

„Ich kleb’ dir eine“ Experimentelle Untersuchung von adhäsiven Haftpads

Joachim S. Haupt, Volkhard Nordmeier

Didaktik der Physik, Freie Universität Berlin, Arnimallee 14, 14195 Berlin
joachim.haupt@fu-berlin.de, volkhard.nordmeier@fu-berlin.de

Kurzfassung

Der Beitrag beschreibt, wie ein *Haftpad* (auch bekannt als *Anti-Rutsch-Pad* oder *Klebepad*) in Bezug auf seine Haftkraft sowie die Mechanismen seiner Haftung untersucht werden kann. Dabei werden verschiedener Experimente und (Rasterkraft-) mikroskopische Untersuchungen vorgestellt. Es zeigt sich, dass eine experimentelle Bestimmung der Haftkraft schwierig ist, da sie von sehr vielen Parametern abhängt. Die Messunsicherheiten sind daher groß. Die maximale Haftkraft liegt im Bereich von 20 N/cm² (Plexiglas) bzw. 10 N/cm² (Aluminium). Die Untersuchungen legen den Schluss nahe, dass für die Haftung einerseits der Luftdruck und andererseits die van-der-Waals-Kräfte ursächlich sind und beide in vergleichbarer Größenordnung liegen.

Über die experimentellen Erkenntnisse hinausgehend wird auch eine mögliche Eignung des Haftpads als Thema für den Physikunterricht diskutiert. Dafür spricht, dass das Thema authentisch und anspruchsvoll ist und Raum für unterschiedliche Lösungswege bietet. Bei der unterrichtlichen Umsetzungen sollten aber die großen Messunsicherheiten und die Schwierigkeit eines stabilen experimentellen Aufbaus mit bedacht werden.

1. Einleitung & Untersuchungsfragen

Ein Ziel der Forschung und Entwicklung von Klebstoffherstellern ist es, Klebstoffe herzustellen, die einerseits sehr gut kleben und sich andererseits gut verarbeiten lassen. Ideal wäre ein Klebstoff, den man beliebig wiederverwenden kann. Es existieren bereits einige bekannte Produkte wie z. B. *PowerStrips*, *PosterStrips*, *Klebegummi*, *PattaFix* etc. In den letzten Jahren ist auf dem deutschen Markt ein neues Produkt aufgetaucht: Das *Haftpad* (auch bekannt als *Anti-Rutsch-Pad* oder *Klebepad*). Es wird vorrangig als Accessoire für das Auto angeboten. Das Neue an diesem Haftpad ist: Es klebt nicht, sondern es *haftet*, d. h. Gegenstände halten daran fest, sie lassen sich leicht wieder entfernen, und nach dem Entfernen sind sie nicht „klebrig“. Das kann man direkt erleben, wenn man ein Haftpad anfasst: Die Finger haften daran fest, aber nach dem Abziehen sind sie nicht klebrig.

Der Hersteller preist das Haftpad mit den Argumenten an, dass es beliebig oft wiederbenutzbar ist, selbst nach Verschmutzung (was offensichtlich die Haftkraft verringert). Dazu kann das Haftpad mit Wasser abgewaschen werden, und es ist (nach Trocknung) wieder genauso gut einsetzbar wie vorher.

Als Erklärung für das Haften wird häufig ein Vergleich mit dem Haften eines Geckofußes oder eines Frosches (vgl. [1], [2]) gegeben. Diese Tiere können auch an Oberflächen haften, ohne klebrige Rückstände zu hinterlassen. Die Oberflächen der Füße sind selbstreinigend und haften, wie auch die Haftpads, besonders gut auf glatten Oberflächen. Dafür



Abb. 1: Transparentes und schwarzes Haftpad; häufig angepresen für den Einsatz an Autoarmaturen zum „Festhalten“ von z. B. Mobiltelefonen, Schlüsseln, Kleingeld, etc.

werden die van-der-Waals-Kräfte zur Erklärung herangezogen. Dies sind Anziehungskräfte auf atomarer und/oder molekularer Teilchenebene, die bei sehr geringen Teilchenabständen wirksam werden. Dann entsteht eine Anziehung durch Induktion temporärer Dipolmomente (auch bei makroskopisch ungeladen Teilchen). Diese ist proportional zu $1/R^6$ (R: Abstand der Teilchen) auf Basis des anziehenden Anteils im Lennard-Jones-Potential (vgl. z. B. [3, S. 804 & 902]).¹

¹ Unter [7] finden sich Unterrichtsmaterialien und Modelle zu den van-der-Waals-Kräften im Kontext „Gecko“.

