

Der Lifter

- Ein Flugobjekt mit Ionenantrieb -

Sebastian Steinlechner¹, Simon Barke¹, Jessica Dück¹, Lars Hoppe²,
Raoul Amadeus Lorbeer³, Markus Otto¹, Aiko Sambrowski¹, Tobias Westphal¹

¹Institut für Gravitationsphysik, Leibniz Universität Hannover, Callinstr. 38, 30167 Hannover

²Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik, Callinstr. 25a, 30167 Hannover

³Laser Zentrum Hannover e.V., Hollerithallee 8, 30419 Hannover

(Eingegangen: 05.03.2008; Angenommen: 20.08.2008)

Kurzfassung

Der in diesem Artikel vorgestellte Lifter ist ein faszinierendes Flugobjekt, das ohne bewegliche Elemente, stattdessen durch einen Ionenantrieb zum Schweben gebracht werden kann. Obwohl er gerade weil der Lifter aus so einfachen Materialien wie Draht, Strohhalmen und Aluminiumfolie gebaut werden kann, zieht er viel Aufmerksamkeit auf sich und ruft immer wieder Staunen und fragende Gesichter hervor.

Im Folgenden wird eine Bauanleitung des Lifters sowie eine einfache Theorie zur Funktionsweise vorgestellt. Die theoretischen Ergebnisse werden durch verschiedene Experimentiervorschläge ergänzt und durch die entsprechenden Messergebnisse gestützt.

1 Einleitung

Bei dem Lifter handelt es sich um eine einfache Konstruktion aus Aluminiumfolie auf einem Gerüst aus Balsaholz oder Strohhalmen, über der in wenigen Zentimetern Abstand ein dünner Draht gespannt ist. Nach dem Anlegen einer Hochspannung von etwa 20 kV zwischen Draht und Aluminiumfolie erhebt sich der Lifter in die Luft. Abb. 1 zeigt ein Foto eines Lifters, der etwa 10 cm über der Tischplatte schwebt.

Warum aber kann ein starres Objekt allein durch Anlegen einer hohen Spannung zum Fliegen gebracht werden? Dabei spielt eine Vielzahl von Phä-

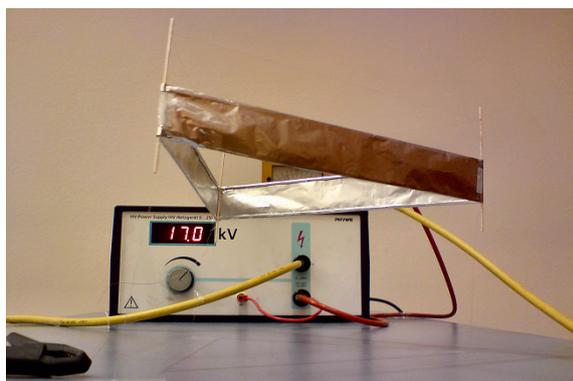


Abb. 1: Balsaholz-Lifter in Dreiecksform im Flug: Zwischen der aufgespannten Aluminiumfolie und dem darüber angebrachten Draht ist eine Hochspannung angelegt. Das elektrische Feld ionisiert Luftteilchen, deren Strom einen Impuls nach oben induziert. Im Hintergrund ist die benötigte Hochspannungsquelle zu sehen.



Abb. 2: Lifter aus Kohle- und Glasfaserstäben mit 2,5 m Durchmesser [1].

nomenen zusammen. Unter diesen sind mechanische Effekte wie Impulsübertrag und Auftrieb und die dadurch wirkenden Kräfte, die leicht mit einem Newtonmeter sichtbar gemacht werden können. Aus dem Bereich der Elektrizität spielen das Ohmsche Gesetz und elektrische Feldstärken entscheidende Rollen. Das grundsätzliche Prinzip beruht auf dem Phänomen des elektrischen Windes [2], der durch Ionisation an geladenen Spitzen hervorgerufen wird und beispielsweise mit Hilfe einer Kerzenflamme sichtbar gemacht werden kann. Durch geschickte Wahl der Elektrodenanordnung lässt sich der elektrische Wind in einem stark asymmetrischen Kondensator dazu benutzen, einen Nettoimpulsübertrag zu erzeugen. Dieser sogenannte Biefeld-Brown-Effekt lässt den Lifter fliegen.

