

Der tiefe Fall des 007

Eine nicht alltägliche Filmszene und trotzdem alltagsnah

Von Matthias Völker und Stephan Lück

Klasse: 8 bis 10

Schulform: Gymnasium, Realschule

Zeitungsumfang: 1 bis 2 Schulstunden

Thema: mechanische Energie(umwandlungen), Arbeit und Leistung, freier Fall, ggf. Bewegungsgleichung für eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Methode: Lehrer-Schüler-Gespräch, unter Einsatz eines Filmausschnittes und eines Computerprogramms

Mit dem fundamentalen Naturprinzip der Energieerhaltung lernen die Schülerinnen und Schüler im Physikunterricht zum ersten Mal ein Grundprinzip genauer kennen, das mehrere Teilbereiche der Physik und alle Naturwissenschaften miteinander verbindet. Unter dem Themenbereich „Energie als Erhaltungsgröße“ bespricht die Lehrkraft mit der Schulklassse üblicherweise die Energieumwandlungen beim hüpfenden Gummiball, beim Trampolinspringen oder beim freien Fall. In diesem Beitrag soll eine Filmszene aus der Eröffnungssequenz des James-Bond-Filmes GoldenEye als Motivation für eine „Freier-Fall“-Aufgabe dienen. Dabei soll – neben vielschichtigen Fragestellungen – die begeisternde Wirkung, die Filme auf die junge Generation haben, für den Unterricht genutzt werden. Filme bilden einen fest verankerten Bestandteil der Alltagswelt der Schülerinnen und Schüler. Daher bieten Filmszenen einen guten Ansatzpunkt, physikalische Konzepte und Inhalte zu illustrieren und die im Physikunterricht behandelten Themen in einen Alltagskontext einzubinden. Dabei wird die so wichtige Brücke zur Lebenswelt der Jugendlichen geschlagen.

Im Folgenden soll nur die Filmszene und ihr Einsatz im Unterricht besprochen werden. Die Szene kann am Ende der Mechanik als themenübergreifende Unterrichtseinheit behandelt werden. Hinweise zum Ablauf bzw. einen Leitfaden zur Verwendung von Filmszenen im Klassenzimmer liefert [1]. Rechtliche Fragen zum Einsatz von Filmen bzw. Filmausschnitten im Unterricht klären [2], [3] oder [4].

Filmszene

Der Film GoldenEye beginnt mit einem spektakulären Bungee-Sprung von einer sehr hohen Staumauer [5]. James Bond läuft dazu über die Staumauer (Abb. 1), befestigt in deren Mitte das mitgebrachte Bungee-Seil am Geländer und lässt sich von einer erhöhten und überstehenden (Kontroll-)Plattform 200 Meter vorwärts in die Tiefe fallen (Abb. 2 bis 5). Am tiefsten Punkt dieses Bungee-Sprungs, in dem das Bungee-

Seil maximal gedehnt ist, benutzt 007 eine spezielle Pistole, mit der er einen Haken an einem Seil herausschießt (Abb. 6). Dieser bohrt sich in die Betondecke einer Anlage am Fuß der Staumauer. Das gespannte Seil wird mittels Winde, die sich in der Pistole befindet (Abb. 7), eingezogen. Dabei wird das Bungee-Seil weiter gedehnt bis 007 das Dach erreicht hat (Abb.8). Danach geht 007 seinem Auftrag nach eine Chemiewaffenfabrik zu zerstören. Auch dieser Einsatz glückt ihm wieder.



Abb. 1: 007 läuft über die Staumauer



Abb. 2: James Bond kurz vor dem nach-vorne-Fallenlassen



Abb. 3: 007 im „freien“ Fall (kurz nach dem Fallenlassen in die Tiefe)



Abb. 4: Beginn der Seildehnung



Abb. 5: Das Fallen in der Dehnphase des Seils



Abb. 6: Abschluss des Seils mit Haken



Abb. 7: Die Seilwindenpistole



Abb. 8: Das Absenken mit Hilfe der Seilwinde in der Pistole



Abb. 9: Festhalten mit einer Hand

Aufgabenstellung und Vorgehensweise

„Alle James-Bond-Filme beziehen ihren Reiz auch aus der Tatsache, dass sich der Betrachter bei spektakulären Stunts oder technischen Tricks immer wieder die Frage stellt: Könnte das vielleicht doch irgendwie funktionieren?“ (aus: [15], S. 16). Da es sich hierbei um einen realen Bungee-Sprung handelt (siehe Kasten 1), soll es beim der Diskussion dieser Filmszene um die physikalische Analyse dieses Bungee-Sprungs gehen. Das ist auch die Besonderheit dieses Filmausschnittes: Jeder könnte diesen Bungee-Sprung selbst durchführen.

Die Untersuchung der Szene wird im Teil 1 *zuerst* immer mit einer vereinfachten Rechnung, *ohne* Berücksichtigung des Luftwiderstandes (und der Reibung im Seil) durchgeführt. Mit dem Modellbildungs- und Simulationsprogramm Newton II [16] werden dann genauere Untersuchungen angestellt. Folgende Fragen werden dabei beantwortet:

- Läuft die Filmszene in Echtzeit ab?
- Welche Geschwindigkeit besitzt 007 am Ende des (freien) Falls?
- Wie groß ist die maximale Beschleunigung, die auf 007 wirkt?
- Wie groß ist die mittlere Federhärte des Bungee-Seils?
- Wie sieht ein t-v- und ein t-a-Diagramm dieses Bewegungsablaufes aus?

Danach soll im Teil 2 noch der Filmausschnitt, der sich dem eigentlichen Sprung direkt anschließt, behandelt werden:

- Wie groß ist die Kraft, die das Bungee-Seil auf James Bond ausübt, wenn er sich am tiefsten Punkt befindet?
- Kann die Seilwinden-Pistole 007 nach unten ziehen?

Mit Hilfe dieser Fragen soll ergründet werden, ob diese Darstellung im Film in der Realität wirklich durchführbar wäre.

Beschreibung des Falls, Rechnungen und Programmeinsatz

Teil 1 – Betrachtung des Bungee-Sprungs

Alle im Folgenden verwendeten Daten für dieses eindimensionale Problem in der Vertikalen werden im Kasten 1 angegeben bzw. „hergeleitet“.

Da stimmt etwas nicht!

007 fällt zunächst die Fallstrecke L_{Seil} (nahezu) ungebremst. Die Zeit $t_{\text{freierFall}}$, die 007 frei fällt, ohne dass sich das Seil spannt, beträgt im Film 13 s. Ist James Bond wirklich so lange gefallen? 007 müsste bei dieser gleichmäßig beschleunigten

Bewegung in dieser Zeitspanne die Strecke $y_{\text{freierFall}} = \frac{1}{2} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (13 \text{ s})^2 = 829 \text{ m}$

nach unten fallen. Dies kann nicht sein, da die Höhe der Staumauer viel geringer als diese gefallene Strecke ist. Der Vergleich mit der realen Gesamt-Sprungzeit und der gesamten Sprungzeit im Film liefert die Aufklärung: Die Sprungszene wird im Film mit 4-facher Zeitlupe abgespielt.

Welche Höchstgeschwindigkeit erreicht 007 bei diesem Sprung?

Die Schüler werden mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit vermuten, dass James Bond seine Maximalgeschwindigkeit am Ende des freien Falls besitzt, da er bis dahin ungebremst fällt. Unter Benutzung der 4-fachen Verzögerung im dargestellten

Filmsprung gilt: $v_{\text{freierFallEnde}} = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{13 \text{ s}}{4} = 32 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 115 \frac{\text{km}}{\text{h}}$

Diese Geschwindigkeit kann unter Verwendung des Energieerhaltungssatzes für diesen 50-m-Fall „überprüft“ werden: $E_{\text{H,oben}} = E_{\text{kin,freierFallEnde}}; m_{007} \cdot g \cdot h_{\text{freierFall}} = \frac{1}{2} \cdot$

$m_{007} \cdot (v_{\text{freierFallEnde}})^2; v_{\text{freierFallEnde}} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{\text{freierFall}}} = 31 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 112 \frac{\text{km}}{\text{h}}$

Mit dem Programm Newton-II kann diese Geschwindigkeit am Ende des „freien Falls“ unter Berücksichtigung der Luftreibung wesentlich exakter bestimmt werden (vgl.

Kasten 2). Dabei ergibt sich: $v_{\text{freierFallEnde}} = 26,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 94,7 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ (siehe Abb. 12).

Ein Vergleich dieser Ergebnisse zeigt, dass die Luftreibung einen merklichen Einfluss auf das Fallverhalten (in der ersten Phase) hat. Dies erkennt man auch in den deutlichen Abweichungen der mit Newton-II berechneten Kurven $v(t)$ und $a(t)$ von deren Verläufen beim echten freien Fall. Dass die soeben berechnete Geschwindigkeit am Ende des „freien Falls“ nicht die Maximalgeschwindigkeit von 007 ist, kann man im $v(t)$ Diagramm der Simulation sehr gut erkennen (s. Abb. 12). Die Beschleunigung wächst hier sogar noch einmal aufgrund der veränderten Flughaltung. Zudem setzt die bremsende Wirkung des Bungee-Seils erst allmählich ein und bewirkt zunächst lediglich eine Verminderung der Beschleunigung bevor sie dann echt bremsend wirkt. Die Maximalgeschwindigkeit, die Bond erreicht lässt sich im $v(t)$ Diagramm ablesen (zweiter blau markierter Wert in Abb. 12) und beträgt:

$v_{\text{max}} = 34,8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 125,3 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Dieser Sachverhalt und auch die zuvor eventuell

fehlerhaften Vermutungen lassen sich sehr Gewinn bringend mit den Schülern diskutieren.

Welche Dehnungseigenschaft hat das verwendete Bungee-Seil?

Sobald sich das Bungee-Seil strafft, wird James Bond von diesem abgebremst, und zwar auf der Strecke h_{Dehnung} . Nach der Freifall-Phase beginnt sich das Bungee-Seil

etwa 150 m zu dehnen, bis 007 vollständig abgebremst ist. James Bond hängt „einen kurzen Moment“ nahezu bewegungslos in der Luft, knapp 10 m über der unteren Ausbuchtung der Staumauer.

