

Facharbeit zum Thema

„Bau einer Box zur direkten Beobachtung physikalischer Phänomene im freien Fall“

im Fachbereich Physik [Herr Rasbach]
von Alexander Hungenberg

2008/2009 Marienschule Opladen

Dieses Werk steht unter einer Creative Commons Namensnennung - Keine kommerzielle Nutzung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 Deutschland Lizenz



Inhaltsverzeichnis

I.Vorwort.....	1
II.Theoretischer Hintergrund.....	2
Erdbeschleunigung.....	2
Berechnung von g am Beispiel Köln.....	2
Definition der Schwerelosigkeit.....	3
Der freie Fall.....	4
III.Erklärungen zum Bau.....	5
Grundsätzlicher Aufbau.....	5
Daten der gebauten Kiste.....	6
Berechnung der Fallgeschwindigkeiten.....	7
Mögliche Erweiterungen.....	8
IV.Experimente.....	9
Kerzenflamme.....	9
Wasser-Luft.....	10
Weitere Möglichkeiten.....	10
V.Literaturverzeichnis.....	11
VI.Anhang.....	11
VII.Lizenz.....	11

I. VORWORT

Die Schwerelosigkeit war seit ihrer (indirekten) Entdeckung durch Isaac Newton in seiner "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica" ein faszinierendes Phänomen, da es viele der von uns Menschen als selbstverständlich angesehenen Abläufe vollkommen verändert oder sie sogar komplett verhindert. Beispiele hierfür sind sanitäre Einrichtungen auf Raumstationen, die so wie wir sie von der Erde kennen dort nicht funktionieren würden. Zur korrekten Funktion wird hierbei eine konstante, allgemein wirkende Beschleunigung benötigt, welche in der Dusche die Wassertropfen nach unten zieht, damit diese den Schmutz mit in den Abfluss befördern. Genau diese Kraft fehlt jedoch in der Schwerelosigkeit, was ebenfalls dazu führt, dass man sich im Weltall an die Dusche anketten muss, um nicht aus ihr hinaus zu schweben. Gerade diese Kraftfreiheit macht den schwerelosen Raum nicht nur interessant für das Kind im Manne, sondern vor allem für physikalische, biologische und chemische Experimente, welche nun nicht mehr durch ständig wirkende Kräfte verhindert oder verfälscht werden.

Gerade für den biologischen Fachbereich ist es meistens von Nöten, über längere Zeit Schwerelosigkeit zur Verfügung gestellt zu bekommen, wobei man um die

Forschung auf Raumstationen nicht herum kommt, um zum Beispiel das Pflanzenwachstum zu beobachten. Physikalische Effekte stellen sich jedoch oft innert weniger Augenblicke ein, weshalb hier Weltraummissionen zur Beobachtung im Verhältnis von Aufwand zu Ergebnis deutlich zu teuer werden. Um kurzzeitig Schwerelosigkeit zu erzeugen, gibt es eine sehr viel einfachere Methode, welche sich in der vorgestellten Bauweise besonders für Schulen eignet und in etwas größerer Ausführung durchaus anspruchsvollen Forschungsinstituten genügt.

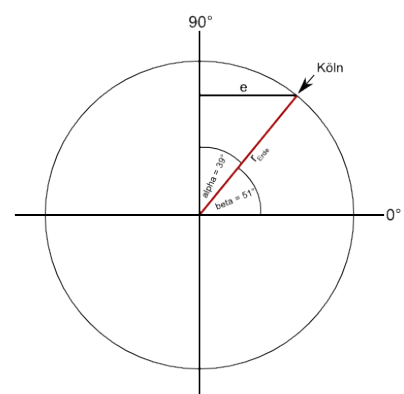
II. THEORETISCHER HINTERGRUND

Erdbeschleunigung

Bevor wir uns der Schwerelosigkeit widmen, sollte der Normalfall auf der Erde betrachtet werden. Bedingt durch die allgemeine Anziehung zweier Massen, welche durch das Newton'sche Gravitationsgesetz beschrieben werden kann, wird jedes Masseobjekt zur Erde angezogen. Teilt man die resultierende Kraft durch die Probemasse erhält man die Beschleunigung, welche unabhängig von der Masse auf das Objekt im Gravitationsfeld der Erde wirkt. Zur genauen Berechnung muss man aus der anziehenden Gravitationskraft noch die abstoßend wirkende Zentrifugalkraft herausrechnen, woraus sich erklärt, dass diese als „Ortsfaktor“ g bezeichnete Konstante Ortsabhängig ist, da die mit einwirkende Zentripetalkraft zu den Polen hin abnimmt.