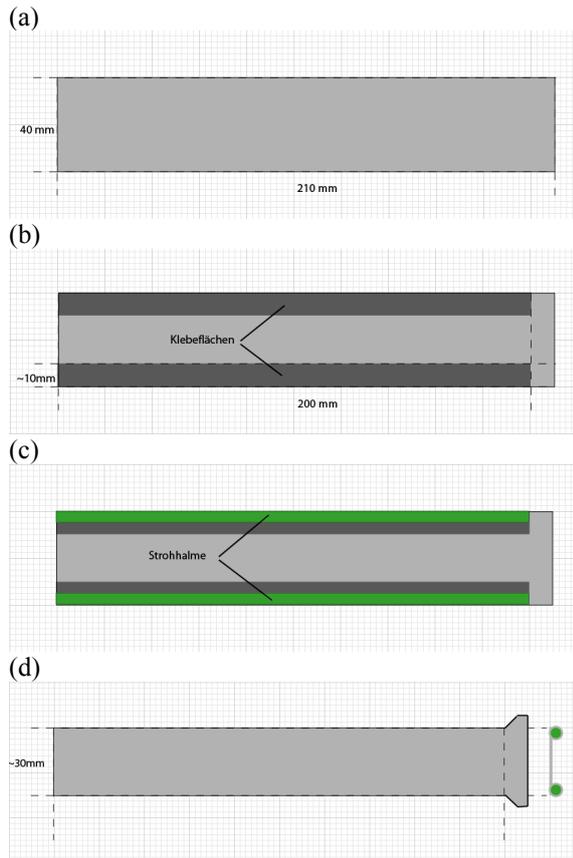


Abb. 3: Bauanleitung für ein Lifter-Seitenteil: Auf zugeschnittene Aluminiumfolien-Streifen (a) werden Strohhalme aufgeklebt (b und c) und in die Folie eingerollt (d).

Dieser Artikel enthält neben einer ausführlichen Anleitung für den Bau dieses nicht alltäglichen Flugobjekts eine Beschreibung des Großteils der am Lifter messbaren physikalischen Effekte. Anschließend werden Versuchsaufbauten zum Nachweis dieser Effekte sowie Beispielmessreihen aufgeführt.

2 Bauanleitung

Unter Beachtung einiger weniger technischer Details kann jeder selbst einen Lifter bauen. Die Form des Grundrisses spielt dabei grundsätzlich keine Rolle. Ein Dreieck wie in Abb. 1 ist geometrisch einfach und stabil, ein Lifter kann aber auch rund, sternförmig oder sechseckig sein wie Abb. 2 zeigt.

Im Folgenden wird eine Bauanleitung für einen kleinen Lifter gegeben, der an einer 25 kV Hochspannungsquelle betrieben werden kann. In Abschnitt 3.3 wird gezeigt, dass die damit hebbare Last im Bereich von 2 g liegt. Daher sollten als Gesamtmasse des Lifters etwa 1,5 g angestrebt werden. Mit der hier vorgestellten Bauweise ist dies gut realisierbar.

Die zum Aufbau benötigten Materialien sind Aluminiumfolie, Klebstoff, Balsaholz oder Strohhalme sowie dünner Kupferdraht. Größen- und Mengenangaben sind im folgenden Text enthalten.

2.1 Grundgerüst

Aus Aluminiumfolie, wie sie im Supermarkt zum Verpacken von Lebensmitteln erhältlich ist, werden zunächst drei Streifen mit den Maßen 40 mm x 210 mm angefertigt (Abb. 3(a)).

Für das Gerüst sind Balsaholz oder Strohhalme geeignet. Wichtig ist, dass es sich um leichtes, nicht leitendes Material handelt. Strohhalme haben den Vorteil, dass sie etwas stabiler sind als Balsaholz. Die Strohhalme müssen auf 200 mm Länge zurechtgeschnitten werden. Um Gewicht zu sparen, können diese auch längs halbiert, geviertelt usw. werden. Alternativ wird das Balsaholz (Dicke etwa 1 mm) in 2 mm breite, 200 mm lange Streifen geschnitten. Es werden neun Strohalm- bzw. Balsaholzstreifen benötigt.

Wie in Abb. 3(b) gezeigt wird nun der erste Streifen Aluminiumfolie von einer Seite oben und unten längs der Kanten mit Kleber bestrichen. Möglichst flüssiger Klebstoff (z.B. Modellbaukleber mit Pinsel) hat sich als sehr geeignet herausgestellt. Nun legt man die Hölzer oben und unten auf die klebenden Flächen, so dass auf der rechten Seite etwa 10 mm Aluminiumfolie überstehen und rollt die Hölzer so weit ein, dass sie rundherum von einer Schicht Folie umgeben sind wie es in Abb. 3(c) und (d) dargestellt ist. Dies wird für die beiden weiteren Aluminiumfolienstreifen wiederholt.