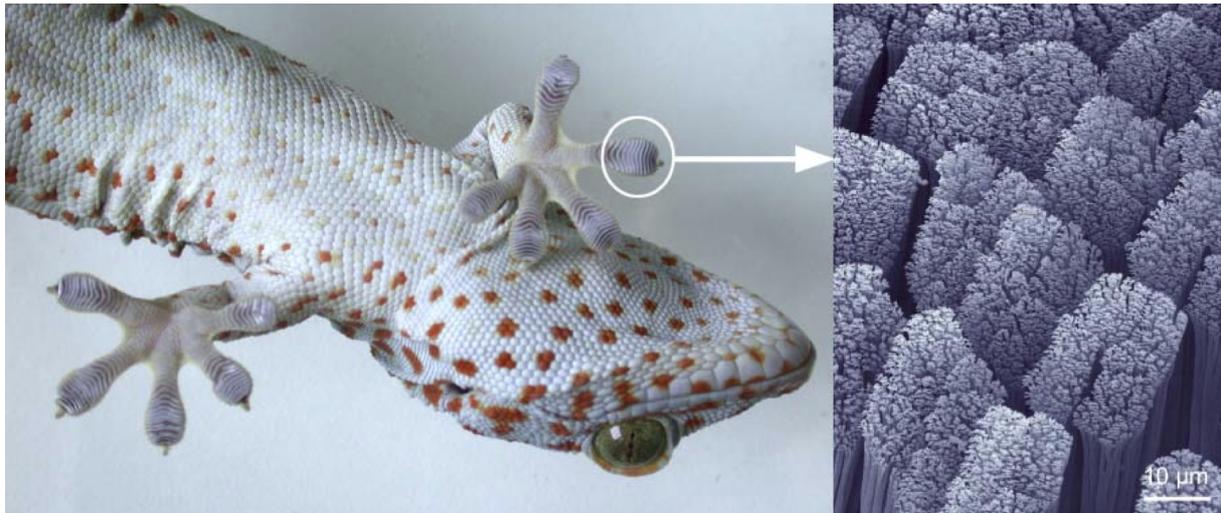


Abb. 2: Gecko mit einer Elektronenmikroskopaufnahme der Struktur der Füße [5, S. 10]

Daraus ergeben sich zwei Untersuchungsfragen:

- 1.) Was ist die Ursache für das Haften der Haftpads?
- 2.) Wie stark haften diese Haftpads?

Um diese Fragen zu untersuchen, bedarf es eines passenden experimentellen Aufbaus. Dieser muss vor allem zwei Anforderung gerecht werden: a) dass er reproduzierbare Ergebnisse liefert und b), dass er der realen Anwendungssituation nahe kommt.

2. Strukturuntersuchungen

Falls das Haftpad mittels van-der-Waals-Kräften haftet, ist zu vermuten, dass es wie die Füße eines Geckos eine Mikrostrukturierung aufweist (vgl. Abb. 2). Daher wurde die Oberfläche zunächst lichtmikroskopisch untersucht. Das Haftpad besitzt i. A. eine makroskopisch strukturierte Oberseite (Abb. 1) und eine glatte Unterseite. Die (licht-)mikroskopische Untersuchung des Haftpads ließ allerdings keine besondere Struktur zu Tage treten (Abb. 3). Es lässt sich zwar eine riefenartige Feinstruktur feststellen, als ob das Material zersägt wurde. Diese Riefen könnten aber ihren Ursprung auch in der Herstellung des Haftpads haben.² Im nächsten Schritt wurde das Haftpad daher rasterkraftmikroskopisch untersucht.³ Die Struktur auf dieser Aufnahme ist nicht wie der Fuß eines Geckos grobstrukturiert, sondern weist lediglich eine feinere, lamellenartige Struktur in der Größenordnung von etwa 0,1 μm Lamellenabstand auf (Abb. 4 und 5). Das Haftpad ist dem Geckofuss strukturell also nicht ähnlich und auch nicht ähnlich zu den Haftoberflächen, die im Bereich der sog. Bionik erforscht werden. Dort wird versucht, eine haarähnliche Struktur auf Oberflächen aufzubringen (vgl. z. B. [5],[6]).

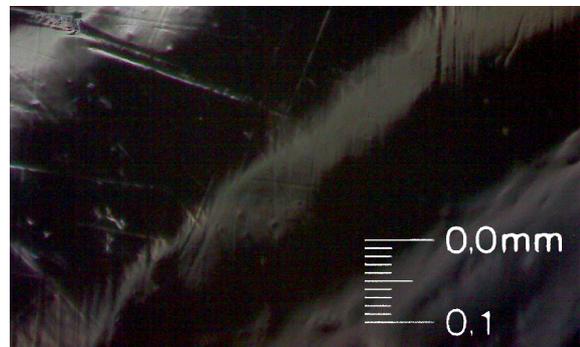


Abb. 3: Lichtmikroskopische Aufnahme der Oberfläche eines schwarzen Haftpads (Auflichtaufnahme)

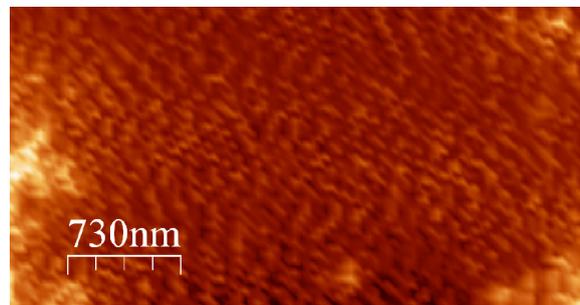


Abb. 4: Rasterkraftmikroskopische Aufnahme unter Umgebungsbedingungen (intermittierender Modus) – hohe Auflösung; Es wird eine lamellenartige Struktur sichtbar.

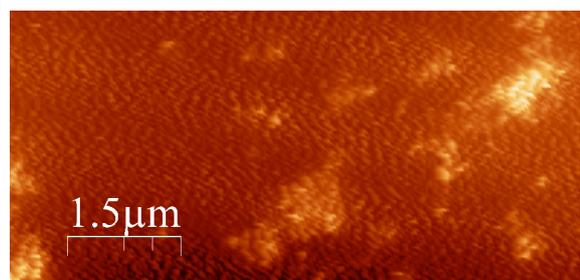


Abb. 5: Rasterkraftmikroskopische Aufnahme unter Umgebungsbedingungen (intermittierender Modus) – geringe Auflösung; Die hellen Flecken stellen Verschmutzungen oder Oberflächendefekte dar.