Berechnung von g am Beispiel Köln

Berechnen wir zunächst die Gravitationskraft an sich auf Höhe der Erdoberfläche. Dazu benötigen wir den Erdradius r_{Erde} von $6,371 \cdot 10^6 \text{ m}$ und ihre Masse M von $5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$. Für die Gravitationskonstante G gilt der Wert $6,673 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$. Von der Gravitationskraft F_G muss nun jedoch die benötigte, vom Ort abhängende Zentripetalkraft F_Z abgezogen werden. Als Beispiel dient die



Stadt Köln welche ungefähr auf dem 51. nördl. Breitengrad liegt. Dort entspricht die Entfernung von der Erdachse dem $\sin(90^\circ - 51^\circ) \cdot r_{\text{Erde}}$. Der Winkel α ist also 90° minus den Breitengrad. Die Umlaufzeit T von 24 h entspricht umgerechnet 86400 s. Zu guter Letzt teilt man die Gesamtkraft durch die Probemasse m , um somit eine allgemeine Beschleunigung zu erhalten. In der folgenden Rechnung sind alle Einheiten SI-Einheiten.

$$\begin{aligned} \frac{F_G - F_Z}{m} &= g \\ F_G &= G \cdot \frac{m \cdot M}{r_{\text{Erde}}^2} \\ F_Z &= m \cdot \frac{4\pi^2 \cdot e}{T^2} \\ g &= G \cdot \frac{M}{r_{\text{Erde}}^2} - \frac{4\pi^2 \cdot \sin(\alpha) \cdot r_{\text{Erde}}}{T^2} \\ g &= 6,673 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{5,97 \cdot 10^{24}}{(6,371 \cdot 10^6)^2} - \frac{4\pi^2 \cdot \sin(39^\circ) \cdot 6,371 \cdot 10^6}{86400^2} \rightarrow g = 9,7935 \frac{m}{s^2} \end{aligned}$$

Definition der Schwerelosigkeit

Als Schwerelosigkeit bezeichnet man einen Raum, in welchem keine, oder im Volksmund auch annähernd keine Gravitation herrscht. Theoretisch kann dieser Raum ohne Einwirken anderer Kräfte nur an einzelnen Punkten existieren, wo die Gravitationskräfte von sämtlichen Massen exakt gegenläufig und in gleicher Stärke wirken, also durch die Kräfteaddition $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = \vec{0}$. Natürlich reichen in der Praxis oft schon sehr kleine Gravitationskräfte, welche man durch das antiproportionale Verhalten der Gravitationskraft zum Quadrat des Abstandes bereits in verhältnismäßig geringer Entfernung zur Erde findet. Schon auf der Höhe der Umlaufbahnen von geostationären Satelliten bei 42157km Entfernung vom Erdmittelpunkt herrscht nur noch eine Erdbeschleunigung von ca. $0,22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Natürlich würde selbst diese Beschleunigung noch dafür sorgen, dass Satelliten langsam aber sicher zur Erde hin beschleunigt werden, sodass man nicht lange etwas von ihnen hätte. Deutlich extremer ist dieser Effekt in der Höhe, wo sich Raumstationen wie die ISS befinden. Gerade einmal 400km über Grund wirken noch $8,73 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ Beschleunigung. Bei all diesen Anwendungen kommt jedoch noch die

Zentripetalkraft hinzu. Die ISS fliegt zum Beispiel mit einer Relativgeschwindigkeit zur Erde von rund 28000 km/h um genügend Gegenbeschleunigung zu erhalten. Innerhalb der Station herrscht also eine Beschleunigungsbilanz von Null und somit Schwerelosigkeit bzw. eine so genannte Mikrogravitation, da die Station durch eine kleine Restreibung an der Erdatmosphäre kontinuierlich an Höhe verliert.