Nach dem Trocknen werden die drei Streifen verbunden, indem die an einer Seite überstehenden 10 mm Folie mit Kleber eingestrichen werden

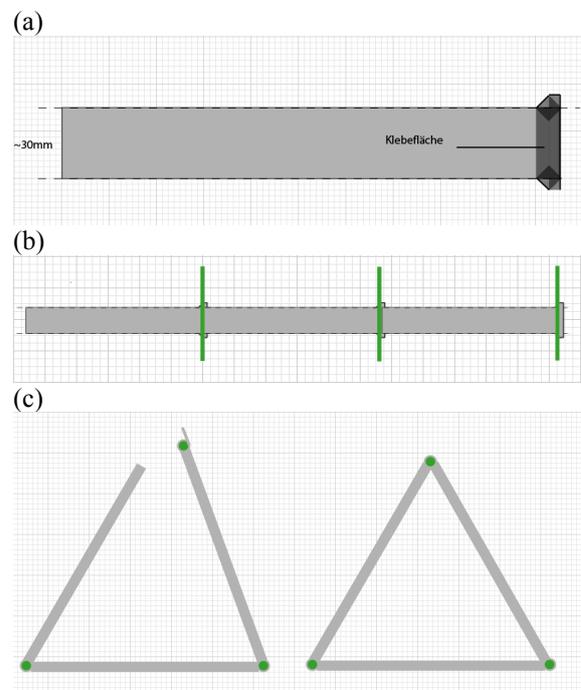


Abb. 4: Zusammenfügen der Seitenteile: Die Beine werden eingeklebt (a und b) und anschließend die Seitenteile zu einem Dreieck geschlossen (c).

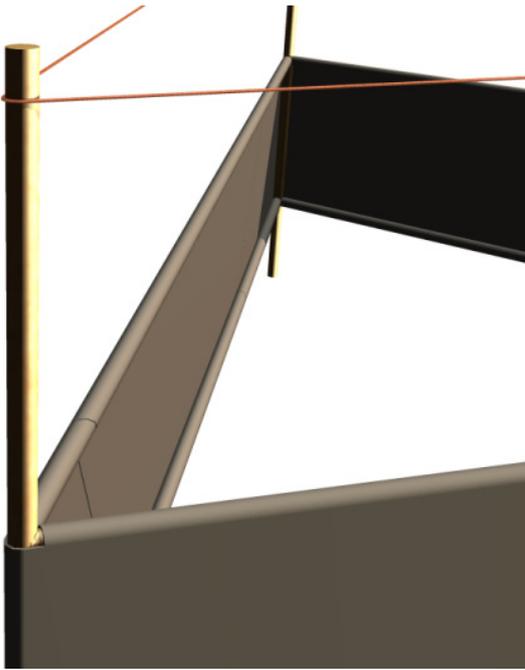


Abb. 5: Detailansicht des Modells: Die drei Seitenteile des Lifters sind miteinander verklebt. Oberhalb der Aluminiumfolie ist der gespannte Draht angebracht.

(Abb. 4 (a)) und jeweils ein anderer Streifen mit der nicht klebenden Seite um 5 mm darüber geschoben wird.

Nun werden die senkrechten Stäbe angebracht, indem sie auf die verbliebenen 5 mm klebender Folie gelegt werden, so dass ein langer Streifen, wie er in Abb. 4 (b) zu sehen ist, entsteht.

Alles muss gut trocknen, bevor das Dreieck wie in Abb. 4 (c) geschlossen werden kann. Danach können die „Beinchen“ des Lifters gekürzt werden. Oberhalb der Aluminiumfolie sollten sie mindestens 35 mm lang sein, unterhalb können sie auf einige mm gekürzt werden.

2.2 Draht und Zuleitung

Zuletzt muss der Draht angebracht werden. Er verläuft parallel zur Aluminiumfolie einmal um den Lifter herum. Der Abstand von Draht zu Aluminiumfolie sowie die Drahtdicke bestimmen die wesentlichen Eigenschaften des Lifters, wie nachfolgend dargestellt wird. Für die bisher angegebenen Maße hat sich 30 μm dicker unisolierter Kupferdraht in 30 mm Abstand zur Aluminiumfolie bewährt. Der Draht kann gut mit einer Nähnadel an Balsaholz oder Strohhalmen angebracht werden, indem die Lifterbeine durchstochen und der Draht hindurch gezogen wird. Alternativ kann der Draht mit einer Schlaufe um die Beine gelegt werden, wie es in Abb. 5 dargestellt ist, und mit einem kleinen Klebepunkt fixiert werden. Der Draht muss so stark gespannt sein, wie es Drahtdicke und Stabilität der Lifterbeine zulassen und darf an keiner Stelle unterbrochen sein. Unebenheiten im Draht (Knoten, etc.) sollten ver-