² Die Vermutung liegt nahe, dass die Haftpads gegossen werden und die Gussformen ggf. diese Feinstruktur aufweisen. Diese Vermutung wird auch dadurch gestützt, dass sich auf der glatten Rückseite des Haftpads keine derartigen Riefen finden lassen.

³ Besonderer Dank dafür geht an Gelavizh Ahmadi (AG Franke, FB Physik, FU Berlin).

3. Experimentelle Untersuchungen zum Haften

Die Untersuchungen wurden bewusst mit einfachen schulischen Mitteln durchgeführt und auch computergestützte Messsysteme wie z. B. Cassy nicht eingesetzt. Stattdessen setzen wir zur Kraftmessung eine digitale low-cost Kofferwaage⁴ ein, die über Dehnungsmessstreifen funktioniert und folglich auch als Kraftmessgerät nutzbar ist. Da die Kofferwaage eine zeitliche Messauflösung von ca. 6 Hz besitzt, wurden die einzelnen Versuche abgefilmt und danach ausgewertet.

3.1. Realitätsnähe

Für die Untersuchungen wurden mehrere verschiedene Versuche durchgeführt (in Anlehnung an [4]). Diese Versuche sollten möglichst realen Anwendungsszenarien nachempfunden sein. Reale Anwendungssituationen sind entweder, dass ein Gegenstand am Pad haftet und plötzlich abgerissen wird, oder dass der Gegenstand bzw. das Haftpad sukzessive abgezogen wird. Damit entfällt die einfach untersuchbare Methode „Rolling Ball“ (vgl. [8]), bei der „Bremsweg“ einer Stahlkugel auf dem Klebepad gemessen werden würde.

Da das Haftpad sehr flexibel ist, ist davon auszugehen, dass es beim Abziehen immer einen sukzessiven Abzug gibt und der Fall des plötzlichen Abrisses nur eine Idealvorstellung darstellt. Dies deckt sich auch mit dem Befund aus Voruntersuchungen, dass je nach Abzugsgeschwindigkeit die notwendige Kraft stark vergrößert wird. Folglich wurde bei den folgenden Versuchen die Abzugsgeschwindigkeit konstant gehalten bei $1,5 \pm 0,2$ cm/s (angelehnt an die experimentellen Möglichkeiten und die Empfehlung aus [4]).

3.2. Abzugsversuch

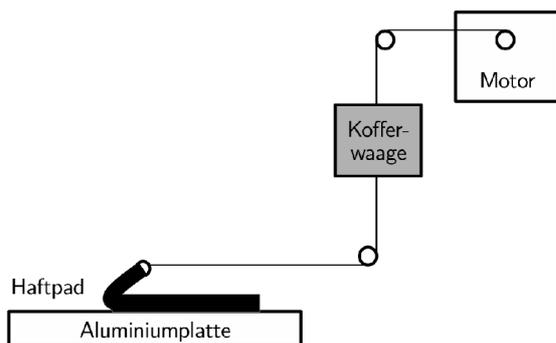


Abb. 6: Schematische Darstellung Abzugsversuch (glatte Seite des Haftpads unten)

Dieser Versuch entspricht dem Anwendungsfall, dass das Haftpad von einem Körper abgezogen wird, aber auch dem Fall, wenn ein Gegenstand langsam vom Haftpad entfernt wird. Der Gegenstand schert dann über eine Kante ab. Dies kann direkt beobachtet werden, wenn man einen klaren Plexiglaskörper an das Haftpad anbringt und diesen dann analog zum

⁴ Preis: 10 Euro; Messbereich: bis zu 45 kg bei einer Genauigkeit von 10 g

Abrissversuch statt mit einem Motor mit einem Gewicht belastet, das unterhalb der Abrisskraft liegt. Die haftende Fläche sieht so aus, als würde sie das Plexiglas benetzen und lässt sich optisch gut unterscheiden von der nicht-haftenden Fläche. Dabei kann beobachtet werden, wie die haftende Fläche immer kleiner wird. Der Gegenstand wird langsam abgezogen.

Um reproduzierbare Bedingungen herzustellen, sollte die Haftkraft in Abhängigkeit vom Anpressdruck untersucht werden. Dazu wurde das Haftpad horizontal auf einer Aluminiumplatte⁵ angehaftet und für eine Minute mit einem Massestück belastet, das auf dem Haftpad stand (wobei dazwischen eine Platte lag, so dass immer die gleiche Fläche des Haftpads belastet wurde). Dann wurde das Haftpad mit einer Abzugsgeschwindigkeit von $1,5 \pm 0,2$ cm/s per Motor abgezogen und die dabei auftretende Zugkraft mit der Kofferwaage vermessen (Abb. 6). Dieser Prozess nahm ungefähr 10 Sekunden in Anspruch. Die Anzeige der Kofferwaage wurde dabei gefilmt, so dass die Messwerte später protokolliert werden können.