Der Energieerhaltungssatz gibt an, dass sich die Höhenenergie des Springers im höchsten Punkt während der Seildehnung vollständig in Spannenergie des Bungee-Seils (im tiefsten Punkt) umwandelt: $E_{H,oben} = E_{span,unten}$

Einsetzen der Energiebeziehungen ergibt: $m_{007} \cdot g \cdot h_{Sprung} = \frac{1}{2} \cdot \dot{D} \cdot (h_{Dehnung})^2$

Für die mittlere Federhärte \dot{D} erhält man nach auflösen: $\dot{D} =$

$$\frac{2 \cdot m_{007} \cdot g \cdot h_{Sprung}}{(h_{Dehnung})^2} = 13 \frac{N}{m}$$

Diese Rechnung erfolgte unter den beiden Vereinfachungen:

- Die Masse des Seils und die Masse der Fußgurte werden bei dieser Rechnung (gegenüber der Masse von 007) vernachlässigt.
- Ein Bungee-Seil ist ein dickes, elastisches Seil. Es besteht aus einer großen Anzahl von Gummifäden aus Latex (ca. 1000 bis 2000 Stück). Aufgrund des Materials folgt, dass das Dehnungsverhalten des Seils nicht dem Gesetz von Hooke folgt. Für die Dehnung des Bungee-Seils wurde im betrachteten Bereich ein lineares Dehnungsverhalten, mit einer mittleren Federkonstante, angenommen. Diese Annahme erfolgt unter der Berücksichtigung, dass beim Bungee-Sprung enorme Sicherheitsvorkehrungen beachtet werden: der Belastungsbereich beim Sprung sollte weit entfernt von der Zerreißgrenze und damit entfernt vom nicht-linearen Bereich liegen. Fig. 8 und 9 in [18] zeigt, dass es sich bei dieser Annahme um eine gute Näherung handelt.

Wie groß ist die maximale Beschleunigung, der James Bond während dieses Sprungs ausgesetzt ist?

Diese Frage soll schrittweise beantwortet werden:

Zuerst wird die (maximale) Seilkraft berechnet, die auf 007 wirkt, wenn er am Ende des „Sprungs“ ganz unten zum Stillstand kommt.

Nach der Fallstrecke $h_{freierFall}$ beginnt sich das Seil zu dehnen. Bis h_{Sprung} wirkt daher außer der Gewichtskraft auch noch die vertikal nach oben wirkende Spannkraft des Bungee-Seils. Diese rücktreibende Kraft wächst (gemäß der Annahme oben) linear mit der Dehnung des Seils. Die Kraft ist im tiefsten Punkt am größten.

Die Bremskraft des Bungee-Seils am Ende der Dehnungsphase, in der das Seil um 150 m gedehnt wurde, beträgt: $F_{Brems,SprungEnde} = F_{Brems,max} = \dot{D} \cdot h_{Dehnung} =$

$$\frac{2 \cdot m_{007} \cdot g \cdot h_{Sprung}}{(h_{Dehnung})^2} \cdot h_{Dehnung} = \frac{2 \cdot m_{007} \cdot g \cdot \left(\frac{4}{3} \cdot h_{Dehnung}\right)}{h_{Dehnung}} = \frac{8 \cdot m_{007} \cdot g}{3} = \frac{8}{3} \cdot F_{G,007} = 2,7$$

• $F_{G,007}$

Der Betrag der auf 007 wirkenden Gesamtkraft ist dann: $F_{Ges} = F_{Brems,Seil} - F_{G,007} = 1,7 \cdot F_{G,007}$. Diese Kraft wirkt vertikal nach oben.

Die resultierende Beschleunigung, die auf 007 am Ende des Sprungs wirkt, beträgt damit $a_{Brems,SprungEnde} = 1,7 \cdot g$. Zum Vergleich: Auf der Achterbahn Silverstar im Europa-Park herrschen Vertikal-Beschleunigungen von bis zu 4 g (vgl. [19] und [20]). Der Bremsvorgang des Seils stellt also keine hohe Belastung für den Bungee-Springer dar.

Dieses Ergebnis kann mit dem Ergebnis der exakteren Simulation mit Newton-II verglichen werden: Der Maximalwert der Kurve im $a(t)$ Diagramm findet sich an der

Stelle, bei der die Geschwindigkeit Null ist (s. Abbildung 12) und beträgt:

$$a_{\max} = 13,9 \frac{m}{s^2} = 1,4 \cdot g.$$

Der Unterschied ist dadurch erklärbar, dass James Bond aufgrund der durch die Luftreibung hervorgerufenen „Energieverluste“ nicht so tief fällt.

Teil 2 – Seilwinden-Phase

Im Gegensatz zum normalen Bungee-Sprung wird der Springer hier, nachdem er im tiefsten Punkt vollständig zur Ruhe gekommen ist, nicht vom gespannten Seil nach oben geschleudert. Es kommt in der Filmszene nicht zum Rebound.

Am Ende der Dehnung des Bungee-Seils werden von 007 die letzten 7 Meter mit Hilfe einer Pistolen-Seilwinde überbrückt. Ob dies tatsächlich möglich ist, soll nun untersucht werden. Es stellen sich folgende Fragen:

Kann man eine solche „kleine“ Pistole bauen, deren Akku leistungsstark genug ist, das durch den Sprung gedehnte Bungee-Seil weiter zu dehnen?

Zur Berechnung der elektrischen Leistung des Akkus der Pistole benötigt man die Zeitdauer $t_{\text{Seilwinde}}$ und die Arbeit der Pistole (Seilwinde) $W_{\text{Seilwinde}}$ für diesen Seilwindenvorgang. $t_{\text{Seilwinde}}$ kann man dem Film entnehmen, $W_{\text{Seilwinde}}$ wird nun berechnet.

Für das Absenken mittels Seilwinde muss 007 zusätzliche Spannarbeit für die weitere Seildehnung aufwenden. Einen Teil davon bringt er in Form von Hubarbeit auf (Absenkung um 7 m), die restliche Arbeit muss von der Seilwinde der Pistole aufgebracht werden.

$$\begin{aligned} W_{\text{Seilwinde}} &= \Delta E_{\text{Span, Seilwindenphase}} - \Delta E_{\text{H, Absenkung}} \\ &= (E_{\text{Span, Ende Seilwindenphase}} - E_{\text{Span, Anfang Seilwindenphase}}) - \Delta E_{\text{H, Absenkung}} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \dot{D} \cdot (h_{\text{Dehnung}} + h_{\text{Seilwinde}})^2 - \frac{1}{2} \cdot \dot{D} \cdot (h_{\text{Dehnung}})^2 - m_{007} \cdot g \cdot h_{\text{Seilwinde}} \\ &= 8,7 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Der Akku zur Energieversorgung der Seilwinde in der Pistole muss für diesen Absenkvorgang eine Gesamtenergie von 8,7 kJ liefern (vereinfacht wird hier ein Wirkungsgrad von $\eta = 1$ der Winde angenommen). Da ein gewöhnlicher Lithium-Ionen-Akkumulator der Masse 1 kg 432 kJ bis 756 kJ an elektrischer Energie speichern kann [23], kann ein leichter (kleiner) Akku diese Energie unproblematisch bereitstellen.

Diese berechnete elektrische Arbeit muss innerhalb von 10 s, während sich James Bond nach unten zieht, verfügbar sein. Kann ein solcher Akku auch die erforderliche Leistung liefern? Der kleine Elektrowindenmotor muss eine elektrische Leistung von

$$P_{\text{el}} = \frac{W_{\text{Seilwinde}}}{t_{\text{Seilwinde}}} = 870 \text{ W} \quad \text{besitzen, was vom Hause Q bewerkstelligt werden kann}$$

(zum Vergleich: die Leistung eines guten Föns oder eines Staubsaugermotors beträgt üblicherweise 2200 W).

Kann Bond sich tatsächlich am Ende mit einer Hand an dem Griff (vgl. Abb 9) festhalten?

007 muss mit der Haltekraft, mit der er sich festhält, die oben berechnete Gesamtkraft von ca. $2 \cdot F_{\text{G,007}}$ kompensieren. Hinzu kommt die noch zusätzlich gegen die Bungee-Seilspannung aufzubringende Kraft für die restlichen 7 Meter. Dies kann damit verglichen werden, dass er eine Masse von etwa 150 kg hält, und zwar nur mit einer Hand. Das doppelte Körpergewicht kann auch ein gut trainierter Mensch, wie es Bond ja bekanntlich ist, nur sehr kurze Zeit mit Händen halten. Mit einer Hand wird es sehr unwahrscheinlich. Hinzu kommt, dass er sich vorher ja noch mit der Seilwinde eine Zeitlang heranziehen muss. Insgesamt lässt dies den zweiten Teil der Szene als nicht so realistisch erscheinen.

Schlussbemerkung

Mit Mitteln der Physik lassen sich verschiedene, interessante Fragestellungen dieser Filmszene beantworten. Im vorliegenden Artikel wurde zudem geklärt, dass es sich bei dieser Filmszene um eine Darstellung handelt, die in Wirklichkeit im ersten Teil tatsächlich so hätte ablaufen können. Im zweiten Teil zeigt sich jedoch, dass Bond über Kräfte verfügen müsste, die selbst gut trainierte Athleten nur schwer aufbringen können, was diesen Teil der Szene unrealistischer macht.

Didaktischer Hinweis zum Einsatz von Newton-II:

Bei der Komplexität des gesamten Problems empfiehlt es sich die Simulation mit dem Berechnungsprogramm Newton-II nicht gleich auf einmal und vorgefertigt den Schülern zu präsentieren. Es hat sich in eigenen Unterrichtsstunden gezeigt, dass es günstig ist, zunächst den freien Fall erst ohne und dann mit Luftreibung über das Programm zu simulieren. Dadurch werden die Schüler mit dem Programm und auch mit den dort auftretenden Ergebnissen und Effekten vertraut gemacht. Im Programm sind hierzu schon vorgefertigte Beispiele abrufbar. Ein Einsatz schon vorher im Regelunterricht ist sehr zu empfehlen. Nach diesen Grundlagen kann das Bond-Problem mit dem zweiteiligen Fallprozess zügiger angegangen werden. Mit dieser Staffelung hin zu größerer Komplexität kann auch der physikalische Modellierungsprozess sehr schön verdeutlicht werden.

