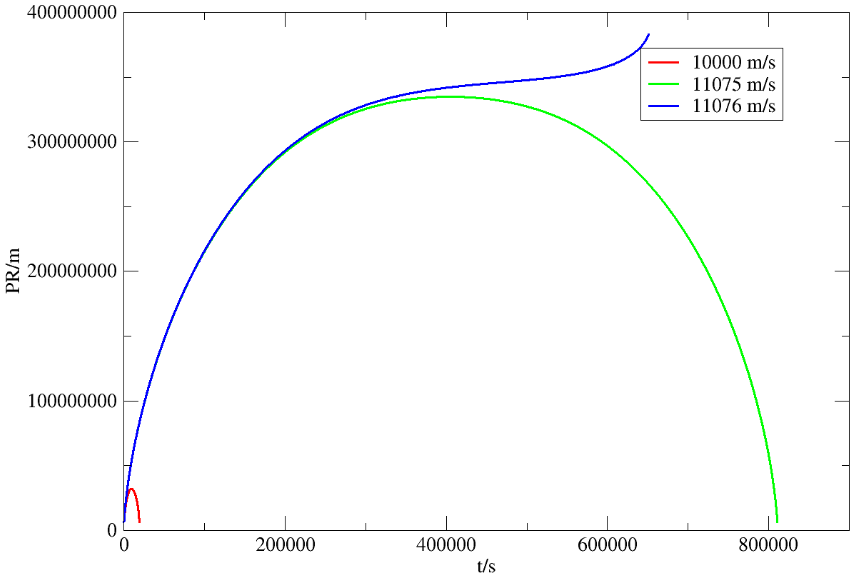


Abb. 6: Position des Raumschiffes in Abhängigkeit von der Zeit

Die einfachste, beziehungsweise geläufigste Abhängigkeit ist die des Ortes von der Zeit, welche in Abbildung 6 mit verschiedenen Startgeschwindigkeiten dargestellt ist. Wie erkennbar ist, stürzt das Raumschiff sowohl bei $1000\,\frac{m}{s}$ als auch bei $11075\,\frac{m}{s}$ wieder zurück auf die Erde. Startet das Raumschiff hingegen mit $11076\,\frac{m}{s}$, so ähnelt die Flugbahn logischerweise der mit $11075\,\frac{m}{s}$, jedoch ist nach einer bestimmten Zeit zu erkennen, dass das Raumschiff nicht weiter abgebremst wird, sondern durch die nun stärkere Gravitationskraft des Mondes angezogen und wieder beschleunigt wird.

Selbiges ist auch bei den Abhängigkeiten von Geschwindigkeit zur Zeit (Abbildung 7) als auch bei der resultierenden Beschleunigung zur Zeit (Abbildung 8) zu sehen.

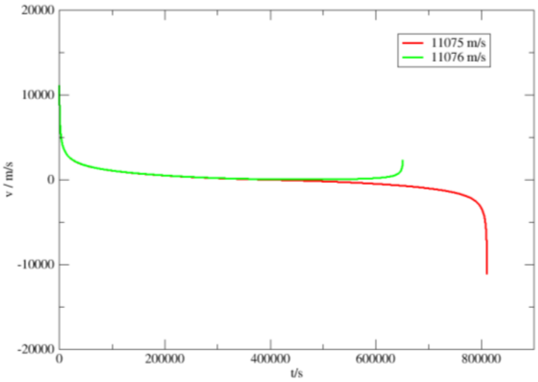


Abb. 7: Geschwindigkeit des Raumschiffes in Abhängigkeit von der Zeit

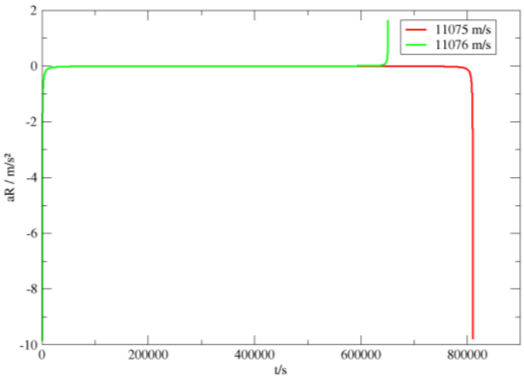


Abb. 8: Resultierende Beschleunigung in Abhängigkeit von der Zeit

Solange das Raumschiff den Lagrange Punkt nicht erreicht hat werden sowohl Geschwindigkeit, als auch Beschleunigung immer geringer, da die Erde das Raumschiff bremst, aber diese Bremswirkung gleichzeitig durch die weiterhin wachsende Entfernung des Raumschiffes von der Erde reduziert wird.