Der freie Fall

Die oben beschriebene Methode zum Erreichen eines beschleunigungsfreien Raumes durch ausreichend Relativgeschwindigkeit ist direkt auf der Erdoberfläche nicht sonderlich praktikabel. Eine andere, sehr viel einfachere Methode zum Erreichen der Schwerelosigkeit ist, die Erdbeschleunigung einfach ungehindert wirken zu lassen.

Wir Menschen spüren unser Gewicht, da wir durch unsere Masse und die wirkende Beschleunigung eine Kraft auf die Erde ausüben, wobei diese ihrerseits eine Art rückhaltende Kraft durch Ihre Oberfläche auf uns, bzw. unsere Fußsohlen ausübt. Da wir zwar eine Kraft erfahren, aber aufgrund der als unendlich annehmbaren Gegenkraft keine Geschwindigkeitsänderung erfolgt, äußert sich dies durch einen höheren Druck in unserem Körper, der diesen durch viele Druckrezeptoren als unser Gewicht wahrnimmt.

Stellt man sich nun eine Kiste mit einer darin enthaltenen Stahlkugel vor, welcher man plötzlich den Boden wegzieht, beginnt diese mit der Beschleunigung g ihre Geschwindigkeit zu verändern. Betrachtet man die Kiste nun als abgeschlossenes System zu dem sich die Stahlkugel relativ bewegt, wirkt auf die Stahlkugel innerhalb natürlich noch die Erdbeschleunigung – aber abzüglich die Beschleunigung der Kiste selbst $a_{Stahl} = g - a_{Kiste}$. Da a_{Kiste} jedoch während dem idealisierten freien Fall im luftleeren Raum exakt der Erdbeschleunigung entspricht, ist somit die Beschleunigung innerhalb der Kiste Null und die Definition der Schwerelosigkeit wieder erreicht.

III. ERKLÄRUNGEN ZUM BAU

Grundsätzlicher Aufbau

Die grundsätzliche Idee der betitelten Fallkiste wurde ja bereits mehrere Male angedeutet. Es geht darum ein abgeschlossenes System zu bauen, wobei abgeschlossen hierbei eine räumliche Trennung von Innen und Außen meint, welche optimalerweise durch Wände die anfallende Luftströmung von dem Experiment im Inneren abhält, wenn man keinen Vakuum-Fallturm zur Verfügung hat.

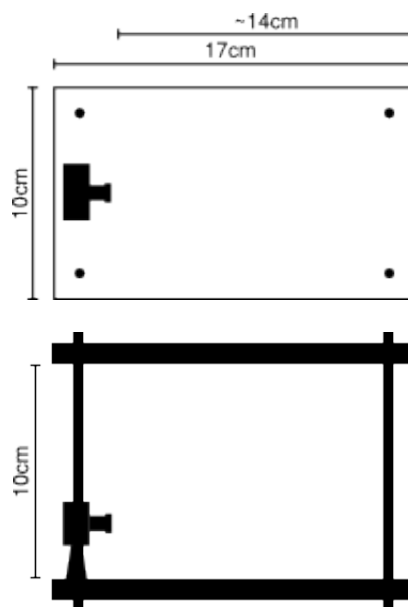
Sofern die Experimente während der Phase der Schwerelosigkeit beobachtet werden müssen, was bei einem Großteil der Fall sein sollte, bietet es sich an, in der Fallkiste eine Kamera zu installieren, welche Ihre Bilder per Funk an einen Empfänger außerhalb schickt oder lokal zur späteren Auswertung speichert. Obwohl es hierbei natürlich möglich wäre die empfangenen Bilder direkt während dem Fall auf einem Monitor anzusehen, ist dies aufgrund der kurzen Fallzeiten (welche bei typischen Fallhöhen nur einige Frames lang sind) praktisch unmöglich. Hier empfiehlt sich eine digitale Aufzeichnung der Videos, um sie nachher Frame für Frame betrachten zu können.

Bei der Auswahl der Kamera ist dazu neben den üblichen Daten wie Auflösung/Farbe vor allem auf die Framerate sowie den minimalen Abstand des Objekts zum Objektiv zu achten. Heutige Webcams bieten zwar hohe Auflösungen, sind jedoch auf Internetübertragungen optimiert, wobei aufgrund der Größe der Bilder nur wenige Frames übertragen werden können. Dementsprechend liegen die Werte dort gerade bei maximal ca. 3-5 FPS (Frames Per Second) in der höchsten Auflösung, was bei Fallzeiten von unter einer Sekunde definitiv zu wenig ist. Im Zweifelsfall sollte man die Geschwindigkeit der Auflösung und Farbe vorziehen.