Quellen für ähnliche Aufgaben:

- Weitere Filmszenen in James-Bond-Filmen werden in [15] diskutiert und auf Realitätsnähe geprüft – dabei wird auch deren physikalischer Sachverhalt durchgerechnet.
- [25] ist als Ideenpool empfehlenswert und liefert für den Einsatz im Physikunterricht eine Fülle von Filmszenen, deren Physik zum Großteil auch per Rechnung untersucht wird.

Literatur

- [1] Oberhummer, H.: Verwendung von Science-Fiction-Filmen im Physikunterricht. In: PdN Physik in der Schule, 59 (2010) Heft 1, S. 12 (Ende von Abschnitt 4)
- [2] Strahl, A.; Müller, R.; Mennerich, C.; Süllow, S.: Physics made by Hollywood. In: PdN Physik in der Schule, 56 (2007) Heft 7, S. 15/16 (Abschnitt 1.3)
- [3] Sniezyk, J.; Jonas-Ahrend, G.: Physik bei C.S.I. In: PdN Physik in der Schule, 57 (2008) Heft 5, S. 18 (Abschnitt 4)
- [4] <http://www.lehrer-online.de/urheberrecht-schulschranken.php>, Stand: 6/2010
- [5] GoldenEye, DVD – Special 007 Edition, Metro Goldwyn Mayer / LLC und United Artists Corporation, Danjaq, 1995, FSK 16 (Film), Kapitel 1; Sprungszene: 0:00:33 bis 0:02:13, FSK 0 (Filmszene); Hinweis: es gibt auch eine gekürzte Fassung des Films mit FSK 12
- [6] Tesche, S.: Das große James Bond Buch. Berlin: Henschel Verlag, 1999
- [7] http://de.wikipedia.org/wiki/Lago_di_Vogorno, Stand: 6/2010
- [8] Booklet zur GoldenEye-DVD, Special 007 Edition, Metro Goldwyn Mayer / LLC und United Artists Corporation, Danjaq, 1995, S. 5
- [9] http://www.swissdams.ch/Dams/damForm/default_d.asp?ID=4, Stand: 6/2010
- [10] http://www.talsperren.net/Wissenswertes/Bauweise_von_Stauwerken/bauweise_von_stauwerken.html, Stand: 6/2010
- [11] Information/en von Draganits Anton, verantwortlicher Jump Master für die Sprunganlage auf der Verzasca-Staumauer und Leiter der Fachgruppe „Bungy-Jumping der Swiss Outdoor Association“, tessin@trekking.ch
- [12] http://www.trekking.ch/deu/bungy/info_007.asp, Stand 6/2010
- [13] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Verzasca_Bungee.JPG, Stand 7/2010
- [14] <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Staumauer-verzasca.jpg>, Stand: 7/2010
- [15] Tolan, M.; Stolze, J.: Geschüttelt, nicht gerührt. München: Piper Verlag, 2008
- [16] <http://www.newton2.slueck.de>
- [17] Müller, R.: Klassische Mechanik. Berlin: de Gruyter, 2009, S. 38 – 42
- [18] Menz, P. G.: The Physics of Bungee Jumping. In: The Physics Teacher, Vol. 31 (1993) Nr. 8, S. 483 – 487; eine gekürzte Fassung ist unter <http://www.bungee.com/bzapp/press/pt.html> erhältlich
- [19] g-Werte in Natur, Technik und Alltag, <http://de.wikipedia.org/wiki/G-Faktor>
- [20] <http://de.wikipedia.org/wiki/Europa-Park>
- [21] Heck, A.; Uylings, P.; Kedzierska E.: Understanding the physics of bungee jumping. In: Physics Education, 45 (2010) 1, S. 63 – 72; auch erhältlich unter: http://seniorphysics.com/physics/bungee_physics.pdf
- [22] Martin, T.; Martin, J.: The physics of bungee jumping. In: Physics Education, 29 (1994) 4, S. 247 – 248
- [23] <http://de.wikipedia.org/wiki/Akkumulator>
- [24] Impressionen vom „007-Sprung“
http://clienti.tio.ch/img_articoli/p_20031010_213802_111_1165.jpg,
http://clienti.tio.ch/img_articoli/p_20031010_214047_115_1555.jpg
- [25] http://www.cisci.net/movies.php?display=5&seq_id=42&lang=2
- [26] <http://de.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6mungswiderstandskoeffizient>
- [27] http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Weltrekorde_im_Gewichtheben (jeweils Stand 7/2010)

(Kasten 1)

Hintergrundinformation zur Filmszene:

Noch zur Zeit des kalten Krieges hat 007 den Auftrag zusammen mit seinem Kollegen 006 eine sowjetische Nerven- bzw. Giftgasfabrik in Sibirien zu zerstören. Diese Chemiewaffenfabrik sowie die Staumauer befinden sich im Film in Archangelsk (im Film noch UdSSR). Gedreht wurde die Szene des Bungee-Sprungs aber an der Contra-Staumauer in Verzasca am Lago di Vogorno im Bezirk Locarno (Kanton Tessin im Süden) der Schweiz – vgl. [15], S. 37 und [7].

Die Höhe der Contra-Staumauer beträgt 220 m [9], es handelt sich um eine Bogenstaumauer [10]. Die Größe und Höhe der Staumauer ist am Anfang der Eröffnungssequenz des Films mehrmals eindrucksvoll zu sehen. Eine Falllinie vom oberen Kronenrand in der Mitte der Mauer würde ziemlich genau den unteren Rand des Fußes der Mauer treffen [11].

Der Stuntman Wayne Michaels brach im Dreh der Bungee-Sprungszene für den GoldenEye-Film mit seinem 210-Meter-Sprung den Weltrekord im Bungee-Springen von einem unbeweglichen Objekt [8].

Dieser Bungee-Sprung – natürlich mit anschließendem Ausschwingen – kann von jeder Mutigen und jedem Mutigen an der Contra-Staumauer selbst durchgeführt werden. Dort ist nach dem Dreh eine kommerzielle Bungee-Sprunganlage installiert worden [12]. Dabei beträgt die Sprunghöhe 220 m, die Sprungtiefe ca. 180 m [11]. Die Absprunghöhe [13] ist ca. 4 m vom oberen Rand entfernt, der Sprung wird parallel zur Mauer ausgeführt [11].

Daten zum Filmsprung:

Aufgrund des bekannten Drehortes sind die Daten des Sprungs ziemlich genau bekannt. Einige Höhen müssen dennoch anhand der Filmeinstellungen geschätzt werden. Die Zeiten während des Falls im Film werden mittels Timer am DVD-Player oder der DVD-Abspielsoftware unter Verwendung der Pausen-Taste exakt bestimmt.

Sprunghöhe: 220 m + 3 m
incl. der geschätzten Höhe der „Sprungplattform“ im Film, vgl. [5], 0:01:05

Sprungtiefe: $h_{\text{Sprung}} = 200 \text{ m}$
Die Höhe der Anlage am Fuß der Staumauer kann mit der Größe des Stuntmans (ca. 1,80 m) bei [5], 0:01:15 und 0:02:09 abgeschätzt werden. Eine Abschätzung unter Verwendung der Staumauerhöhe und [14] präzisiert diesen Wert. Als Höhe ergibt sich damit ca. 18 m.
Die Höhendifferenz, die 007 am Ende des Sprungs mit Hilfe der Seilwinden-Pistole zurückgelegt, wird auf 7 m geschätzt (vgl. [5], ca. bei 0:02:03).

Es gilt: $h_{\text{Sprung}} = L_{\text{Seil}} + h_{\text{Dehnung}}$

Strecke der „Freifall“-Phase zu Beginn, in der das Seil noch locker am Springer hängt:

$$h_{\text{freierFall}} = L_{\text{Seil}} = 50 \text{ m}$$

Falltiefe der Seildehnphase am Ende des Falls:

$$h_{\text{Dehnung}} = 150 \text{ m}$$

Bungee-Sprungseile sind so konzipiert, dass sie beim Fallen um ca. 250 % bis 350 % gedehnt werden, d. h. im tiefsten Punkt sind sie auf etwa die ca. 3,5- bis 4,5-fache Länge gedehnt [11]. (Diese große Dehnung ist notwendig, um die Belastung des Springers während der Dehnungsphase des Seils so gering wie möglich zu halten.) Für eine Vereinfachung der Rechnung wird eine Gesamtdehnung auf die 4-fache Länge angenommen.

In der Sprungszene (vgl. [5], 0:01:41) ist zu sehen, dass am Ende des dehnbaren Bungee-Seils ein festes Seil von einem guten halben Meter angebracht ist. Üblicherweise ist das Bungee-Seil auch am Anfang über ein festes (Draht-)Seil an bzw. über der Absprungplattform befestigt. Dieses starre Seil soll verhindern, dass das Bungee-Seil an der Plattform o. ä. im Absprungbereich reibt oder scheuert. Es kann oft auch variabel verlängert werden (gewöhnlich von 2 bis 6 m), um die Absprunghöhe individuell einzustellen (siehe auch [24]). Zur Bestimmung von L_{Seil} und h_{Dehnung} werden diese nicht-dehnbaren Seile nicht berücksichtigt: Die Länge des festen Seils am Ende ist vernachlässigbar, der feste Seilanfang ist im Film überhaupt nicht zu sehen.

| | |
|--|---|
| Dauer des Filmsprungs, mit lockerem Seil: | $t_{\text{freierFall}} = 13 \text{ s},$ vgl. [5], 0:01:35 bis 0:01:48 |
| Dauer des gesamten Filmsprungs (vom höchsten bis zum tiefsten Punkt): | $t_{\text{ges}} = 27 \text{ s},$ vgl. [5], 0:01:35 bis 0:02:02 <i>Hierbei wird vereinfacht angenommen dass der Sprung im Film komplett gezeigt wird. Vgl. aber [15], S. 38/39</i> |
| Dauer des Heranziehens mit der Seilwinde: | $t_{\text{Seilwinde}} = 10 \text{ s},$ vgl. [5], 0:02:03 bis 0:02:13 |
| Höhenunterschied des Absenkevorgangs mit der Seilwinde (am Schluss): | $h_{\text{Seilwinde}} = 7 \text{ m},$ vgl. [5], ca. bei 0:02:03 |
| Zeitdauer des gesamten, <i>realen</i> Sprungs (vom höchsten bis zum tiefsten Punkt): | ca. 6,5 s Angabe vom Veranstalter [11] |
| Masse von James Bond: | $m_{007} = 76 \text{ kg},$ |
| Masse von James Bond: | $l_{007} = 1,83 \text{ m},$ vgl. [6], S. 16 |

(Kasten 2)

Information zur Simulation des Bungee-Sprungs mit dem Programm Newton-II

Das Programm Newton-II berechnet nach Eingabe des Beschleunigungsterms und der Startbedingungen den Bewegungsverlauf und gibt das Ergebnis in einem Diagramm und einer Tabelle aus. Im Folgenden werden die notwendigen Eingaben für die Simulation des im Artikel behandelten Bungee-Sprungs von James Bond beschrieben.