mieden werden, da diese zu elektrischen Überschlüssen zwischen Draht und Aluminiumfolie führen können. Die Gesamtdrahtlänge sollte etwa 1 m betragen, da noch etwa 0,4 m Draht für den Anschluss an die Spannungsquelle eingeplant werden muss. Der zweite Zuführungsdraht, der aus dem gleichen Material bei gleichem Durchmesser besteht wie der übrige Draht, kann mit einem Stück Tesafilm von außen auf der Aluminiumfolie festgeklebt werden. Beide Zuführungsdrähte bringt man am besten möglichst weit voneinander entfernt an, da sie sich unter Spannung aufgrund unterschiedlicher Ladung anziehen und so einen Kurzschluss verursachen können. Es hat sich als sinnvoll herausgestellt, die Leitung vom Draht nach oben wegzuführen, z.B. über eine Stativkonstruktion. So wird verhindert, dass die Zuleitung die Aluminiumfolie berühren kann. Um ein Ausbrechen des Lifters zu verhindern sollte man ihn mit an den Beinchen angeknöteten Nylonschnüren am Boden befestigen.

Nun schließt man mittels geeigneter Hochspannungskabel und Krokodilklemmen einen der Drähte an den Plus- den anderen an den Minuspol der Hochspannungsquelle an. Beide Polungen sind hierbei möglich, es empfiehlt sich jedoch, den Pluspol mit der Aluminiumfolie zu verbinden und den mit dem Draht verbundenen Minuspol zu erden.

Die elektrische Spannung kann nun angelegt werden. Da der Draht bei zu hoher Spannung ziemlich leicht durch elektrische Überschlüsse zerstört werden kann, sollte die Spannung nur langsam erhöht werden. Fliegt der Lifter einmal stabil, genügt die Spannung und sollte konstant gehalten oder sogar wieder etwas verringert werden. Bei den hier angegebenen Lifterabmessungen werden etwa 11 kV bis 15 kV für einen stabilen Flug benötigt. Zur Landung empfiehlt sich ebenfalls ein langsames Reduzieren der Spannung, da ein abruptes Herunterfallen des Lifters diesen beschädigen kann.

Neben der hier vorgestellten Bauform wurden bereits viele weitere interessante Formen realisiert [3]. Auch große Konstruktionen aus Kohle- und Glasfaserstäben mit über 2,5 Metern Durchmesser konnten entwickelt und zum Fliegen gebracht werden. Abb. 2 zeigt einen solchen Großlifter, der mit 70 kV bei 6,5 mA betrieben wurde.

3 Theorie des Lifters

Nach dem Staunen über das scheinbar unbegreifliche Schweben der Lifterkonstruktion folgt die Frage nach dem physikalischen Funktionsprinzip. Die quantitative Erklärung des Liftereffekts ist nicht-trivial. Eine umfangreiche Betrachtung verschiedener Hypothesen findet sich in [4], eine vollständige theoretische Beschreibung steht jedoch noch aus. Um dennoch zumindest ein grundlegendes Bild von der Funktionsweise zu haben, wird im Folgenden eine anschauliche Erklärung gegeben, die nach Meinung der Autoren die wesentlichen Sachverhalte widerspiegelt. Anschließend werden in Anlehnung

an die Erklärungsversuche von [4] und [5] die beteiligten Effekte kurz beleuchtet. Die dabei erhaltenen Ergebnisse liefern trotz starker Vereinfachung die richtige Größenordnung. Die einfachen Formeln sind gut für den Unterricht geeignet, dürfen jedoch nicht mit einer fundierten theoretischen Beschreibung verwechselt werden.

3.1 Anschauliche Erklärung

Draht und Aluminiumfolie wirken als asymmetrischer Kondensator. Paul Alfred Biefeld und Thomas Townsend Brown stellten bereits um 1920 eine Kraftwirkung auf einen solchen Kondensator fest [4]. Eine auf mehreren Vorführungen erprobte – und je nach Alter der Zuhörer leicht angepasste – Erklärung des Biefeld-Brown-Effekts lautet wie folgt.

Nach dem Anlegen der Spannung befinden sich gleich viele Ladungsträger auf den Oberflächen von Draht und Aluminiumfolie. Auf der Aluminiumfolie können sich die Ladungen über eine große Fläche verteilen, beim Draht ist die Fläche jedoch sehr viel kleiner. Deshalb ist die Ladungsdichte dort um ein Vielfaches höher als auf der Aluminiumfolie. Betrachtet man die Ladungen als Ausgangspunkte von elektrischen Feldlinien, so erhält man einen Feldverlauf wie er in Abb. 6 skizziert ist. Am Draht sind die Feldlinien dicht gedrängt, die elektrische Feldstärke ist groß. An der Aluminiumfolie liegen die Feldlinien weiter auseinander und die resultierende Feldstärke ist geringer.