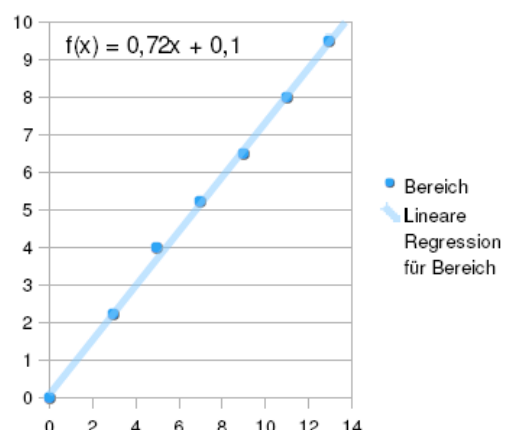
Der empfohlene minimale Abstand zum Objektiv ist von der Bauweise der Kiste abhängig – je kleiner letztere ist, umso kleiner sollte auch der Wert für den Abstand sein.

Daten der gebauten Kiste

Die von mir gebaute Kiste ist aufgrund der nahezu winzigen Kamera (Pollin Electronic Funkkammeraset 2,4Ghz mit USB-Empfänger; Art-Nr.: 580162) und den angenehm kurzen minimalen Objektivabständen von ungefähr 1mm relativ klein geworden, was mit dem entsprechend geringen Gewicht von 0,5 kg keine besonders großen Anforderung an die Stoßdämpfung beim Aufprall stellt (weniger kinetische Energie muss absorbiert werden). Die Grundplatte hat Abmessungen von 10 cm x 17 cm und die Kamera wird an einer der kurzen Seiten montiert. Der Bereich zwischen Objektiv und Ende der Kiste ist somit ca. 14cm lang. Aufgrund kleiner Messungen welche ich mit der der Kamera im Bezug auf Abstand und die dort abgebildete



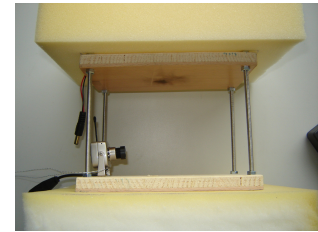
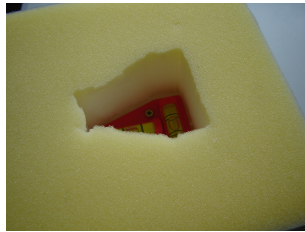
Höhe vornahm, ließ sich durch lineare Regression feststellen bei 14cm Entfernung maximal 10 cm Höhe abbilden zu können, weshalb der Abstand zwischen unterer und oberer Grundfläche eben diese beträgt.



Oben auf der Kiste, welche an den Seiten aus Kostengründen keine festen Wände hat, ist eine Kreuzwasserwaage zur horizontalen Ausrichtung montiert. Falls ein besonderer Schutz gegen Luftverwirbelungen erforderlich ist, kann die Kiste jedoch mit Folie (Frischhaltefolie) umwickelt werden. Durchsichtigkeit ist wegen einer nicht vorhandenen internen Lampe erforderlich!

Zur Stoßdämpfung wurde auf die beiden Grundflächen jeweils ein großes Stück Schaumstoff geklebt (Fläche: 24cm x 18cm), welcher an den Rändern ein paar Zentimeter über diese hinausragt, für den Fall dass die Kiste auf die Seite fällt.

Dennoch stellt dieser Schaumstoff nur eine Art Notfallpolsterung dar, da für den Normalfall eine große Umzugskiste mit vielen darin verteilten Schwämmen als „Auffangbecken“ dient. Aus dem oberen Schaumstoff wurde ein kleines Fach ausgeschnitten, in welchem die 9V Batterie für die Kamera gelagert wird.