Die Beschleunigung ist gemäß des zweiten Newton'schen Gesetzes durch $a = \frac{F}{m}$

gegeben, wobei F die resultierende Gesamtkraft angibt. Diese setzt sich im vorliegenden Fall aus der Gewichtskraft, der Luftreibungskraft und der Seilkraft

zusammen. Also wird im Feld für die Beschleunigung der Term $\frac{F_g + F_r + F_s}{m}$

eingegeben (siehe Abb. 10). Nun müssen die einzelnen Variablen im sich darunter befindlichen Feld definiert werden. Für die Gewichtskraft ist zu beachten, dass sie negativ ist, da sie nach unten gerichtet ist und das Koordinatensystem von unten nach oben verläuft. Die Luftreibungskraft F_r ist Geschwindigkeitsabhängig und berechnet sich durch $F_r = 0,5 \cdot c_w \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$, wobei c_w der Widerstandsbeiwert, ρ die Luftdichte, A die Querschnittsfläche des umströmten Körpers und v die Geschwindigkeit des Körpers darstellt. Danach werden, wie in Abb. 10 ersichtlich, die Konstanten festgelegt. Die Masse m von James Bond, sowie die Absprunghöhe H und die Seillänge L sind in Kasten 1 besprochen. Die als konstant angenommene Federhärte für das Bungee-Seil wird in Teil 1 des Artikels zu 13 N/kg

berechnet. Die Luftdichte wird über $\rho(H) = \frac{p_0 \cdot e^{H/7990 \text{ m}}}{R \cdot T}$ mit dem Luftdruck

$p_0 = 1030 \text{ hPa}$ (schönes Wetter), $H = 600 \text{ m}$ (ungefähre Höhe des Staudamms [7]), der Temperatur $T = 293 \text{ K}$ (20°C) und der Gaskonstanten R zu $\rho = 1,13 \text{ kg/m}^3$ bestimmt.

$a = (F_g + F_r + F_s) / m$

Definitionen (Variablen: t,s,v):

$F_g = -m \cdot g$
 $F_r = 0,5 \cdot c_w \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$
 $m = 76; g = 9,81$
 $\rho = 1,13; D = 13$
 $H = 223; L = 50$

$s(tA) = H$ $v(tA) = 0$
 $tA = 0$ $\Delta t = 0,1$
 $tE = tA + 10$

☐ nur jeden ten Wert verwenden
☐ die ersten Werte auslassen
☒ Abbrechen, wenn:

Abb. 10: Eingabe der Gleichungen und der Parameter, sowie der Startwerte und Abbruchbedingung

Nun fehlen noch die Angaben zur Seilkraft, der Querschnittsfläche und des c_w -Werts. Da sich diese Werte während des Vorgangs ändern (zum Beispiel wirkt die Seilkraft

erst nach Durchfallen der Seillänge von 50 Metern), müssen diese gesondert definiert werden. Dies geschieht im Definitionsfenster für erweiterte Definitionen, das man durch Anklicken des kleinen Dreiecks im Definitionsfeld erreicht. Es öffnet sich ein Fenster, indem die erweiterten Definitionen festgelegt werden können (s. Abb. 11). Eine neue Definition kann mit dem Plussymbol unter der Definitionsliste erzeugt werden. Dann legt man den Namen fest (hier zum Beispiel: F_s) und wählt rechts daneben den Typ der Definition aus (hier: „Bedingte Variable“, da die Spannkraft erst nach Durchfallen der Länge L wirkt). Bei einer bedingten Variablen muss zunächst die Bedingung festgelegt werden. Da s den Ort beschreibt, an dem sich Bond beim Fall befindet, wirkt die Spannkraft der Feder noch nicht, wenn dieser Ort den Wert $H-L$ noch nicht unterschritten hat. Also muss im Feld für die Bedingung („wenn:“) der Term $s > H-L$ eingegeben werden. Solange diese Bedingung erfüllt ist, ist die Spannkraft 0 und danach beträgt sie nach Hook $F_s = -D \cdot \Delta x$, wobei Δx die Dehnung des Bungee-Seils beschreibt, die durch $\Delta x = s - (H-L)$ gegeben ist. In Abbildung 11 sind diese Terme in die entsprechenden Felder eingetragen.

The screenshot shows a software interface for defining variables. On the left, a table titled 'Definitionsliste:' contains three entries: 'cw' (Bedingte Var.), 'A' (Bedingte Var.), and 'Fs' (Bedingte Var.), with 'Fs' highlighted in orange. On the right, a section titled 'Fs ist festgelegt durch:' contains three input fields: 'wenn:' with the text 's > H-L', 'dann:' with 'Fs =' and a green box containing '0', and 'sonst:' with 'Fs =' and a pink box containing '- D · (s - (H-L))'.

| Name | Type |
|------|---------------|
| cw | Bedingte Var. |
| A | Bedingte Var. |
| Fs | Bedingte Var. |

Fs ist festgelegt durch:

wenn:
s > H-L

dann:
Fs =
0

sonst:
Fs =
- D · (s - (H-L))

Abb. 11: Eingabe der bedingten Variablen

Auch der cw -Wert und die Querschnittsfläche ändern sich, da Bond unmittelbar, wenn die Seilspannung wirkt, seine Fluglage von der Horizontalen in die Vertikale ändert (siehe Abb. 3,4&5). Verfahren Sie zur Eingabe des Widerstandsbeiwerts c_w und der Querschnittsfläche A ebenso wie bei der Eingabe der Spannkraft F_s . Für die Bedingung gilt immer: $s > H-L$. Für den cw -Wert wird oberhalb von $H-L$ der Wert 1,1 und unterhalb der Wert 0,8 angenommen (Vgl. [26]). Die Querschnittsfläche von Bond ist in der gezeigten Simulation in der Vertikalen als $0,45\text{ m} \cdot 1,85\text{ m}$ und in der horizontalen Fluglage als $0,2\text{ m} \cdot 0,45\text{ m}$ angenommen. Nach Eingabe aller Definitionen muss noch der Startwert für s als H definiert werden und die Abbruchbedingung $v > 0$ eingegeben werden (siehe Abb. 10), damit die Simulation beendet wird, wenn Bond den unteren Umkehrpunkt erreicht, denn dort setzt er die Pistolenseilwinde ein, die nicht in der Simulation berücksichtigt wird.

Abbildung 12 zeigt das Simulationsergebnis in den Diagrammen $s(t)$, $v(t)$ und $a(t)$, sowie einen Ausschnitt der Wertetabelle. Man erkennt (besonders im $v(t)$ und $a(t)$ Diagramm) deutlich die Abweichung vom freien Fall im ersten Teil der Bewegung (bis zum ersten blau markierten Punkt), die durch die Luftreibung hervorgerufen wird. Danach erfolgt eine kurzzeitige abrupte Beschleunigung, die durch die veränderte Fluglage hervorgerufen wird, bevor die Seilspannung groß genug wird, um den Fall

zu bremsen. Der zweite blau gezeichnete Punkt markiert die Werte zum Zeitpunkt der größten Geschwindigkeit, die im ersten Teil des Artikels beschrieben wird. Gegen Ende der Simulation lässt sich ablesen, wie weit Bond „fällt“ (unterer Umkehrpunkt bei Geschwindigkeit 0).