Bei genügend hoher angelegter Spannung reicht schließlich die Feldstärke am Draht aus, um die Luft zu ionisieren – positiv oder negativ, je nach Spannungsvorzeichen. Die Ionen werden nun von der entgegengesetzt geladenen Elektrode, der sich weiter unten befindenden Aluminiumfolie, angezogen. Bei ihrer Bewegung von einer Elektrode zur anderen stoßen die Ionen mit anderen Luftteilchen und übertragen ihren nach unten gerichteten Impuls auf diese.

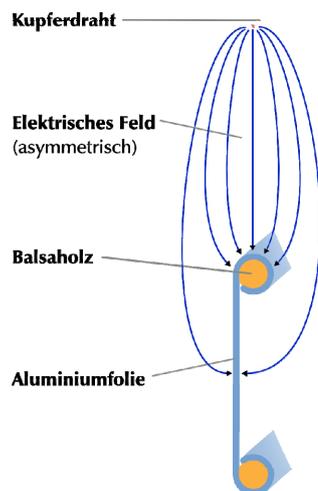


Abb. 6: Schematischer Verlauf der Feldlinien beim Lifter: Die Feldliniendichte ist am Draht deutlich erhöht. Hier tritt bei einer entsprechend hohen Spannung Ionisation der Luftteilchen auf.

Während die Ionen zum Großteil von der Aluminiumfolie eingefangen werden, fliegen die neutralen Luftteilchen vorbei. Der Luftstrom kann, wenn man mit der Hand unter den Lifter fasst, als leichter Wind gespürt werden.

Die Impulsübertragung auf neutrale Luftteilchen ist wesentlich für die Funktion des Lifters. Bei der Beschleunigung durch das elektrische Feld erhalten die Ionen nach unten gerichteten Impuls. Das bedeutet jedoch, dass das elektrische Feld – und damit der Lifter – nach oben gerichteten Impuls gewinnen muss, damit der Gesamtimpuls erhalten bleibt. Würden die Ionen nun direkt von der Aluminiumfolie wieder eingefangen werden, so würden sich die entgegen gerichteten Impulsbeiträge wieder aufheben und der Lifter würde nicht fliegen. Da der Impuls der Ionen jedoch auf neutrale Teilchen übertragen wird, die nicht mit der Aluminiumfolie stoßen, bleibt ein nach oben gerichteter Nettoimpuls des Lifters übrig. Dieser reicht aus, um den Lifter zum Schweben zu bringen.

3.2 Ionisation

Mit der Koronabildung an hochspannungsführenden Drähten und damit der Ionisation hat sich insbesondere F.W. Peek beschäftigt [6]. In umfangreichen Experimenten ermittelte er die nötige Feldstärke g_K für Koronabildung an der Oberfläche eines Drahtes mit Radius r (in cm),

$$g_K = g_0 \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{r \text{ cm}^{-1}}} \right). \quad (1)$$

g_0 bezeichnet die dielektrische Durchschlagsfestigkeit, die für Luft etwa 30 kV cm^{-1} beträgt [6, S. 766]. Die merkwürdig anmutende Maßeinheit im Radikanden ist hierbei nötig, um die phänomenologisch bestimmte Formel mit den richtigen Einheiten zu versehen. Es ist interessant, dass die nötige Feldstärke vom Radius abhängt. Bei dünneren Drähten ist eine höhere Feldstärke zur Erzeugung einer Korona erforderlich.

Die Feldstärke zwischen zwei parallel verlaufenden Drähten hat an der Oberfläche der Drähte ihr Maximum g_{\max} . Es gilt näherungsweise [6]

$$g_{\max} = \frac{U}{2r \ln\left(\frac{d}{r}\right)}, \quad (2)$$

solange der Drahtabstand d viel größer ist als der Drahtradius r . In dieser Näherung ist die Formel auch auf den Lifter anwendbar, obwohl die zweite Elektrode hier kein dünner Draht ist. Durch Kombination von (1) und (2) ergibt sich die zur Bildung einer Korona nötige Hochspannung zu

$$U_K = g_0 \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{r \text{ cm}^{-1}}} \right) \cdot 2r \ln\left(\frac{d}{r}\right). \quad (3)$$

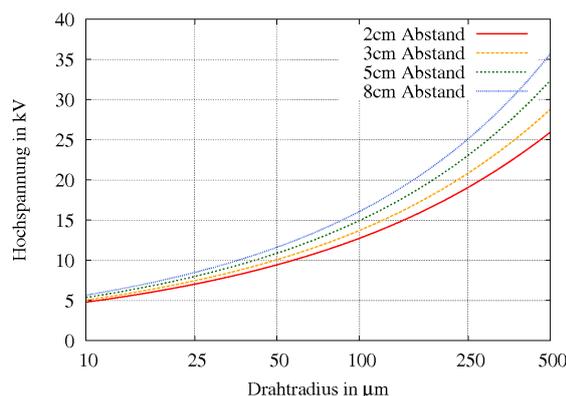


Abb. 7: Simulierte Ionisationsspannung in Abhängigkeit von Drahtabstand und Drahtradius.