Die so gewonnen Messwerte lassen sich grafisch als Zeitreihe darstellen: Abbildung 7 stellt eine solche Messreihe exemplarisch dar. Charakteristisch für den Großteil der Messungen war, dass zuerst eine hohe Kraft gemessen wurde, die dann absank und zum Ende hin wieder leicht anstieg. Deswegen haben wir uns für das folgende Auswertungsvorgehen entschieden: Es wird ein Wert zu Beginn jeder Sekunde notiert (nach dem Zeitstempel der Videoaufnahme). Die Werte werden zur Berechnung eines

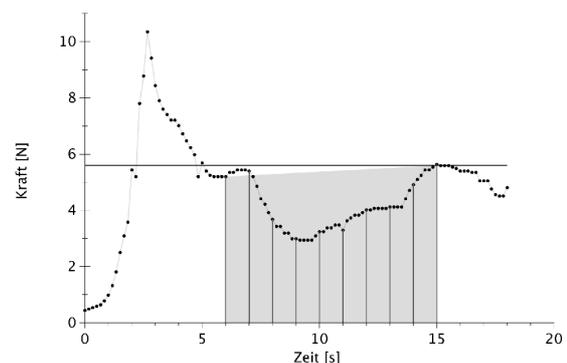


Abb. 7: Beispielmesskurve des Abzugsversuch: Jeder einzelne Messwert entsteht durch Ablesen der Kofferwaage von einer Videoaufnahme. In diesem Beispiel wurden alle 6 Werte pro Sekunde abgelesen, was eine sehr hohen Aufwand darstellt. Für die spätere Auswertung wurde lediglich ein Wert pro Sekunde abgelesen (hier durch schwarze vertikale Linien markiert). Die horizontale schwarze Linie ($\sim 5,5$ N) stellt die Höhe des zweiten Kraftmaximums dar (erstes bei $\sim 10,5$ N). Alle Werte, die „im Tal“ der Messkurve vor diesem zweiten Kraftmaximum liegen, werden zur Mittelwertberechnung herangezogen (grau markierter Bereich) – in diesem Fall zehn Werte (bei lediglich sekundenweise Abtastung).

⁵ Breite der Aluminiumplatte: 8,7 cm \pm 0,1 cm

Mittelwerts herangezogen, sobald der erste Wert unter den des zweiten Maximums fällt. In der Abbildung 7 ist dies durch den grauen Bereich markiert und das sekundenweise Ablesen durch die schwarzen vertikalen Linien. Dadurch wurden leichte Messunsicherheiten in Kauf genommen, aber die Zeitökonomie des Verfahrens wurde stark erhöht.

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind in Abbildung 8 dargestellt. Es zeigt sich, dass mit steigendem Anpressdruck ein Anstieg in der Haftung erzielt wird. Ein asymptotisches Maximum der Abziehungskraft in Abhängigkeit von der Anpressmasse wurde experimentell zwar nicht überprüft, ist aber zu vermuten.

Auf der rechten Seite des Diagramms in Abbildung 8 sind Messwerte aufgetragen, bei denen mit zwei Arten von Rollen in verschiedenen Richtungen (parallel und orthogonal) das Haftpad festgerollt wurde. Hier unterscheiden sich die Werte stark, aber es ist nicht klar, ob dies an der Ausrollrichtung oder an der Rolle liegt. Ebenso offensichtlich ist ein Anstieg der Messunsicherheit bei den Versuchen mit einer Rolle, die stark per Hand angedrückt wurde.

Insgesamt lässt sich schlussfolgern: Die Haftung ist sensitiv gegenüber dem Anpressdruck und die Haftung steigt mit größerem Anpressdruck.

Neben dem Anpressdruck erweist sich die Kontaktzeit als ein weiterer relevanter Parameter, und es zeigte sich in unseren Versuchen, dass die Abziehzeit auch stark mit der vorhergehenden Kontaktzeit variiert. Dazu wurde die Abzugskraft statisch umgesetzt. Statt des Motors wurde ein 200g-Massestück verwendet. Spannend ist auch diese eher zufällige Beobachtung: Als das Haftpad mehrere Tage anhaften gelassen wurde (auch vertikal, also ohne Schweredruck des Eigengewichts), haftete das Pad wesentlich stärker (vgl. Abb. 9). Dieses Verhalten lässt sich reproduzieren, wurde aber im Rahmen unserer Messreihen nicht weiter untersucht. Festzuhalten bleibt aber, dass es folglich noch ein zeitkritischer Parameter existiert, der systematisch untersucht werden müsste.

3.3. Stirnabrissversuch

Zur Untersuchung eines anderen möglichen Anwendungsfalls wurde ein *Stirnabrissversuch* durchgeführt (Abb. 10). Diese Versuchsreihe simuliert den Fall, dass ein Körper vom Haftpad vertikal abgehoben wird. Da die Haftpads unterschiedlich strukturiert (je nach Hersteller), auf der Unterseite i. d. R. glatt und die Oberseite mit einem Netzmuster versehen sind, wurde jeweils die glatte Seite zur Haftung genutzt (genauso wie auch schon beim Abzugsversuch in Kap. 3.2.). Dies hat zur Folge, dass man beim Stirnabrissversuch sicherstellen muss, dass das Haftpad einseitig fixiert ist. Darin liegt eine besondere Schwierigkeit, da beide Seiten des Haftpads zwar haften, aber nicht klar ist, wo sie stärker haften. Im Experiment muss also darauf geachtet werden, dass sich per Zug der Probekörper vom Haftpad löst und nicht das Haftpad von der Befestigung. Die

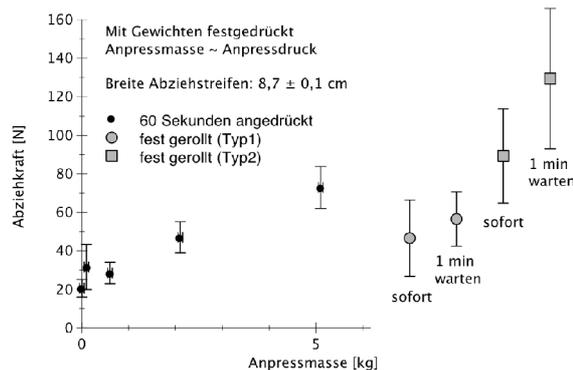


Abb. 8: Abzugsversuch – Darstellung der Abziehungskraft in Abhängigkeit von der Anpressmasse, die 60 Sekunden lang vor Messbeginn das Haftpad an die Aluminiumplatte gedrückt hat.