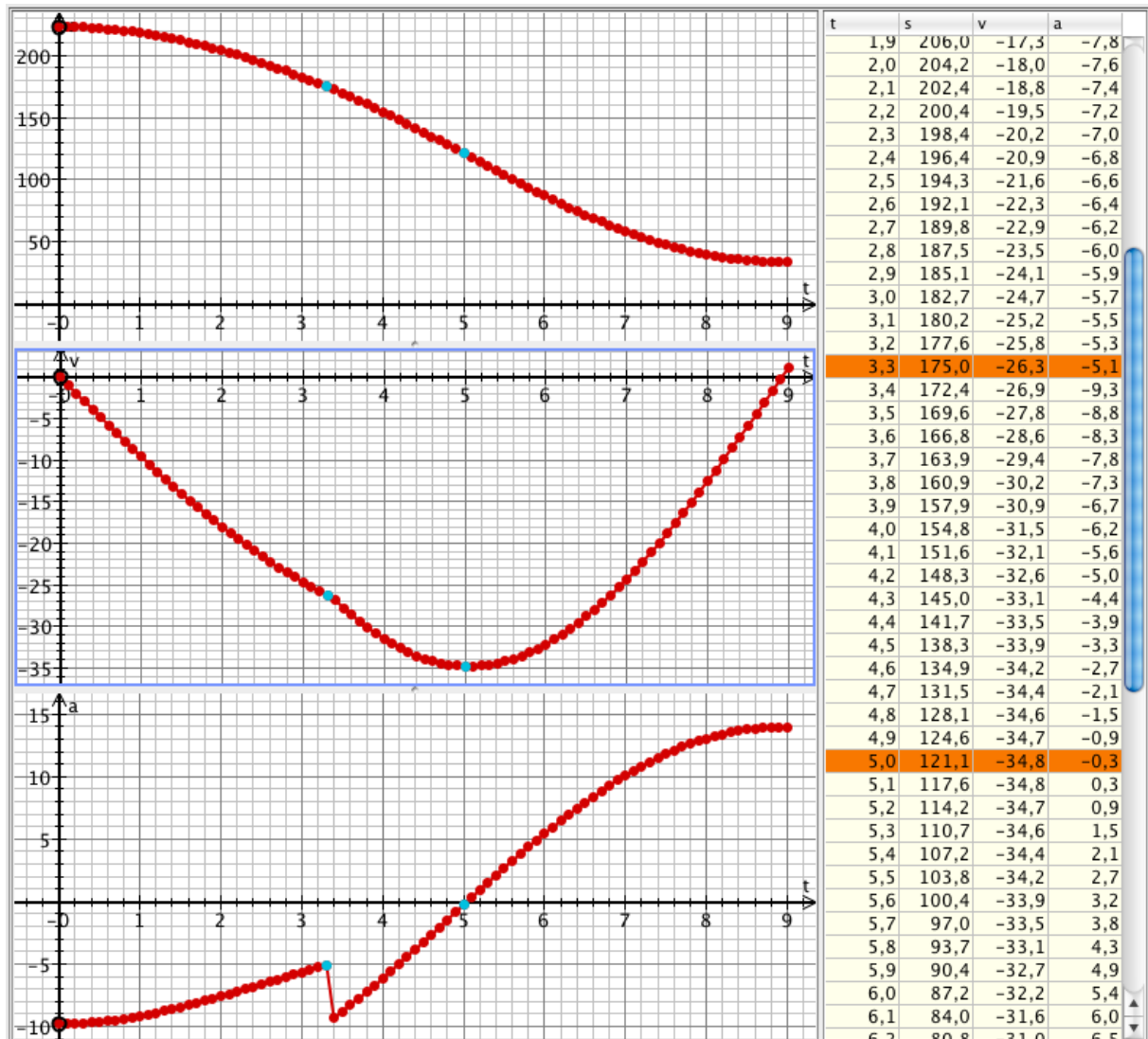


Abb. 12: Ausgabe der vom Programm berechneten Daten in Diagramm und Tabelle

Seil maximal gedehnt ist, benutzt 007 eine spezielle Pistole, mit der er einen Haken an einem Seil herausschießt (Abb. 6). Dieser bohrt sich in die Betondecke einer Anlage am Fuß der Staumauer. Das gespannte Seil wird mittels Winde, die sich in der Pistole befindet (Abb. 7), eingezogen. Dabei wird das Bungee-Seil weiter gedehnt bis 007 das Dach erreicht hat (Abb.8). Danach geht 007 seinem Auftrag nach eine Chemiewaffenfabrik zu zerstören. Auch dieser Einsatz glückt ihm wieder.



Abb. 1: 007 läuft über die Staumauer



Abb. 2: James Bond kurz vor dem nach-vorne-Fallenlassen



Abb. 3: 007 im „freien“ Fall (kurz nach dem Fallenlassen in die Tiefe)



Abb. 4: Beginn der Seildehnung



Abb. 5: Das Fallen in der Dehnphase des Seils



Abb. 6: Abschluss des Seils mit Haken



Abb. 7: Die Seilwindenpistole



Abb. 8: Das Absenken mit Hilfe der Seilwinde in der Pistole



Abb. 9: Festhalten mit einer Hand

Aufgabenstellung und Vorgehensweise

„Alle James-Bond-Filme beziehen ihren Reiz auch aus der Tatsache, dass sich der Betrachter bei spektakulären Stunts oder technischen Tricks immer wieder die Frage stellt: Könnte das vielleicht doch irgendwie funktionieren?“ (aus: [15], S. 16). Da es sich hierbei um einen realen Bungee-Sprung handelt (siehe Kasten 1), soll es beim der Diskussion dieser Filmszene um die physikalische Analyse dieses Bungee-Sprungs gehen. Das ist auch die Besonderheit dieses Filmausschnittes: Jeder könnte diesen Bungee-Sprung selbst durchführen.

Die Untersuchung der Szene wird im Teil 1 *zuerst* immer mit einer vereinfachten Rechnung, *ohne* Berücksichtigung des Luftwiderstandes (und der Reibung im Seil) durchgeführt. Mit dem Modellbildungs- und Simulationsprogramm Newton II [16] werden dann genauere Untersuchungen angestellt. Folgende Fragen werden dabei beantwortet:

- Läuft die Filmszene in Echtzeit ab?
- Welche Geschwindigkeit besitzt 007 am Ende des (freien) Falls?
- Wie groß ist die maximale Beschleunigung, die auf 007 wirkt?
- Wie groß ist die mittlere Federhärte des Bungee-Seils?
- Wie sieht ein t-v- und ein t-a-Diagramm dieses Bewegungsablaufes aus?

Danach soll im Teil 2 noch der Filmausschnitt, der sich dem eigentlichen Sprung direkt anschließt, behandelt werden:

- Wie groß ist die Kraft, die das Bungee-Seil auf James Bond ausübt, wenn er sich am tiefsten Punkt befindet?
- Kann die Seilwinden-Pistole 007 nach unten ziehen?

Mit Hilfe dieser Fragen soll ergründet werden, ob diese Darstellung im Film in der Realität wirklich durchführbar wäre.

Beschreibung des Falls, Rechnungen und Programmeinsatz

Teil 1 – Betrachtung des Bungee-Sprungs

Alle im Folgenden verwendeten Daten für dieses eindimensionale Problem in der Vertikalen werden im Kasten 1 angegeben bzw. „hergeleitet“.

Da stimmt etwas nicht!

007 fällt zunächst die Fallstrecke L_{Seil} (nahezu) ungebremst. Die Zeit $t_{\text{freierFall}}$, die 007 frei fällt, ohne dass sich das Seil spannt, beträgt im Film 13 s. Ist James Bond wirklich so lange gefallen? 007 müsste bei dieser gleichmäßig beschleunigten

Bewegung in dieser Zeitspanne die Strecke $y_{\text{freierFall}} = \frac{1}{2} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (13 \text{ s})^2 = 829 \text{ m}$

nach unten fallen. Dies kann nicht sein, da die Höhe der Staumauer viel geringer als diese gefallene Strecke ist. Der Vergleich mit der realen Gesamt-Sprungzeit und der gesamten Sprungzeit im Film liefert die Aufklärung: Die Sprungszene wird im Film mit 4-facher Zeitlupe abgespielt.

Welche Höchstgeschwindigkeit erreicht 007 bei diesem Sprung?

Die Schüler werden mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit vermuten, dass James Bond seine Maximalgeschwindigkeit am Ende des freien Falls besitzt, da er bis dahin ungebremst fällt. Unter Benutzung der 4-fachen Verzögerung im dargestellten

Filmsprung gilt: $v_{\text{freierFallEnde}} = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{13 \text{ s}}{4} = 32 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 115 \frac{\text{km}}{\text{h}}$

Diese Geschwindigkeit kann unter Verwendung des Energieerhaltungssatzes für diesen 50-m-Fall „überprüft“ werden: $E_{\text{H,oben}} = E_{\text{kin,freierFallEnde}}; m_{007} \cdot g \cdot h_{\text{freierFall}} = \frac{1}{2} \cdot$

$m_{007} \cdot (v_{\text{freierFallEnde}})^2; v_{\text{freierFallEnde}} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{\text{freierFall}}} = 31 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 112 \frac{\text{km}}{\text{h}}$

Mit dem Programm Newton-II kann diese Geschwindigkeit am Ende des „freien Falls“ unter Berücksichtigung der Luftreibung wesentlich exakter bestimmt werden (vgl.

Kasten 2). Dabei ergibt sich: $v_{\text{freierFallEnde}} = 26,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 94,7 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ (siehe Abb. 12).

Ein Vergleich dieser Ergebnisse zeigt, dass die Luftreibung einen merklichen Einfluss auf das Fallverhalten (in der ersten Phase) hat. Dies erkennt man auch in den deutlichen Abweichungen der mit Newton-II berechneten Kurven $v(t)$ und $a(t)$ von deren Verläufen beim echten freien Fall. Dass die soeben berechnete Geschwindigkeit am Ende des „freien Falls“ nicht die Maximalgeschwindigkeit von 007 ist, kann man im $v(t)$ Diagramm der Simulation sehr gut erkennen (s. Abb. 12). Die Beschleunigung wächst hier sogar noch einmal aufgrund der veränderten Flughaltung. Zudem setzt die bremsende Wirkung des Bungee-Seils erst allmählich ein und bewirkt zunächst lediglich eine Verminderung der Beschleunigung bevor sie dann echt bremsend wirkt. Die Maximalgeschwindigkeit, die Bond erreicht lässt sich im $v(t)$ Diagramm ablesen (zweiter blau markierter Wert in Abb. 12) und beträgt:

$v_{\text{max}} = 34,8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 125,3 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Dieser Sachverhalt und auch die zuvor eventuell

fehlerhaften Vermutungen lassen sich sehr Gewinn bringend mit den Schülern diskutieren.

Welche Dehnungseigenschaft hat das verwendete Bungee-Seil?

Sobald sich das Bungee-Seil strafft, wird James Bond von diesem abgebremst, und zwar auf der Strecke h_{Dehnung} . Nach der Freifall-Phase beginnt sich das Bungee-Seil

etwa 150 m zu dehnen, bis 007 vollständig abgebremst ist. James Bond hängt „einen kurzen Moment“ nahezu bewegungslos in der Luft, knapp 10 m über der unteren Ausbuchtung der Staumauer.

Der Energieerhaltungssatz gibt an, dass sich die Höhenenergie des Springers im höchsten Punkt während der Seildehnung vollständig in Spannenergie des Bungee-Seils (im tiefsten Punkt) umwandelt: $E_{H,oben} = E_{span,unten}$

Einsetzen der Energiebeziehungen ergibt: $m_{007} \cdot g \cdot h_{Sprung} = \frac{1}{2} \cdot \dot{D} \cdot (h_{Dehnung})^2$

Für die mittlere Federhärte \dot{D} erhält man nach auflösen: $\dot{D} =$

$$\frac{2 \cdot m_{007} \cdot g \cdot h_{Sprung}}{(h_{Dehnung})^2} = 13 \frac{N}{m}$$

Diese Rechnung erfolgte unter den beiden Vereinfachungen:

- Die Masse des Seils und die Masse der Fußgurte werden bei dieser Rechnung (gegenüber der Masse von 007) vernachlässigt.
- Ein Bungee-Seil ist ein dickes, elastisches Seil. Es besteht aus einer großen Anzahl von Gummifäden aus Latex (ca. 1000 bis 2000 Stück). Aufgrund des Materials folgt, dass das Dehnungsverhalten des Seils nicht dem Gesetz von Hooke folgt. Für die Dehnung des Bungee-Seils wurde im betrachteten Bereich ein lineares Dehnungsverhalten, mit einer mittleren Federkonstante, angenommen. Diese Annahme erfolgt unter der Berücksichtigung, dass beim Bungee-Sprung enorme Sicherheitsvorkehrungen beachtet werden: der Belastungsbereich beim Sprung sollte weit entfernt von der Zerreißgrenze und damit entfernt vom nicht-linearen Bereich liegen. Fig. 8 und 9 in [18] zeigt, dass es sich bei dieser Annahme um eine gute Näherung handelt.