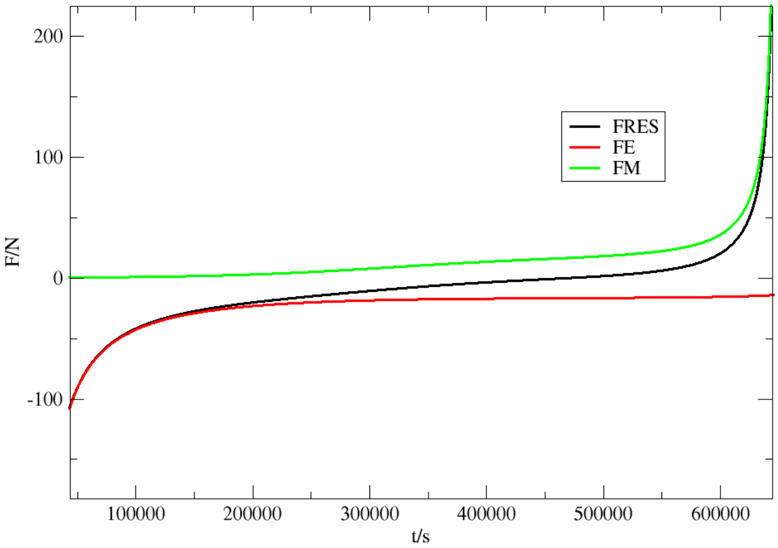


Abb. 9: Alle wirkenden Kräfte in Abhängigkeit von der Zeit bei $v_0 = 11076\ \frac{m}{s}$ (Vergrößerter Ausschnitt)

Stellt man alle wirkenden Kräfte bei der Startgeschwindigkeit von $11076\ \frac{m}{s}$ dar, so ist im Ausschnitt bei Abbildung 9 ersichtlich, dass die resultierende Kraft im ersten Viertel des Ausschnitts nahezu deckungsgleich mit der Gravitationskraft der Erde verläuft, da die vom Mond wirkende Kraft nahe Null ist. Im anschließenden Verlauf entfernt sich $\vec{F}_{RES}$ jedoch immer weiter von $\vec{F}_{ER}$, da der Mond einen immer stärkeren Einfluss auf das Raumschiff hat. Schließlich läuft die resultierende Kraft gegen die Anziehungskraft des Mondes.

Kommentiert [TH4]: Markierung für mich
(bis hierher hab ich es noch einmal überarbeitet, den Rest mache ich morgen noch)

In allen Dargestellten Graphen lässt sich erkennen, dass das Raumschiff erst ab einer Geschwindigkeit von $11076\ \frac{m}{s}$ die Oberfläche des Monds erreichen kann. Diese Geschwindigkeit ist auch als zweite kosmische Geschwindigkeit oder Fluchtgeschwindigkeit von der Erde definiert. Die kinetische Energie des Raumschiffes ist zu Beginn hierbei groß genug um dem Gravitationsfeld der Erde zu entkommen, beziehungsweise den Punkt des Kräftegleichnisses zu erreichen.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Sollen die in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse auf die Realität bezogen werden, so ist relativ bald festzustellen, dass diese nicht in der echten Raumfahrt anwendbar sind. Es handelt sich um vereinfachte Berechnungen, welche selbstverständlich nicht verlässlich und detailliert genug sind um ein reales Raumfahrtprogramm darauf zu basieren, welches sehr schnell mehrere hundert Millionen US-Dollar kosten kann.

Außerdem findet in der hier realisierten Form kein Bremsvorgang statt, die Rakete würde also unkontrolliert mit mindestens rund 2 Kilometern pro Sekunde auf den Mond, beziehungsweise mit bis zu 11 Kilometern pro Sekunde auf die Erde stürzen. Aufgrund der fehlenden Atmosphäre des Erdtrabanten ist jedoch kein Bremsen durch Fallschirme oder ähnliche Varianten Widerstand durch die Luft zu erzeugen möglich, sondern es muss auf Bremsraketen zurückgegriffen werden, welche durch ihren Rückstoß auch im Vakuum wirken. Ein möglicher Lösungsansatz hierfür wäre, eine Abfrage laufen zu lassen, ob das Raumschiff den Lagrange Punkt erreicht hat. Wird diese Abfrage bestätigt, so ist bekannt, dass das Raumschiff ab diesem Punkt positiv beschleunigt wird. Der einfachste Ansatz dieser Beschleunigung entgegenzuwirken ist ihren Wert umzukehren, die Raketen mit exakt dieser Stärke zu betreiben und in jedem Intervall die Triebwerke neu einzustellen. Hierdurch wird zwar verhindert, dass die Geschwindigkeit wieder erhöht wird, jedoch wird nichts gegen die bereits vorhandene Geschwindigkeit am Punkt L_1 getan. Hierfür lässt sich jedoch eine ebenso einfache Lösung finden. Der Lagrange Punkt ist dadurch, dass Erde und Mond sich in der Simulation nicht bewegen ein fest definierter Punkt. Es sind also die Geschwindigkeit am Punkt L_1, und die Entfernung zur Mondoberfläche bekannt. Soll nun eine gleichmäßige Beschleunigung auf das Raumschiff einwirken, welche so ausgelegt wird, dass das Raumschiff exakt auf der Oberfläche eine Geschwindigkeit von $0\ \frac{m}{s}$ hat, so lässt sich dies mit folgender Formel berechnen:

$$a = \frac{v^2}{s}$$

Außerdem kann die Simulation realistischer gestaltet werden, indem eine zwei-, beziehungsweise auch dreidimensionale Flugbahn berechnet wird.

Wird ein Augenmerk auf die verstrichene Zeit gelegt, so fällt auf, dass zum Beispiel bei einer Startgeschwindigkeit von $11076\ \frac{m}{s}$ ein Flug über 650000 Sekunden, also über sieben Tage dauert. In dieser Zeit hat der Mond jedoch schon rund ein Viertel seiner Umlaufbahn um die Erde zurückgelegt und das Raumschiff würde im unglücklichsten Fall für immer in die ewigen Weiten des Weltalls verloren gehen.

Trotz aller Einschnitte im Vergleich zum realen Mondflug gibt diese Arbeit einen guten Einblick in die grundlegenden physikalischen Vorgänge beim ins All schicken einer Rakete. Es ist beeindruckend, mit was für einer aus heutiger Sicht extrem veralteten technischen Grundlage und winziger Rechenkapazität möglich war. Mit gerade einmal 4 Kilobyte Arbeitsspeicher und einem 1024 MHz Prozessor[4] wurden zwei Menschen zum Mond und wieder zurück auf die Erde geflogen. Auch wenn der „Wettlauf zum Mond“ dieses Jahr bereits sein 50. Jubiläum feiert ist der „Wettlauf ins All“ noch nicht entschieden. Das nächste Ziel in diesem inzwischen mehr partnerschaftlichen Wettkampf ist der Mars und nicht nur staatliche Organisationen wie die NASA oder ESA nehmen daran teil, sondern auch private Firmen wie SpaceX von Elon Musk gewinnen immer mehr an Bedeutung.

Kommentiert [TH5]: Mir fällt hier einfach kein Wort ein das besser passt…

Viele sind der Ansicht, dass ein Flug zum Mars bereits heute technisch möglich wäre, jedoch ist die momentan größte Hürde der Mensch. Auch wenn es vielleicht noch nicht zu 100 Prozent stimmen mag, beschreibt dieses Zitat den heutigen Entwicklungsstand der Raumfahrt somit sehr treffend:

,,We've mastered the art of controlled explosion” [5]

Quellen

[1] Langzeitaufnahme eines SpaceX Falcon 9 Starts, „LONG EXPOSURE OF A FALCON 9 LAUNCH”
https://www.spacex.com/media-gallery/detail/149416/9246
(13.01.2019, 13:32 Uhr)

[2] Neil Alden Armstrong, als er als erster Mensch 1969 den Mond betrat (Übersetzt)

[3] „Das klassische Runge-Kutta-Verfahren mittelt in jedem Schritt vier Hilfssteigungen (rot)“, HilberTraum (CC BY-SA 4.0)
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7e/Runge-Kutta_slopes.svg
(05.02.2019, 16:45 Uhr)

[4] „Mondlandung: 4 Kilobyte Arbeitsspeicher brachten die ersten Menschen sicher auf den Erdtrabanten“, PC Games Hardware Online
http://www.pcgameshardware.de/Hardware-Thema-130320/News/Mondlandung-4-Kilobyte-Arbeitsspeicher-brachten-die-ersten-Menschen-sicher-auf-den-Erdtrabanten-1079789/
(10.02.2019, 21:18 Uhr)

[5] YouTube Kommentar unter dem Video „Raptor Rocket Engine Test, February 2019” des Kanals „SciNews“, ElectroSalvo
https://www.youtube.com/watch?v=MAAzbjG_Duc&lc=Ugz_UEg2rQI3VW8zXBR4AaABAg
(10.02.2019, 22:20 Uhr)

TODO

- Formelzeichen überprüfen ob alle Kursiv sind!
- Fertiges Programm mit ausdrucken/dranhängen
- **EINHEITENPROBEN!!!!!!**
- „Stand: xyz“ entfernen
- Kapitel in Kopfzeile?
- Erde als Koordinatenursprung erklären