Messunsicherheit (Y): 3σ -Vertrauensbereich (99,7 %)

Messunsicherheit (X): Waage $\pm 0,01$ kg

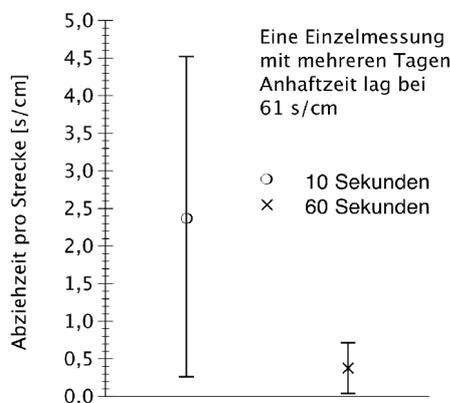


Abb. 9: Abzugsversuch ohne Motor, sondern mit 0,2 kg – Darstellung der Abziehzeit in cm/s in Abhängigkeit von der Anpresszeit (10 oder 60 Sekunden); Anpressmasse: 10 kg

Messunsicherheit (Y): 3σ -Vertrauensbereich (99,7 %)

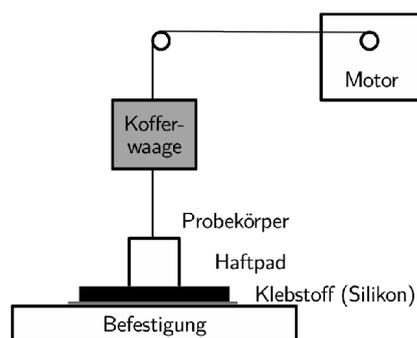


Abb. 10: Schematische Darstellung Stirnabrissversuch

Haftkraft auf einer glatten, sauberen Oberflächen ist enorm hoch.⁶ Dies hat auch verhindert, dass mit größeren Probekörpern gearbeitet werden konnte, weil einerseits der Experimentalmotor an seine Leistungsgrenzen kam (und folglich nicht mehr als kon-

6 Bei einer Abzugsgeschwindigkeit von $1,5 \pm 0,2$ cm/s liegt die Abreißkraft (bei Plexiglas) in der Größenordnung von ca. 25 N/cm².

stant in der Geschwindigkeit angenommen werden kann) und der Versuch gefährlich wurde (weil der Probekörper abrupt abreißt und bei Kräften im Bereich von 100 N bereits durch den Raum fliegen und somit eine ernstzunehmende Gefahr darstellen kann). Zudem endet der Messbereich der eingesetzten Kofferwaage bei 45 kg (entspricht ~ 450 N). Interessant ist auch ein weiteres experimentelles *Problem*: Das Haftpad löste sich bei dem größten Aluminiumkörper von der Silikonunterlage, weil diese stärker am Probekörper haftete als an der Befestigung (s. Abb. 10).⁷

Beim Experimentieren kam die Frage auf, wie genau sichergestellt werden kann, dass der Probekörper möglichst unter konstanten Bedingungen und reproduzierbar haftet. Dabei entschieden wir uns in den ersten Versuchsreihen dafür, den Probekörper festzudrücken (weil es nicht möglich war, entsprechende Anpressmassen auf dem Probekörper abzulegen). Alternativ wurde mit einem Plexiglas-Probekörper eine Versuchsreihe durchgeführt, bei der der Körper ohne Anpressung „leicht“ abgelegt wurde (s. auch Abb. 12). Für den inversen Stirnabrissversuch (Abb. 11) musste die Haftpad-Schleife festgedrückt werden, da „lockeres“ Auflegen keine sinnvollen messbaren Ergebnisse erzeugt. Die Schleife löst sich sonst zu leicht vom Probekörper. Die Ergebnisse sind in Abbildung 12 dargestellt.

Die Fläche der Aluminium-Probekörper variierte durch die Veränderung der Länge des Probekörpers (s. Abb. 12; Längen A: 11,0 mm; B: 22,3 mm; C: 33,7 mm und D: 45,4 mm; Breite 24,5 mm (alle identisch); – Messunsicherheit jeweils $\pm 0,5$ mm).

Für die Haftkräfte beim normalen Stirnabrissversuch lässt sich insgesamt lediglich feststellen: Plexiglas haftet wesentlich stärker als Aluminium. Außerdem ist auffällig, dass starkes Festdrücken die Haftkraft um etwa eine Größenordnung erhöht (Vergleichsmessung beim Plexiglaskörper, s. Abb. 12).

Weitere Aussagen sind auf Basis der großen Messunsicherheiten nicht möglich. Eine Ursache für die großen Messunsicherheiten ist, dass beim Stirnabrissversuch lediglich der Maximalwert der Abreißkraft bestimmt wird. Damit stehen als Datengrundlage auch deutlich weniger Messwerte zur Verfügung als beim aufwendigen Auswertungsverfahren des Abzugsversuchs (Kap. 3.2.).

Im Experiment zeigte sich auch eine prinzipielle Messunsicherheit: Es lässt sich nur schlecht kontrollieren, wie der Probekörper vom Haftpad abreißt bzw. abschert. Dies lässt sich aber auch auf den realen Anwendungsfall übertragen: Die maximale Haftkraft hängt davon ab, wie sich der Probekörper vom Haftpad löst. Wird er über eine Seite abschert, ist die Haftkraft wesentlich geringer.