Wie groß ist die maximale Beschleunigung, der James Bond während dieses Sprungs ausgesetzt ist?

Diese Frage soll schrittweise beantwortet werden:

Zuerst wird die (maximale) Seilkraft berechnet, die auf 007 wirkt, wenn er am Ende des „Sprungs“ ganz unten zum Stillstand kommt.

Nach der Fallstrecke $h_{freierFall}$ beginnt sich das Seil zu dehnen. Bis h_{Sprung} wirkt daher außer der Gewichtskraft auch noch die vertikal nach oben wirkende Spannkraft des Bungee-Seils. Diese rücktreibende Kraft wächst (gemäß der Annahme oben) linear mit der Dehnung des Seils. Die Kraft ist im tiefsten Punkt am größten.

Die Bremskraft des Bungee-Seils am Ende der Dehnungsphase, in der das Seil um 150 m gedehnt wurde, beträgt: $F_{Brems,SprungEnde} = F_{Brems,max} = \dot{D} \cdot h_{Dehnung} =$

$$\frac{2 \cdot m_{007} \cdot g \cdot h_{Sprung}}{(h_{Dehnung})^2} \cdot h_{Dehnung} = \frac{2 \cdot m_{007} \cdot g \cdot \left(\frac{4}{3} \cdot h_{Dehnung}\right)}{h_{Dehnung}} = \frac{8 \cdot m_{007} \cdot g}{3} = \frac{8}{3} \cdot F_{G,007} = 2,7$$

• $F_{G,007}$

Der Betrag der auf 007 wirkenden Gesamtkraft ist dann: $F_{Ges} = F_{Brems,Seil} - F_{G,007} = 1,7 \cdot F_{G,007}$. Diese Kraft wirkt vertikal nach oben.

Die resultierende Beschleunigung, die auf 007 am Ende des Sprungs wirkt, beträgt damit $a_{Brems,SprungEnde} = 1,7 \cdot g$. Zum Vergleich: Auf der Achterbahn Silverstar im Europa-Park herrschen Vertikal-Beschleunigungen von bis zu 4 g (vgl. [19] und [20]). Der Bremsvorgang des Seils stellt also keine hohe Belastung für den Bungee-Springer dar.

Dieses Ergebnis kann mit dem Ergebnis der exakteren Simulation mit Newton-II verglichen werden: Der Maximalwert der Kurve im $a(t)$ Diagramm findet sich an der

Stelle, bei der die Geschwindigkeit Null ist (s. Abbildung 12) und beträgt:

$$a_{\max} = 13,9 \frac{m}{s^2} = 1,4 \cdot g.$$

Der Unterschied ist dadurch erklärbar, dass James Bond aufgrund der durch die Luftreibung hervorgerufenen „Energieverluste“ nicht so tief fällt.

Teil 2 – Seilwinden-Phase

Im Gegensatz zum normalen Bungee-Sprung wird der Springer hier, nachdem er im tiefsten Punkt vollständig zur Ruhe gekommen ist, nicht vom gespannten Seil nach oben geschleudert. Es kommt in der Filmszene nicht zum Rebound.

Am Ende der Dehnung des Bungee-Seils werden von 007 die letzten 7 Meter mit Hilfe einer Pistolen-Seilwinde überbrückt. Ob dies tatsächlich möglich ist, soll nun untersucht werden. Es stellen sich folgende Fragen:

Kann man eine solche „kleine“ Pistole bauen, deren Akku leistungsstark genug ist, das durch den Sprung gedehnte Bungee-Seil weiter zu dehnen?

Zur Berechnung der elektrischen Leistung des Akkus der Pistole benötigt man die Zeitdauer $t_{\text{Seilwinde}}$ und die Arbeit der Pistole (Seilwinde) $W_{\text{Seilwinde}}$ für diesen Seilwindenvorgang. $t_{\text{Seilwinde}}$ kann man dem Film entnehmen, $W_{\text{Seilwinde}}$ wird nun berechnet.

Für das Absenken mittels Seilwinde muss 007 zusätzliche Spannarbeit für die weitere Seildehnung aufwenden. Einen Teil davon bringt er in Form von Hubarbeit auf (Absenkung um 7 m), die restliche Arbeit muss von der Seilwinde der Pistole aufgebracht werden.

$$\begin{aligned} W_{\text{Seilwinde}} &= \Delta E_{\text{Span, Seilwindenphase}} - \Delta E_{\text{H, Absenkung}} \\ &= (E_{\text{Span, Ende Seilwindenphase}} - E_{\text{Span, Anfang Seilwindenphase}}) - \Delta E_{\text{H, Absenkung}} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \dot{D} \cdot (h_{\text{Dehnung}} + h_{\text{Seilwinde}})^2 - \frac{1}{2} \cdot \dot{D} \cdot (h_{\text{Dehnung}})^2 - m_{007} \cdot g \cdot h_{\text{Seilwinde}} \\ &= 8,7 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Der Akku zur Energieversorgung der Seilwinde in der Pistole muss für diesen Absenkvorgang eine Gesamtenergie von 8,7 kJ liefern (vereinfacht wird hier ein Wirkungsgrad von $\eta = 1$ der Winde angenommen). Da ein gewöhnlicher Lithium-Ionen-Akkumulator der Masse 1 kg 432 kJ bis 756 kJ an elektrischer Energie speichern kann [23], kann ein leichter (kleiner) Akku diese Energie unproblematisch bereitstellen.

Diese berechnete elektrische Arbeit muss innerhalb von 10 s, während sich James Bond nach unten zieht, verfügbar sein. Kann ein solcher Akku auch die erforderliche Leistung liefern? Der kleine Elektrowindenmotor muss eine elektrische Leistung von

$$P_{\text{el}} = \frac{W_{\text{Seilwinde}}}{t_{\text{Seilwinde}}} = 870 \text{ W} \quad \text{besitzen, was vom Hause Q bewerkstelligt werden kann}$$

(zum Vergleich: die Leistung eines guten Föns oder eines Staubsaugermotors beträgt üblicherweise 2200 W).

Kann Bond sich tatsächlich am Ende mit einer Hand an dem Griff (vgl. Abb 9) festhalten?

007 muss mit der Haltekraft, mit der er sich festhält, die oben berechnete Gesamtkraft von ca. $2 \cdot F_{\text{G,007}}$ kompensieren. Hinzu kommt die noch zusätzlich gegen die Bungee-Seilspannung aufzubringende Kraft für die restlichen 7 Meter. Dies kann damit verglichen werden, dass er eine Masse von etwa 150 kg hält, und zwar nur mit einer Hand. Das doppelte Körpergewicht kann auch ein gut trainierter Mensch, wie es Bond ja bekanntlich ist, nur sehr kurze Zeit mit Händen halten. Mit einer Hand wird es sehr unwahrscheinlich. Hinzu kommt, dass er sich vorher ja noch mit der Seilwinde eine Zeitlang heranziehen muss. Insgesamt lässt dies den zweiten Teil der Szene als nicht so realistisch erscheinen.

Schlussbemerkung

Mit Mitteln der Physik lassen sich verschiedene, interessante Fragestellungen dieser Filmszene beantworten. Im vorliegenden Artikel wurde zudem geklärt, dass es sich bei dieser Filmszene um eine Darstellung handelt, die in Wirklichkeit im ersten Teil tatsächlich so hätte ablaufen können. Im zweiten Teil zeigt sich jedoch, dass Bond über Kräfte verfügen müsste, die selbst gut trainierte Athleten nur schwer aufbringen können, was diesen Teil der Szene unrealistischer macht.

Didaktischer Hinweis zum Einsatz von Newton-II:

Bei der Komplexität des gesamten Problems empfiehlt es sich die Simulation mit dem Berechnungsprogramm Newton-II nicht gleich auf einmal und vorgefertigt den Schülern zu präsentieren. Es hat sich in eigenen Unterrichtsstunden gezeigt, dass es günstig ist, zunächst den freien Fall erst ohne und dann mit Luftreibung über das Programm zu simulieren. Dadurch werden die Schüler mit dem Programm und auch mit den dort auftretenden Ergebnissen und Effekten vertraut gemacht. Im Programm sind hierzu schon vorgefertigte Beispiele abrufbar. Ein Einsatz schon vorher im Regelunterricht ist sehr zu empfehlen. Nach diesen Grundlagen kann das Bond-Problem mit dem zweiteiligen Fallprozess zügiger angegangen werden. Mit dieser Staffelung hin zu größerer Komplexität kann auch der physikalische Modellierungsprozess sehr schön verdeutlicht werden.

Quellen für ähnliche Aufgaben:

- Weitere Filmszenen in James-Bond-Filmen werden in [15] diskutiert und auf Realitätsnähe geprüft – dabei wird auch deren physikalischer Sachverhalt durchgerechnet.
- [25] ist als Ideenpool empfehlenswert und liefert für den Einsatz im Physikunterricht eine Fülle von Filmszenen, deren Physik zum Großteil auch per Rechnung untersucht wird.