Berechnung der Fallgeschwindigkeiten

Die exakte Fallgeschwindigkeit zu einer gewissen Zeit zu kennen oder für eine gegebene Fallhöhe die Fallzeit herauszubekommen ist immer interessantes Detailwissen, weshalb ich ein Tabellenkalkulationsdokument¹ auf Basis der sehr guten Erklärungen von Wikipedia² mit einigen Veränderungen erstellt habe. Mit diesem werden durch numerische Integration und mit Hilfe der Newton-Reibung diverse Größen anschaulich und zeitabhängig dargestellt.

Aufgrund der Gegebenheiten habe ich jedoch einige kleine Veränderungen vorgenommen, so zum Beispiel die Luftdichte als konstant angenommen, sowie aufgrund der kurzen Fallzeiten einen kleineren dt -Wert gewählt. Darüberhinaus habe ich einige weitere Größen wie den Impuls, die Energie sowie die Relativbeschleunigung in der Kiste hinzugefügt, was es vereinfacht Berechnungen für die nötige Stoßdämpfung anzustellen oder Messwerte zu vergleichen (→ Weitere Möglichkeiten, S. 10). Sämtliche Konstanten sind an

1 Datei „Freier Fall Berechnungen.ods“ auf der beigelegten CD, OpenDocument Format 1.3 – ISO/IEC Norm 26300

2 http://de.wikipedia.org/wiki/Freier_Fall#Berechnung_mit_Tabellenkalkulation

einer Stelle gesammelt, um so Modifikationen möglichst einfach durchführen zu können.

Ich werde hier auf eine genaue Erklärung des Dokumentes verzichten, da unter der genannten Quelle bereits eine gute Beschreibung vorhanden ist und die hinzugefügten Berechnungen selbsterklärend sind.

Mögliche Erweiterungen

Für diese Kiste sind viele Erweiterungen denkbar, die in dem speziellen Fall aus Kosten- sowie Zeitgründen nicht mit beachtet werden konnten.

Eines der ersten Probleme das bei den Experimenten auffiel, war die teilweise ungünstige Ausleuchtung des Kisteninnern. Hier wäre als Ansatz zur Verbesserung das Anschließen und Montieren von 1-2 LEDs in der Kiste sowie das Verschließen der Seitenwände entweder durch Einklemmen von Pappe oder den Anbau weiterer Holzschichten zu nennen.

Eine weitere Verbesserung sollte die Aufhängung betreffen, welche zur Zeit durch eine Krokodilklemme und eine simple, durch die Kiste gebundene Schnur realisiert wird. Zur exakten horizontalen Ausrichtung ist auf der Box selbst eine Wasserwaage montiert, was jedoch für die Fallvorgänge viel Aufwand erfordert. Besser wäre hier eine Aufhängung an 3-4 Fäden sowie eine bessere Klemme, welche unbeabsichtigtes Auslösen oder gar Herausrutschen des Fadens verhindert.

Desweiteren wären bessere Befestigungsmöglichkeiten für die Experimente wünschenswert, da zu Zeit nur eine grobe Arretierung mit Schnüren an den Abstandshaltern für die Grundplatten sowie mit Klebeband möglich ist. Hier muss vor allem die Erfahrung zeigen, welche Befestigungen sich eignen und vor allem benötigt werden, weshalb ich noch keine fixen Befestigungsmöglichkeiten eingebaut habe. Denkbar wären aber in den Boden und die Decke eingeschraubte Ösen, um fixere Punkte zur Befestigung zu erhalten.

Auch die Kamera könnte durch eine größere Antenne (aufschrauben und anlöten) verbessert werden, da leider gerade während der schnellen Fallbewegung guter Empfang nicht unbedingt gewährleistet ist.

Softwaretechnisch ist der Workflow zur Zeit noch ein wenig Umständlich. Eine Anleitung zum Aufnehmen unter Linux liegt bei, benötigt jedoch viel Kenntnis des Systems und viel Aufwand. Hier wäre ein (portables) Softwarepaket wünschenswert, welches die Vorgänge ein wenig automatisiert

IV. EXPERIMENTE

Kerzenflamme

Benötigte Materialien: Teelicht, Glas

Durchführung: Die Kerze anzünden und in das Glas stellen, das die Kerze während des Falls vor Luftverwirbelungen schützt. Das Glas wird nun in die Kiste gestellt und mit der Box fallen gelassen.

Beobachtung: Während des freien Falls ist die Kerzenflamme nicht mehr senkrecht nach oben gezogen, sondern sammelt sich rundlich um den Docht.