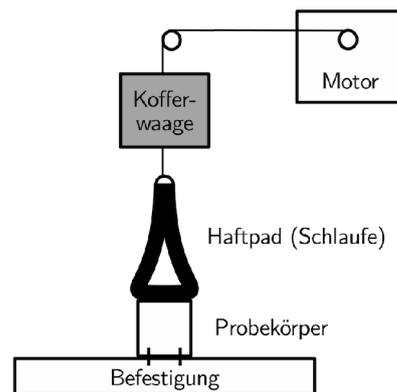


Abb. 11: Schematische Darstellung inversen Stirnabrissversuch

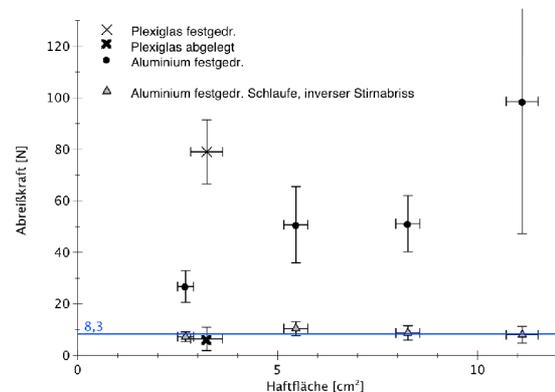


Abb. 12: Auswertung Stirnabrissversuch und inverser Stirnabrissversuch; teilweise Probekörper festgedrückt oder abgelegt; verschiedene Materialien (Plexiglas & Aluminium); blaue vertikale Linie: Mittelwert für inverser Stirnabrissversuch bei Aluminium über verschiedene Haftflächen.

Messunsicherheit (Y): 3σ -Vertrauensbereich (99,7 %)

Messunsicherheit (X): Fehlerfortpflanzung für die Fläche

Dieses Phänomen lässt sich auch an den Messwerten zum inversen Stirnabrissversuch beobachten: Wird die Größe der Auflagefläche des Probekörpers variiert, bleibt die nötige Abreißkraft nahezu konstant (s. Abb. 12). Dies lässt sich nicht einfach damit erklären, dass das Haftpad über nur eine Seite abschert, da der Wert identisch für alle Längen ist, obwohl beim ersten Aluminiumkörper die Länge nur halb so groß ist, wie die Breite. Die Ursache für dieses Verhalten ist unklar.

Abschließend kann aber festgestellt werden: Es zeigt sich, dass sowohl das Material einen sehr großen Einfluss auf das Haftverhalten hat, als auch, ob ein Körper nur abgelegt oder durch starken Druck eine gute Haftung bedingt wird.

Ein reproduzierbares Haftergebnis zu erreichen, ist experimentell schwierig zu realisieren. Dieses Problem soll daher im Folgenden weiter diskutiert werden.

⁷ Das ist auch die Ursache dafür, dass der Plexiglaskörper nur in kleiner Dimensionierung eingesetzt wurde (s. Abb. 12).

3.4. Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit

Die Reproduzierbarkeit konnte nur durch eine ausreichende Anzahl an Messungen realisiert werden (i. A. zehn wiederholende Messungen). Trotzdem bleiben die Ergebnisse mit großen Messunsicherheiten behaftet (s. o.). Als einen großen Einflussfaktor ließ sich in unseren Versuchsreihen die Verschmutzung der Haftpads und der Haftoberflächen der Probekörper ausmachen, die offensichtlich große Auswirkungen hat. Wir entschieden uns, diesem Problem damit zu begegnen, dass wir vor jeder Versuchsreihe die Oberflächen (meist Aluminium oder Plexiglas) mit Ethanol gereinigt und abgewischt werden. Dies lässt sich leider für das Haftpad nicht realisieren, denn sobald das Haftpad mit einem Tuch abgewischt wird, verbleiben Fäden und Schmutzpartikel sofort am Haftpad. Folglich reinigten wir das Haftpad, indem es mit Wasser und Seife abgewaschen, danach gründlich abgespült und abschließend mit Hilfe von Druckluft trocken geblasen wurde. Das zweite große Problem ist: Wie kann eine reproduzierbare Haftung realisiert werden? Gemeint ist damit, dass ein Probekörper bei jeder Durchführung gleich gut in Kontakt mit dem Haftpad stehen sollte. Auch ist sicherzustellen, dass es bei jeder Durchführung auf die gleiche Weise abgelöst wird (die Abziehkraften sollten immer im selben Winkel angreifen; s. o.).

Eine experimentelle Voruntersuchung mit Plexiglas bzw. mit einem transparenten Haftpad ergab einen ersten Eindruck, wie gut Haftung vorliegt und auf welche Art und Weise sich ein Probekörper vom Haftpad ablöst, da schon durch die Betrachtung mit dem bloßen Auge unterschieden werden kann, ob das Haftpad haftet oder ob Haftpad und Probekörper nicht im direkten Kontakt miteinander stehen.

3.5. Luftdruckabhängigkeit

Im Rahmen der Untersuchungen zum Haftpad entstand auch die Hypothese, dass der Hafteffekt ggf. auch eine Wirkung des Luftdrucks ist, weil keine Luft unter das Haftpad gelangt.⁸ Dazu wurde ein Stirnabrissversuch mit einem kleineren Experimentalmotor und unter einer Luftglocke aufgebaut. Das war der einzige Versuch, der unter die vorhandene Vakuumglocke passte. Das Ergebnis zeigt Abbildung 13.