Literatur

- [1] Oberhummer, H.: Verwendung von Science-Fiction-Filmen im Physikunterricht. In: PdN Physik in der Schule, 59 (2010) Heft 1, S. 12 (Ende von Abschnitt 4)
- [2] Strahl, A.; Müller, R.; Mennerich, C.; Süllow, S.: Physics made by Hollywood. In: PdN Physik in der Schule, 56 (2007) Heft 7, S. 15/16 (Abschnitt 1.3)
- [3] Sniezyk, J.; Jonas-Ahrend, G.: Physik bei C.S.I. In: PdN Physik in der Schule, 57 (2008) Heft 5, S. 18 (Abschnitt 4)
- [4] <http://www.lehrer-online.de/urheberrecht-schulschranken.php>, Stand: 6/2010
- [5] GoldenEye, DVD – Special 007 Edition, Metro Goldwyn Mayer / LLC und United Artists Corporation, Danjaq, 1995, FSK 16 (Film), Kapitel 1; Sprungszene: 0:00:33 bis 0:02:13, FSK 0 (Filmszene); Hinweis: es gibt auch eine gekürzte Fassung des Films mit FSK 12
- [6] Tesche, S.: Das große James Bond Buch. Berlin: Henschel Verlag, 1999
- [7] http://de.wikipedia.org/wiki/Lago_di_Vogorno, Stand: 6/2010
- [8] Booklet zur GoldenEye-DVD, Special 007 Edition, Metro Goldwyn Mayer / LLC und United Artists Corporation, Danjaq, 1995, S. 5
- [9] http://www.swissdams.ch/Dams/damForm/default_d.asp?ID=4, Stand: 6/2010
- [10] http://www.talsperren.net/Wissenswertes/Bauweise_von_Stauwerken/bauweise_von_stauwerken.html, Stand: 6/2010
- [11] Information/en von Draganits Anton, verantwortlicher Jump Master für die Sprunganlage auf der Verzasca-Staumauer und Leiter der Fachgruppe „Bungy-Jumping der Swiss Outdoor Association“, tessin@trekking.ch
- [12] http://www.trekking.ch/deu/bungy/info_007.asp, Stand 6/2010
- [13] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Verzasca_Bungee.JPG, Stand 7/2010
- [14] <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Staumauer-verzasca.jpg>, Stand: 7/2010
- [15] Tolan, M.; Stolze, J.: Geschüttelt, nicht gerührt. München: Piper Verlag, 2008
- [16] <http://www.newton2.slueck.de>
- [17] Müller, R.: Klassische Mechanik. Berlin: de Gruyter, 2009, S. 38 – 42
- [18] Menz, P. G.: The Physics of Bungee Jumping. In: The Physics Teacher, Vol. 31 (1993) Nr. 8, S. 483 – 487; eine gekürzte Fassung ist unter <http://www.bungee.com/bzapp/press/pt.html> erhältlich
- [19] g-Werte in Natur, Technik und Alltag, <http://de.wikipedia.org/wiki/G-Faktor>
- [20] <http://de.wikipedia.org/wiki/Europa-Park>
- [21] Heck, A.; Uylings, P.; Kedzierska E.: Understanding the physics of bungee jumping. In: Physics Education, 45 (2010) 1, S. 63 – 72; auch erhältlich unter: http://seniorphysics.com/physics/bungee_physics.pdf
- [22] Martin, T.; Martin, J.: The physics of bungee jumping. In: Physics Education, 29 (1994) 4, S. 247 – 248
- [23] <http://de.wikipedia.org/wiki/Akkumulator>
- [24] Impressionen vom „007-Sprung“
http://clienti.tio.ch/img_articoli/p_20031010_213802_111_1165.jpg,
http://clienti.tio.ch/img_articoli/p_20031010_214047_115_1555.jpg
- [25] http://www.cisci.net/movies.php?display=5&seq_id=42&lang=2
- [26] <http://de.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6mungswiderstandskoeffizient>
- [27] http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Weltrekorde_im_Gewichtheben (jeweils Stand 7/2010)

(Kasten 1)

Hintergrundinformation zur Filmszene:

Noch zur Zeit des kalten Krieges hat 007 den Auftrag zusammen mit seinem Kollegen 006 eine sowjetische Nerven- bzw. Giftgasfabrik in Sibirien zu zerstören. Diese Chemiewaffenfabrik sowie die Staumauer befinden sich im Film in Archangelsk (im Film noch UdSSR). Gedreht wurde die Szene des Bungee-Sprungs aber an der Contra-Staumauer in Verzasca am Lago di Vogorno im Bezirk Locarno (Kanton Tessin im Süden) der Schweiz – vgl. [15], S. 37 und [7].

Die Höhe der Contra-Staumauer beträgt 220 m [9], es handelt sich um eine Bogenstaumauer [10]. Die Größe und Höhe der Staumauer ist am Anfang der Eröffnungssequenz des Films mehrmals eindrucksvoll zu sehen. Eine Falllinie vom oberen Kronenrand in der Mitte der Mauer würde ziemlich genau den unteren Rand des Fußes der Mauer treffen [11].

Der Stuntman Wayne Michaels brach im Dreh der Bungee-Sprungszene für den GoldenEye-Film mit seinem 210-Meter-Sprung den Weltrekord im Bungee-Springen von einem unbeweglichen Objekt [8].

Dieser Bungee-Sprung – natürlich mit anschließendem Ausschwingen – kann von jeder Mutigen und jedem Mutigen an der Contra-Staumauer selbst durchgeführt werden. Dort ist nach dem Dreh eine kommerzielle Bungee-Sprunganlage installiert worden [12]. Dabei beträgt die Sprunghöhe 220 m, die Sprungtiefe ca. 180 m [11]. Die Absprunghöhe [13] ist ca. 4 m vom oberen Rand entfernt, der Sprung wird parallel zur Mauer ausgeführt [11].

Daten zum Filmsprung:

Aufgrund des bekannten Drehortes sind die Daten des Sprungs ziemlich genau bekannt. Einige Höhen müssen dennoch anhand der Filmeinstellungen geschätzt werden. Die Zeiten während des Falls im Film werden mittels Timer am DVD-Player oder der DVD-Abspielsoftware unter Verwendung der Pausen-Taste exakt bestimmt.

Sprunghöhe: 220 m + 3 m
incl. der geschätzten Höhe der „Sprungplattform“ im Film, vgl. [5], 0:01:05

Sprungtiefe: $h_{\text{Sprung}} = 200 \text{ m}$
Die Höhe der Anlage am Fuß der Staumauer kann mit der Größe des Stuntmans (ca. 1,80 m) bei [5], 0:01:15 und 0:02:09 abgeschätzt werden. Eine Abschätzung unter Verwendung der Staumauerhöhe und [14] präzisiert diesen Wert. Als Höhe ergibt sich damit ca. 18 m.
Die Höhendifferenz, die 007 am Ende des Sprungs mit Hilfe der Seilwinden-Pistole zurückgelegt, wird auf 7 m geschätzt (vgl. [5], ca. bei 0:02:03).

Es gilt: $h_{\text{Sprung}} = L_{\text{Seil}} + h_{\text{Dehnung}}$

Strecke der „Freifall“-Phase zu Beginn, in der das Seil noch locker am Springer hängt:

$$h_{\text{freierFall}} = L_{\text{Seil}} = 50 \text{ m}$$

Falltiefe der Seildehnphase am Ende des Falls:

$$h_{\text{Dehnung}} = 150 \text{ m}$$

Bungee-Sprungseile sind so konzipiert, dass sie beim Fallen um ca. 250 % bis 350 % gedehnt werden, d. h. im tiefsten Punkt sind sie auf etwa die ca. 3,5- bis 4,5-fache Länge gedehnt [11]. (Diese große Dehnung ist notwendig, um die Belastung des Springers während der Dehnungsphase des Seils so gering wie möglich zu halten.) Für eine Vereinfachung der Rechnung wird eine Gesamtdehnung auf die 4-fache Länge angenommen.

In der Sprungszene (vgl. [5], 0:01:41) ist zu sehen, dass am Ende des dehnbaren Bungee-Seils ein festes Seil von einem guten halben Meter angebracht ist. Üblicherweise ist das Bungee-Seil auch am Anfang über ein festes (Draht-)Seil an bzw. über der Absprungplattform befestigt. Dieses starre Seil soll verhindern, dass das Bungee-Seil an der Plattform o. ä. im Absprungbereich reibt oder scheuert. Es kann oft auch variabel verlängert werden (gewöhnlich von 2 bis 6 m), um die Absprunghöhe individuell einzustellen (siehe auch [24]). Zur Bestimmung von L_{Seil} und h_{Dehnung} werden diese nicht-dehnbaren Seile nicht berücksichtigt: Die Länge des festen Seils am Ende ist vernachlässigbar, der feste Seilanfang ist im Film überhaupt nicht zu sehen.

| | |
|--|---|
| Dauer des Filmsprungs, mit lockerem Seil: | $t_{\text{freierFall}} = 13 \text{ s},$ vgl. [5], 0:01:35 bis 0:01:48 |
| Dauer des gesamten Filmsprungs (vom höchsten bis zum tiefsten Punkt): | $t_{\text{ges}} = 27 \text{ s},$ vgl. [5], 0:01:35 bis 0:02:02 <i>Hierbei wird vereinfacht angenommen dass der Sprung im Film komplett gezeigt wird. Vgl. aber [15], S. 38/39</i> |
| Dauer des Heranziehens mit der Seilwinde: | $t_{\text{Seilwinde}} = 10 \text{ s},$ vgl. [5], 0:02:03 bis 0:02:13 |
| Höhenunterschied des Absenkevorgangs mit der Seilwinde (am Schluss): | $h_{\text{Seilwinde}} = 7 \text{ m},$ vgl. [5], ca. bei 0:02:03 |
| Zeitdauer des gesamten, <i>realen</i> Sprungs (vom höchsten bis zum tiefsten Punkt): | ca. 6,5 s Angabe vom Veranstalter [11] |
| Masse von James Bond: | $m_{007} = 76 \text{ kg},$ |
| Masse von James Bond: | $l_{007} = 1,83 \text{ m},$ vgl. [6], S. 16 |

(Kasten 2)

Information zur Simulation des Bungee-Sprungs mit dem Programm Newton-II

Das Programm Newton-II berechnet nach Eingabe des Beschleunigungsterms und der Startbedingungen den Bewegungsverlauf und gibt das Ergebnis in einem Diagramm und einer Tabelle aus. Im Folgenden werden die notwendigen Eingaben für die Simulation des im Artikel behandelten Bungee-Sprungs von James Bond beschrieben.