In Abb. 7 ist die Abhängigkeit zwischen Drahtradius r und zur Ionisation nötiger Hochspannung U_K für verschiedene Elektrodenabstände d aufgetragen. Trotz höherer benötigter Feldstärken bei kleinerem Drahtradius r wird für sehr dünne Drähte eine geringere Hochspannung benötigt. Der von uns verwendete Draht mit $30\ \mu\text{m}$ Durchmesser, also einem Radius von $15\ \mu\text{m}$ ergibt beispielweise bei einem Drahtabstand von $3\ \text{cm}$ eine Spannung von

$$U_K(3\text{cm}, 15\ \mu\text{m}) = 6\text{kV}, \quad (4)$$

bei der die Ionisation einsetzt.

Durch eine Erhöhung der Spannung wird die Koronaentladung vergrößert, so dass mehr Luftmoleküle ionisiert werden und ein größerer Impulsübertrag stattfinden kann. Daher ist es wichtig, dass auch nach Einsetzen der Ionisation noch genügend Spannungsreserven (mehrere Kilovolt) zur Verfügung stehen, um den nötigen Lifterschub zu erzeugen.

3.3 Auftrieb

Die Kraft F , die auf Ionen der Ladung q in einem elektrischen Feld E wirkt, ist gegeben durch

$$F = qE. \quad (5)$$

Durch diese Kraft werden die Ionen zu einer Driftbewegung von Draht zu Aluminiumfolie angetrieben. Dabei wird die Driftgeschwindigkeit v der Ionen durch ihre Mobilität μ bestimmt,

$$v = \mu E. \quad (6)$$

Da Luft zum Großteil aus Stickstoff besteht, ist dies in erster Linie die Mobilität von N_2 -Ionen. Sie beträgt etwa $\mu = 2,5\ \text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ [7].

Unter der Annahme, dass sich die Ionen geradlinig bewegen, legen sie den Abstand d zwischen den Elektroden in der Zeit

$$t = \frac{d}{v}. \quad (7)$$

zurück. Sie erzeugen damit einen Strom

$$I = \frac{q}{t} = q \frac{v}{d}. \quad (8)$$

Durch Kombination der Formeln (5), (6) und (8) erhält man die durch Ionenwind erzeugte Kraft

$$F = I \frac{d}{v} E = I \frac{d}{\mu E} E = I \frac{d}{\mu}. \quad (9)$$

Diese Abhängigkeit ist in Abb. 8 für mit schultauglichen Hochspannungsnetzgeräten realistische Stromstärken grafisch dargestellt. Dabei wurde der Wert für die Kraft durch die Erdbeschleunigung $g = 9,81\ \text{ms}^{-2}$ geteilt, um die anschaulichere Größe des tragbaren Gewichts zu erhalten.

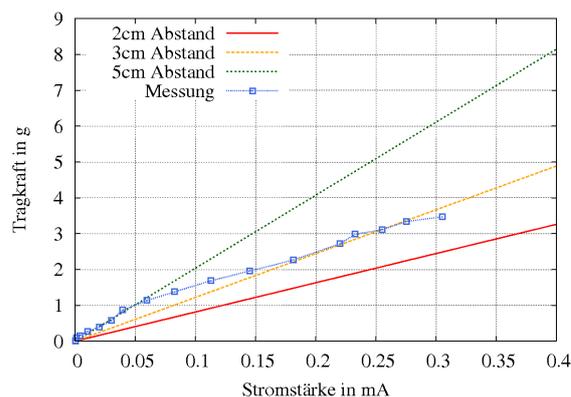


Abb. 8: Tragkraft in Abhängigkeit der Stromstärke. Simulation für drei verschiedene Drahtabstände, sowie Messung bei $3\ \text{cm}$ Drahtabstand.

4 Versuche

Der Lifter regt durch seine nicht offensichtliche Funktionsweise die Neugier seiner Betrachter an und ermöglicht eine Reihe von Versuchen mit denen sonst schwer greifbare physikalische Phänomene veranschaulicht werden können. Im Folgenden werden einige von den Autoren durchgeführte Versuche vorgestellt und Messbeispiele gegeben.