Zuerst wurde versucht, den Probekörper (Aluminium A, Maße $\sim 2,5 \times 11$ cm) vor jeder Messung festzudrücken. Dabei herrscht natürlich Normaldruck, nach dem Evakuieren löste sich der Probekörper allerdings ohne messbaren Widerstand. Ursächlich war vermutlich die unter dem Probekörper angesammelte Restluft, die beim Evakuieren den Probekörper vom Haftpad „abhebt“. Folglich wurden die Versuche lediglich mit einem Ablegen des Haftkörpers durchgeführt, indem der Motor von außerhalb angesteuert wurde. Die daraus resultierenden Messunsicherheiten sind allerdings sehr groß. Das liegt zum einen am ungenauen Verfahren, wie der Probe-

⁸ Dank für diese Idee geht an Herrn Prof. Michael Vollmer, Brandenburg.

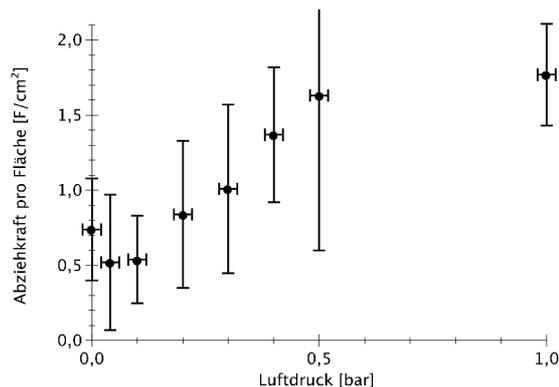


Abb. 13: Auswertung Stirnabrissversuch; eingesetzter Probekörper Aluminium (A: $11 \times 24,5$ mm); nicht festgedrückt, sondern locker abgelegt (weil unter Vakuum); Messunsicherheit (Y): 3σ -Vertrauensbereich (99,7 %) Messunsicherheit (X): Genauigkeit Manometer $\pm 0,02$ bar

körper abgesetzt wurde und zum anderen daran, dass der Motor nah an der Lastgrenze arbeitete. Trotzdem lässt sich feststellen, dass bei kleinerem Luftdruck die Haftung verringert wird, es aber einen nach unseren Messungen einen unteren Grenzwert bzw. Bodenwert gibt.

Daraus lässt sich ableiten, dass das Haftpad auf Basis zweier Mechanismen haftet: Einerseits einer adhäsiven Haftung auf Basis der van-der-Waals-Kräfte und andererseits auf Basis des Luftabschlusses zwischen Probekörper und Haftpad. Beide Effekte liegen in vergleichbarer Größenordnung.⁹

4. Einsatz im Unterricht

Für den Einsatz dieses Themas im Unterricht lassen sich viele Argumente finden (s. Info-Kasten: Das Haftpad als Unterrichtsgegenstand). Das Problem er-

Das Haftpad als Unterrichtsgegenstand

Vorteile

- alltagsorientiert und preiswert
- verschiedene thematische Bezüge: Bionik, Adhäsion, Klebeforschung
- experimentelle Anwendung der Mechanik
- realer, komplexer Messgegenstand → Notwendigkeit zu eigener Hypothesengenerierung
- inquiry based science learning: vielfältige Problemlösungen möglich
- übertragbar: Untersuchungen an Klettverschlüssen

Nachteile

- große Messunsicherheiten
- statistische Methoden notwendig
- komplizierte Messverfahren notwendig

⁹ Dies erklärt auch die großen Kräfte beim Abrissversuch (obwohl die Fläche kleiner war) im Vergleich zum Abzugsversuch (wo die Fläche größer war) und zum inversen Abrissversuch. Da bei den beiden letzteren der Anteil des Luftdrucks nicht wirksam ist.

scheint authentisch, weil es aus der Alltagsperspektive heraus natürlich wichtig ist herauszufinden, *wie viel solch ein Haftpad hält*, wenn man es benutzen möchte. Zusätzlich ist es einfach verfügbar und zudem preiswert. Bei den experimentellen Untersuchungen kann auf die Methoden aus dem physikalischen Repertoire der klassischen Mechanik zurückgegriffen werden, das minimiert mögliche fachphysikalische Hürden. Dies kann den Lernenden zu Gute kommen, da sich im Sinne des inquiry based science learning in diesem Themenfeld vielfältige Forschungsfragen und Problemlösungen finden lassen. Insbesondere bietet sich die Lerngelegenheit zu begreifen, wie wichtig es ist, die eigene Forschungsfrage genau zu definieren. Es ist eben nicht sofort klar, wie die Haftstärke bestimmt werden kann.

Leider ist mit der Komplexität und der teilweise schweren experimentellen Zugänglichkeit des Messgegenstandes Haftpad aus didaktischer Perspektive ein Problem verbunden: Die Schüler_innen müssen mit großen Messunsicherheit umgehen (können), um brauchbare Ergebnisse zu erhalten. Dies hat zur Folge, dass schüleraktive Messungen und Auswertungen zum Haftpad in dem Sinne schwierig sind, da die Schüler_innen auf einfache Weise keine eindeutigen oder funktionalen Schlussfolgerungen ziehen können (oder der Auswertungsaufwand so groß wird, dass die Untersuchungen ggf. nur noch schwer überschaubar sind). Auf der anderen Seite kann gerade dieses Problem zu einer Herausforderung werden und kompetenzfördernd wirken, denn an diesem vermeintlichen einfach (und alltäglichen) Untersuchungsgegenstand können (auch gezielt) Grenzen der Messbarkeit aufgezeigt und für die Lernenden erfahrbar gemacht werden.