Die Beschleunigung ist gemäß des zweiten Newton'schen Gesetzes durch $a = \frac{F}{m}$

gegeben, wobei F die resultierende Gesamtkraft angibt. Diese setzt sich im vorliegenden Fall aus der Gewichtskraft, der Luftreibungskraft und der Seilkraft

zusammen. Also wird im Feld für die Beschleunigung der Term $\frac{F_g + F_r + F_s}{m}$

eingegeben (siehe Abb. 10). Nun müssen die einzelnen Variablen im sich darunter befindlichen Feld definiert werden. Für die Gewichtskraft ist zu beachten, dass sie negativ ist, da sie nach unten gerichtet ist und das Koordinatensystem von unten nach oben verläuft. Die Luftreibungskraft F_r ist Geschwindigkeitsabhängig und berechnet sich durch $F_r = 0,5 \cdot c_w \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$, wobei c_w der Widerstandsbeiwert, ρ die Luftdichte, A die Querschnittsfläche des umströmten Körpers und v die Geschwindigkeit des Körpers darstellt. Danach werden, wie in Abb. 10 ersichtlich, die Konstanten festgelegt. Die Masse m von James Bond, sowie die Absprunghöhe H und die Seillänge L sind in Kasten 1 besprochen. Die als konstant angenommene Federhärte für das Bungee-Seil wird in Teil 1 des Artikels zu 13 N/kg

berechnet. Die Luftdichte wird über $\rho(H) = \frac{p_0 \cdot e^{H/7990 \text{ m}}}{R \cdot T}$ mit dem Luftdruck

$p_0 = 1030 \text{ hPa}$ (schönes Wetter), $H = 600 \text{ m}$ (ungefähre Höhe des Staudamms [7]), der Temperatur $T = 293 \text{ K}$ (20°C) und der Gaskonstanten R zu $\rho = 1,13 \text{ kg/m}^3$ bestimmt.

$a = (F_g + F_r + F_s) / m$

Definitionen (Variablen: t,s,v):

$F_g = -m \cdot g$
 $F_r = 0,5 \cdot c_w \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$
 $m = 76; g = 9,81$
 $\rho = 1,13; D = 13$
 $H = 223; L = 50$

$s(tA) = H$ $v(tA) = 0$

$tA = 0$ $\Delta t = 0,1$

$tE = tA + 10$

☐ nur jeden ☐ ten Wert verwenden

☐ die ersten ☐ Werte auslassen

☒ Abbrechen, wenn: $v > 0$

Abb. 10: Eingabe der Gleichungen und der Parameter, sowie der Startwerte und Abbruchbedingung

Nun fehlen noch die Angaben zur Seilkraft, der Querschnittsfläche und des c_w -Werts. Da sich diese Werte während des Vorgangs ändern (zum Beispiel wirkt die Seilkraft

erst nach Durchfallen der Seillänge von 50 Metern), müssen diese gesondert definiert werden. Dies geschieht im Definitionsfenster für erweiterte Definitionen, das man durch Anklicken des kleinen Dreiecks im Definitionsfeld erreicht. Es öffnet sich ein Fenster, indem die erweiterten Definitionen festgelegt werden können (s. Abb. 11). Eine neue Definition kann mit dem Plussymbol unter der Definitionsliste erzeugt werden. Dann legt man den Namen fest (hier zum Beispiel: F_s) und wählt rechts daneben den Typ der Definition aus (hier: „Bedingte Variable“, da die Spannkraft erst nach Durchfallen der Länge L wirkt). Bei einer bedingten Variablen muss zunächst die Bedingung festgelegt werden. Da s den Ort beschreibt, an dem sich Bond beim Fall befindet, wirkt die Spannkraft der Feder noch nicht, wenn dieser Ort den Wert $H-L$ noch nicht unterschritten hat. Also muss im Feld für die Bedingung („wenn:“) der Term $s > H-L$ eingegeben werden. Solange diese Bedingung erfüllt ist, ist die Spannkraft 0 und danach beträgt sie nach Hook $F_s = -D \cdot \Delta x$, wobei Δx die Dehnung des Bungee-Seils beschreibt, die durch $\Delta x = s - (H-L)$ gegeben ist. In Abbildung 11 sind diese Terme in die entsprechenden Felder eingetragen.

The screenshot shows a software interface for defining variables. On the left, a table titled 'Definitionsliste:' contains three entries: 'cw' of type 'Bedingte Var.', 'A' of type 'Bedingte Var.', and 'Fs' of type 'Bedingte Var.' (highlighted in orange). On the right, a section titled 'Fs ist festgelegt durch:' contains three input fields: 'wenn:' with the value 's > H-L', 'dann:' with the value '0', and 'sonst:' with the value '- D · (s - (H-L))'.

| Name | Type |
|------|---------------|
| cw | Bedingte Var. |
| A | Bedingte Var. |
| Fs | Bedingte Var. |

Fs ist festgelegt durch:

wenn:
s > H-L

dann:
Fs =
0

sonst:
Fs =
- D · (s - (H-L))

Abb. 11: Eingabe der bedingten Variablen

Auch der cw -Wert und die Querschnittsfläche ändern sich, da Bond unmittelbar, wenn die Seilspannung wirkt, seine Fluglage von der Horizontalen in die Vertikale ändert (siehe Abb. 3,4&5). Verfahren Sie zur Eingabe des Widerstandsbeiwerts c_w und der Querschnittsfläche A ebenso wie bei der Eingabe der Spannkraft F_s . Für die Bedingung gilt immer: $s > H-L$. Für den cw -Wert wird oberhalb von $H-L$ der Wert 1,1 und unterhalb der Wert 0,8 angenommen (Vgl. [26]). Die Querschnittsfläche von Bond ist in der gezeigten Simulation in der Vertikalen als $0,45\text{ m} \cdot 1,85\text{ m}$ und in der horizontalen Fluglage als $0,2\text{ m} \cdot 0,45\text{ m}$ angenommen. Nach Eingabe aller Definitionen muss noch der Startwert für s als H definiert werden und die Abbruchbedingung $v > 0$ eingegeben werden (siehe Abb. 10), damit die Simulation beendet wird, wenn Bond den unteren Umkehrpunkt erreicht, denn dort setzt er die Pistolenseilwinde ein, die nicht in der Simulation berücksichtigt wird.

Abbildung 12 zeigt das Simulationsergebnis in den Diagrammen $s(t)$, $v(t)$ und $a(t)$, sowie einen Ausschnitt der Wertetabelle. Man erkennt (besonders im $v(t)$ und $a(t)$ Diagramm) deutlich die Abweichung vom freien Fall im ersten Teil der Bewegung (bis zum ersten blau markierten Punkt), die durch die Luftreibung hervorgerufen wird. Danach erfolgt eine kurzzeitige abrupte Beschleunigung, die durch die veränderte Fluglage hervorgerufen wird, bevor die Seilspannung groß genug wird, um den Fall

zu bremsen. Der zweite blau gezeichnete Punkt markiert die Werte zum Zeitpunkt der größten Geschwindigkeit, die im ersten Teil des Artikels beschrieben wird. Gegen Ende der Simulation lässt sich ablesen, wie weit Bond „fällt“ (unterer Umkehrpunkt bei Geschwindigkeit 0).

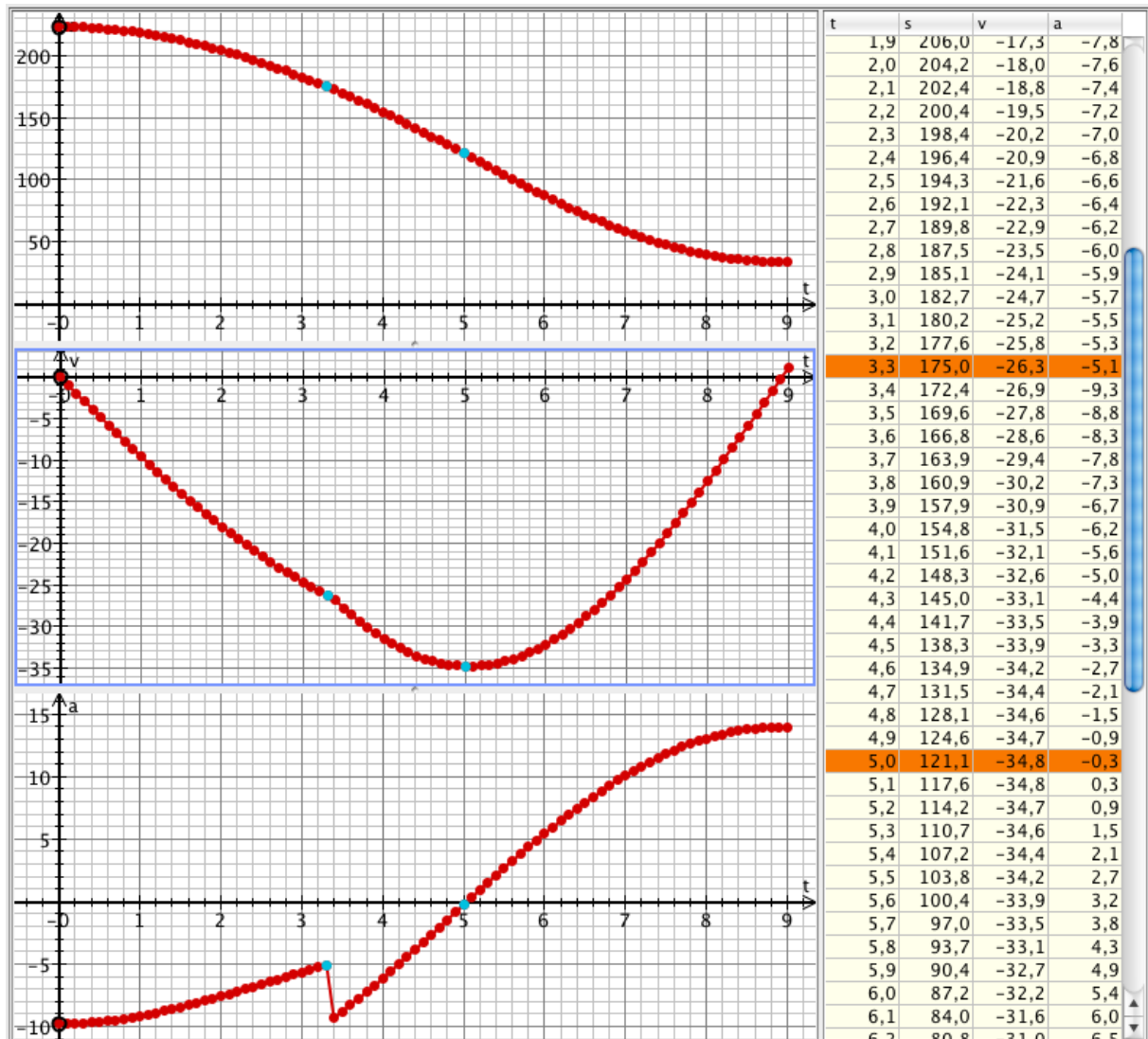


Abb. 12: Ausgabe der vom Programm berechneten Daten in Diagramm und Tabelle