Wichtig ist der Einsatz einer strombegrenzten (berührungssicheren) Spannungsquelle. Wir verwendeten ein Hochspannungsnetzgerät der Firma Phywe, das von $0 - 25\ \text{kV}$ stufenlos geregelt werden kann. Durch Begrenzung auf $0,5\ \text{mA}$ Ausgangsstrom und maximal $150\ \text{mJ}$ Ladungsenergie ist es berührungssicher laut VDE 0411.

Auf eine entsprechende Begrenzung sollte bei der Auswahl des Netzgerätes unbedingt geachtet werden, insbesondere wenn Schüler mit dem Lifter experimentieren.

4.1 Ionenwind

Sobald der Lifter stabil schwebt, lässt sich der nach unten gerichtete Ionenwind sowohl spüren als auch sichtbar machen. Mit der flachen Hand, die vorsichtig unter den Lifter geschoben wird, ist deutlich ein Luftstrom spürbar. Zu Demonstrationszwecken kann der Luftstrom auch über Papierstreifen sichtbar gemacht werden. Besonders eindrucksvoll ist der Einsatz von Bühnennebel. Dieser wird von dem Lifter

um den Koronadraht angesaugt und sichtbar nach unten beschleunigt.

4.2 Ionisationsschwelle

Die Ionisation der Luft beginnt erst ab einer ausreichend hohen Spannung. Schließt man ein Amperemeter mit einem der Zuführungsdrähte in Reihe, so lässt sich beobachten, dass der Strom erst ab einer bestimmten Spannung – der Ionisationsspannung – einsetzt. Zur genaueren Bestimmung dieses Wertes kann eine Spannungs-Strom-Kennlinie aufgenommen werden. Mit 0 kV beginnend wird in Intervallen von 1 kV die dazugehörige Stromstärke notiert. Die zu erwartenden Messwerte liegen bei einigen Mikroampere. Zu beachten ist, dass bei zunehmendem Strom und hierdurch zunehmender Kraftwirkung des entstehenden Ionenwindes der Lifter in die Flugphase übergeht und im Übergang sehr instabil ist. Messwerte aus diesem Bereich sollten übersprungen werden, um schnell in einen stabilen Flugzustand übergehen zu können. Abb. 9 zeigt exemplarisch eine real aufgenommene Spannung-Strom-Kennlinie. Die Werte wurden hierbei aus vier Messreihen gemittelt. Die Ionisationsspannung liegt bei etwa 5,5 kV und stimmt mit der theoretischen Vorhersage nach Gleichung (4) gut überein.

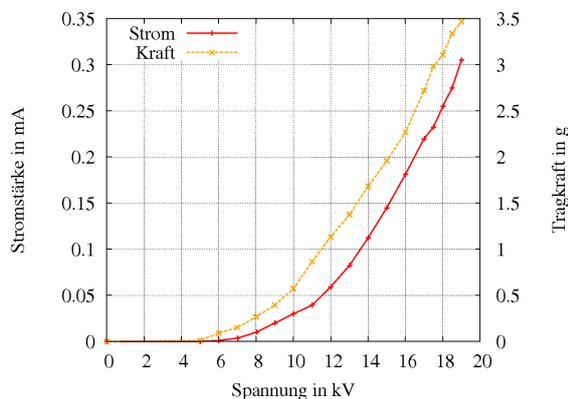


Abb. 9: Messung von Tragkraft und Stromstärke in Abhängigkeit der angelegten Spannung

4.3 Auftriebskraft in Abhängigkeit des Stroms

Nach Gleichung (9) sollte die Auftriebskraft in erster Näherung linear vom Strom abhängen. Die zu erwartende Auftriebskraft liegt im Bereich weniger zehn Millinewton. Die Masse des Lifters von ca. 1,5 g entspricht einer Gewichtskraft von 15 mN. Bei niedrigen Stromstärken reicht die Auftriebskraft noch nicht aus, um den Lifter zum Schweben zu bringen. Um dennoch messen zu können welche Kraft erzeugt wird, kann man den Lifter kopfüber an einem Newtonmeter (Federwaage) aufhängen. Ein möglicher Versuchsaufbau ist in Abb. 10 dargestellt. Der Lifter wurde mit drei Nylonfäden über eine 100 mN-Federwaage an einer Stativstange befestigt. Beginnend bei 0 kV können in Intervallen von 1 kV Strom und Kraft notiert werden. Um das in