Mit dem Haftpad lassen sich sowohl Freihand- als auch Demonstrationsversuche durchführen. Ein Aspekt der Funktionsweise des Pads könnte z. B. dadurch erklärt werden, dass im Demonstrationsversuch gezeigt wird, wie die Haftkraft im Vakuum nachlässt. Damit kann begründet werden, dass der Luftdruck für die Haftung zwar nicht vernachlässigbar ist, es aber noch einen nicht-luftdruckabhängigen Anteil der Haftkraft geben muss (van-der-Waals-Kräfte). Dieses Verhalten zeigt sich z. B. bei Versuchen über Zeiträume¹⁰, bei denen beobachtbar ist, dass das Haftpad sich nach mehreren Tagen viel stärker festgezogen hat, als direkt nach dem Andrücken – und zwar unabhängig davon, wie fest man es angepresst hat.

5. Zusammenfassung & Ausblick

Die Untersuchungen zum Haftpad lassen zusammenfassend folgende Aussagen zu:

1.) Das Haftens lässt auf zwei Mechanismen zurückführen: Einerseits auf das Wirken von van-der-Waals Kräften und andererseits auf den Luftdruck; beides in vergleichbarer Größenordnung.

2.) Die Haftkraft hängt aber auch davon ab, wie ein Körper vom Haftpad gelöst wird. Die Bestimmung der Haftkraft ist allerdings äußerst schwierig, und es muss beim Vergleich der Kräfte klar sein, welches Szenario gemeint ist (z. B. die Maximalkraft oder die Kraft, bei der ein Probekörper nicht abfällt). Für den Maximalwert beim Abrissfall konnten wir Werte in der Größenordnung von etwa 10 N/cm² (Kraft pro Haftfläche) für Aluminium und 20 N/cm² für Plexiglas ermitteln. Der Wert für ein dauerhaftes Halten liegt weit darunter.

Bei den Untersuchungen ist uns zudem folgendes aufgefallen:

a) Je stärker das Haftpad festgedrückt wird, desto stärker haftet es (bis zu einem vermuteten Maximalwert).

b) Je länger ein Haftpad haftet, desto fester haftet es. Das Haftpad zieht sich quasi selbst fest.

Erstaunlicherweise lassen sich diese Untersuchungen analog auf viele Klebestreifenarten ausdehnen und sogar auf Klettverschlüsse¹¹ und es bieten sich auch weitere elementare Fragestellungen an, wie z. B.: „*Warum kann das Haftpad abgewaschen werden?*“ oder „*Warum haften Schmutzpartikel besser am Wasser als am Haftpad?*“. Oder: „*Warum verliert ein mit Wasser benetztes Haftpad einen großen Teil seiner Haftkraft?*“

Aus experimenteller und didaktischer Perspektive ist interessant, dass Haftpads sehr preiswerte Experimentiermaterialien sind¹² und einen lebensweltlichen Bezug zur Mechanik bzw. zur Physik des Haftens und Klebens herstellen. Darüber hinaus erweisen sich Haftpads als sehr nützliche und vielseitig einsetzbare Experimentiermittel. Sie werden von uns bei vielen Schwingungsexperimenten genutzt, um z. B. einen Vibrator/Lautsprecher auf einem Experimentiertisch zu fixieren oder auch um etwas, das geschüttelt werden soll, auf der Lautsprecheroberfläche zu fixieren u. v. m.

Für den Einsatz in der Schule bieten sich das Haftpad an, wenn man auf der Suche nach einem authentischen und anspruchsvollen Thema ist, das Raum für unterschiedliche Forschungsfragen und Lösungswege bietet. Dabei muss aber die große Messunsicherheit beachtet werden, die entweder gezielt umgangen oder thematisiert werden kann.

¹⁰ vgl. Abb. 9; auch als vorbereiteter Demonstrationsversuch durchführbar

¹¹ So geschehen durch einen Studierenden an unserem Fachbereich in einem naturwissenschaftlichen Vertiefungsseminar.

¹² Unter zwei Euro pro Stück mit einer Größe von ungefähr 10 x 15 cm.

6. Literatur

- [1] SPIDERPAD (2013): *Spiderpad Produktinformation*. <http://www.spiderpad.com/about.html> (letzter Zugriff: 03.12.2013).
- [2] PENTAGRAM (2010): *Gecko - Jak to działa?*. http://en.gecko.eu/gecko_pad_how_does_it_work (letzter Zugriff: 03.12.2013).
- [3] GERTHSEN, C.; MESCHEDE, D. & VOGEL, H. (2006): *Gerthsen Physik*. Berlin: Springer.
- [4] JACK, A. (2001): *FINAT Technisches Handbuch*, 6. Ausgabe. <http://www.etika.it/servizi/finat/thduits.pdf> (letzter Zugriff: 21.02.2013).
- [5] ARZT, E.; GORB, S. (2004): *Bildung und Forschung im Bereich Bionik in Deutschland*. www.bionikzentrum.de/img_upload/bionik_frankreich.pdf (letzter Zugriff: 21.02.2012).
- [6] UCB (2013): *Biologically Inspired Synthetic Gecko Adhesives*. <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~ronf/Gecko/index.html> (letzter Zugriff: 16.09.2013).
- [7] POBBREGAR, N. (2007): *Die Gecko-, Kopierer“ – Den Haft- und Klebetricks der Natur auf der Spur*. http://www.scinexx.de/inc/artikel_drucken_komplett.php?f_id=344&a_flag=2 (letzter Zugriff: 10.12.2013).
- [8] PSTC (2003): *Tack Rolling Ball*. <http://www.pstc.org/files/public/6.pdf> (letzter Zugriff: 10.12.2013).