Erklärung: Die normale, vertikal langgezogene Kerzenflamme entsteht durch das heiße, bei der Verbrennung entstehende Gasgemisch, welches durch den Wärmeunterschied eine geringere Dichte als die umgebende Luft besitzt und somit aufsteigt. Der Auftrieb von Medien geringerer Dichte ist bedingt durch die kleinere Gewichtskraft $F_G = m \cdot g$ – welche jedoch in der Schwerelosigkeit aufgrund von $g = 0$ nicht existiert, weshalb keine Bewegung der Luftmassen durch die Temperatur-/Dichtedifferenzen stattfindet. Die Abfallprodukte und das leuchtende Plasma der Verbrennung sammeln sich somit direkt dort wo sie entstehen, am Docht der Kerze.

Damit wäre also ein weiteres Beispiel für alltägliche Gebrauchsgegenstände gefunden, die in der

Schwerelosigkeit Ihren Dienst verweigern. Sollte diese Kerze nämlich länger brennen, wird durch die sich darum ansammelnden Abfallprodukte die Frischluftzufuhr (Sauerstoff) verhindert, wodurch die Kerze erstickt.

Wasser-Luft

Benötigte Materialien: Wasser in einem verschließbaren, durchsichtigem Gefäß

Durchführung: Aus dem vollen Gefäß ein wenig Wasser ablassen, sodass eine Luftblase entsteht und danach mit der Kiste fallen lassen.

Beobachtung: Das Luftbläschen schwebt im Wasser oder verformt sich an der oberen Seite „klebend“ zu längeren vertikalen Seitenlängen.

Erklärung: Beide Beobachtungen basieren letztendlich auf der selben Grundlage, wobei im letzteren Fall lediglich die Bläschengröße nicht optimal war, sodass das Wasser es nicht umschließen konnte. Der Grund für die Trennung von Wasser und Luft unter normalen, irdischen Verhältnissen ist der Dichteunterschied. Das Medium mit der kleineren Dichte „schwimmt“ oben, da dort weniger Kraft pro cm^3 wirkt.

Weitere Möglichkeiten

Neben den bereits genannten und zur Demonstration vorgeführten Experimenten, gibt es noch viele weitere Möglichkeiten mit diesem Versuchsaufbau. Hier seien einige Beispiele aufgeführt:

1. Flüssigkeiten verschiedener Dichte/Viskosität (z.B. Öl und Wasser): Verhalten beobachten: Ändert sich etwas? Welche Flüssigkeit umschließt welche? Machen die Anteile etwas aus?

2. ein loser Gegenstand: Was passiert?
3. G-Meter (Beschleunigungsmesser): Bleibt die Beschleunigung konstant? Herrscht tatsächlich absolute Schwerelosigkeit?
4. Wassertropfen beobachten: Wie verändert er seine Form? Warum ist er so rund?
5. Kleinstlebewesen beobachten (bei längeren Fallstrecken): Wie verhalten sie sich in Schwerelosigkeit?

Zusammenfassend eröffnen sich mit einem solchen, eigentlich sehr einfachen und je nach Ausbau auch verhältnismäßig kostengünstigem, Versuchsaufbau für Schulen großartige Möglichkeiten bei der Beobachtung von (für den nicht-Physiker) exotischen Phänomenen wie der Schwerelosigkeit.

V. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] „Freier Fall“ von Wikipedia, diverse Autoren (Versionsgeschichte: http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Freier_Fall&action=history); Herausgeber: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie; VersionsID: 57050852; Datei „Freier Fall – Wikipedia.pdf“ auf der beigelegten CD; permanente URL: http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Freier_Fall&oldid=57050852

VI. ANHANG

- CD mit Bildern, Internetquellen sowie der Tabellenkalkulation
- Fallkiste
- Kostennachweise/Rechnungen

VII. LIZENZ

Dieses Werk ist unter einem Creative Commons Namensnennung - Keine kommerzielle Nutzung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 Deutschland Lizenzvertrag lizenziert. Um die Lizenz anzusehen, gehen Sie bitte zu <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/> oder schicken Sie einen Brief an Creative Commons, 171 Second Street, Suite 300, San Francisco, California 94105, USA.