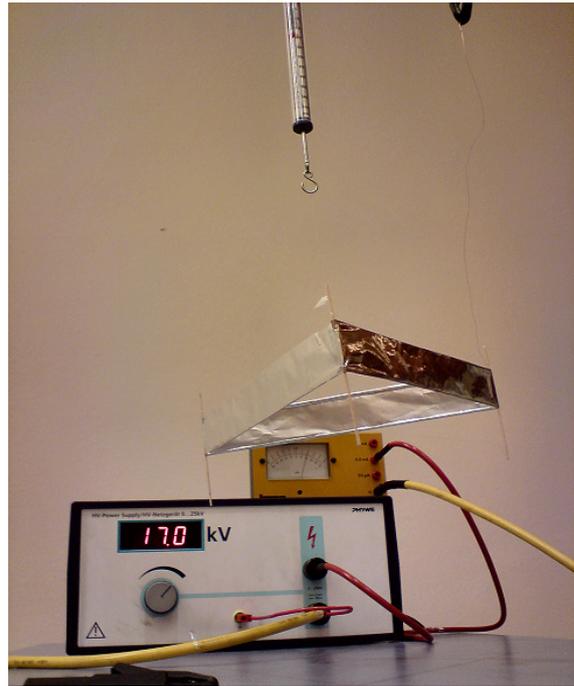


Abb. 10: Versuchsaufbau zur Kraftbestimmung. Der Lifter hängt kopfüber an einer 100 mN-Federwaage. Im Hintergrund sind die Hochspannungsquelle und ein Galvanometer zur Strommessung zu sehen.

Abschnitt 2 beschriebene Liftermodell nicht durch Überschlüge zwischen Draht und Aluminiumfolie zu zerstören, sollten 18 kV nicht überschritten werden. Es bietet sich an, eine zweite Messreihe aufzunehmen, die beim Verringern der Spannung in gleichen Intervallen zurück auf 0 kV entsteht. Bildet man nun das arithmetische Mittel der beiden Messwerte für die Kraft, die zum gleichen Strom gehören, lässt sich der durch Reibung der Federwaage entstehende Fehler verringern.

Abb. 8 zeigt an einer aufgenommenen Beispielkennlinie recht überzeugend den erwarteten linearen Zusammenhang zwischen Strom und Kraft.

4.4 Weitere Versuche

Die beiden unter Abschnitten 4.2 und 4.3 beschriebenen Versuche können sowohl mit einem an den negativen Pol der Spannungsversorgung angeschlossenen Draht und mit dem positiven Pol verbundener Aluminiumfolie als auch mit umgekehrter Polarität durchgeführt werden. Vergleicht man die Ergebnisse miteinander, lässt sich feststellen, dass sowohl die Ionisationsschwelle als auch der Proportionalitätsfaktor zwischen Stromstärke und Auftriebskraft sich reproduzierbar unterscheiden, da die Mobilität von positiven und negativen Ionen nicht identisch ist. Ebenso unterscheidet sich die zur positiven bzw. negativen Ionisation nötige Feldstärke. Zudem können Versuche wie die Messung der Ionisationsschwelle und Kraftentwicklung unter der Variation des Drahtdurchmessers und -abstandes durchgeführt werden. So bietet der Lifter eine Vielzahl von Möglichkeiten, wissenschaftliches Arbeiten zu erlernen.

5 Zusammenfassung

In diesem Artikel wurde der Aufbau des Lifters für den einfachen Nachbau detailliert beschrieben. An eine kurze Theorie zu den grundlegenden Effekten wurden einige Versuchsvorschläge und beispielhafte Ergebnisse angeschlossen.

Der Lifter wurde als erstaunliches Versuchsobjekt vorgestellt, an dem eine Vielzahl physikalischer Phänomene wie Impulsübertrag und Auftrieb, das Ohmsche Gesetz sowie elektrische Feldstärken auf eine neue und überraschende Art und Weise im Unterricht demonstriert werden können.

6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Institut für Quantenoptik, dem Institut für Gravitationsphysik und dem Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik der Leibniz Universität Hannover für die Unterstützung bei der Durchführung der Versuche. Unser besonderer Dank gilt hierbei Rudi Gaul und Stephan Venzke. Vielen Dank an Markus Grumann für wertvolle Korrekturen.

7. Literatur

- [1] Weihnachtsvorlesung, http://www.milde-marketing.de/html/antigravitation_in_sat1.html, (Stand: Oktober 2008)
- [2] Heiser, Chr. & Kunze, P., *Der elektrische Wind in Zimmerluft*, Ann. Physik 15, S. 18 (1955)
- [3] Naudin, J.-L., <http://jnaudin.free.fr/lifters/main.htm>, (Stand: Oktober 2008)
- [4] Bahder, T. & Fazi, Ch. (2003), *Force on an Asymmetric Capacitor*, ARL-TR-3005, Army Research Laboratory
- [5] Barsukov, E., http://sudy_zhenja.tripod.com/lifter_theory/index.html, (Stand: Oktober 2008)
- [6] Peek, F.W. (1915), *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering*, New York: McGraw-Hill, 1. Auflage
- [7] Tipler, P.A., Mosca, G. & Pelte, D. (2004), *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2. Auflage