

Wissenschaftliche Hausarbeit
im Rahmen der Ersten Staatsprüfung
für das Lehramt an Gymnasien im Fach Physik

EINGEREICHT BEI DER HESSISCHEN LEHRKRÄFTEAKADEMIE
- PRÜFUNGSSTELLE FRANKFURT -

THEMA

**Sicherheit im Flugzeug -
Vorschläge für einen
kontextorientierten
Physikunterricht**

DATUM

13.05.2025

STUDIUM

Lehramt für Gymnasien (L3)
Mathematik, Physik

VERFASSER

Phillipp Schulte

GUTACHTER

Prof. Dr. Thomas Wilhelm
Institut für Didaktik der Physik
Goethe Universität Frankfurt am Main

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	2
2 Gewählte Sachverhalte	4
2.1 Vorstellung der Sachverhalte	4
2.2 Curriculare Verortung der Sachverhalte	5
2.3 Erweiterung auf andere Sachverhalte	7
3 Kontexte als sinnvoller Rahmen im Physikunterricht?	8
4 Theoretischer Hintergrund	12
4.1 Luftloch: Newton'sche Axiome & Bezugssysteme	12
4.2 Notrutsche: Reibung, Arbeit, Temperatur	15
4.3 Kabinendruck: Druck & Höhe	21
4.4 Fensterform: Stabilitätscheck mittels Licht-Polarisation	24
5 Mögliche Unterrichtsentwürfe	31
5.1 Luftloch	31
5.1.1 Bisheriger Unterricht	31
5.1.2 Tabellarischer Unterrichtsentwurf	32
5.1.3 Arbeitsblätter, Tafelbilder & Videos	38
5.1.4 Experimente	50
5.1.5 Didaktische & Methodische Begründung	64
5.1.6 Folgender Unterricht & Kritischer Rückblick	70
5.2 Notrutsche	71
5.2.1 Bisheriger Unterricht	71
5.2.2 Tabellarischer Unterrichtsentwurf	74
5.2.3 Arbeitsblätter, Tafelbilder & Videos	80
5.2.4 Experimente	89
5.2.5 Didaktische & Methodische Begründung	99
5.2.6 Folgender Unterricht & Kritischer Rückblick	105
5.3 Kabinendruck	108
5.3.1 Bisheriger Unterricht	108
5.3.2 Experimente & Begründung	110
5.3.3 Folgender Unterricht & Kritischer Rückblick	120
5.4 Fensterform	122
5.4.1 Bisheriger Unterricht	123
5.4.2 Experimente & Begründung	124
5.4.3 Folgender Unterricht & Kritischer Rückblick	132
6 Fazit & Reflexion	134
Literatur- & Quellenverzeichnis	140
Anhang	148
Eigenständigkeitserklärung	162

1 Einleitung

Für den Weg in den Urlaub wählen viele Menschen das Flugzeug. Gerade wenn weit entfernte Destinationen das Ziel sind oder über Ozeane gereist wird, bietet sich das Fliegen an. Den meisten Menschen ist dabei noch nie etwas Gravierendes zugestoßen. Dennoch wird immer wieder von Flugzeug-unfällen in den Medien berichtet. Das Flugzeug ist zwar statisch gesehen das sicherste Verkehrsmittel (Vorndran, 2011, S. 1088), allerdings gibt es bei kaum einem anderen Verkehrsmittel so viele Sicherheitsvorschriften, Verhaltensregeln und feste technische Abläufe bei den unterschiedlichen Flugphasen. Diese resultieren aus jahrelangen Erfahrungen in der Fliegerei und dem Lernen aus technischen Defekten, unüberlegten Bequemlichkeiten an Bord und schweren bis tödlichen Unfällen (International Air Transportation Association, 2024, S. 6). Dementsprechend wichtig scheint es, bei den von der Besatzung oder dem digitalen Entertainmentsystem vorgetragenen Sicherheitseinweisungen zu Beginn eines jeden Fluges zuzuhören. Mit einem inhaltlichen Verständnis für diese Sicherheitsvorschriften könnten einige zukünftige Unfälle vermieden werden. Dies begründet die Motivation dieser Arbeit.

Es sollen im Folgenden beispielhaft vier Flugsicherheitsaspekte bzw. der technische Umgang damit an Bord eines Flugzeuges genutzt werden, um für die jeweils dazu gehörenden physikalischen Sachverhalte und Themen Unterrichtseinheiten zu entwerfen. Darin sollen jeweils die Notwendigkeiten für das Befassen mit den Themen der Flugsicherheit im Speziellen und mit Sicherheitsüberlegungen im Allgemeinen klar werden. Außerdem sollen die Gründe für die besagten Sicherheitsvorschriften durch ein tiefergreifendes physikalisches Verständnis von den Lernenden erfasst werden. Nebenbei soll immer wieder die offene, aber nachhaltig-wirkende Fehlerkultur in der Fliegerei betont werden, welche sich darüber hinaus methodisch anbietet, um sich durch die vier Sachverhalte durchzuarbeiten.

Zum Entwerfen bzw. Begründen der drei Unterrichtseinheiten wird auf Literatur zurückgegriffen. Zusätzlich werden Arbeitsmaterialien erstellt und Vorschläge bzw. Tipps für den individuellen Unterricht gegeben. Diese

beruhen teilweise auf eigenen Unterrichtserfahrungen. Die im Folgenden entworfenen Unterrichtseinheiten basieren auf vier Sachverhalten, welche in unterschiedlichen Jahrgangsstufen durchgeführt werden können. Damit soll gezeigt werden, dass die Thematik der Flugsicherheit vielseitig einsetzbar ist und nicht innerhalb eines Schulhalbjahres behandelt werden braucht. Viel eher kann immer wieder darauf zurückgekommen werden. Dies könnte im Unterricht für einen spannenden Wechsel an Themen sorgen.

Der Hauptfokus dieser Arbeit liegt aber auf den beschriebenen Experimenten zu den vier Unterrichtsideen. Während die ersten zwei Unterrichtsideen vollständige Entwürfe darstellen, skizzieren die zweiten zwei Unterrichtsideen hauptsächlich Experimente. In allen vier Teilkapiteln 5.1 bis 5.4 werden die Experimente nicht nur beschrieben und durch Originalaufnahmen gestützt, sondern ebenfalls durch Tipps zur Durchführung und durch auftretende Probleme sowie Alternativen begleitet. Damit bieten gerade die zweiten zwei Unterrichtsideen die Möglichkeit, die dort vorgestellten Experimente variabel im eigenen Unterricht einzusetzen. Der physikalische Sachverhalt bzw. Zusammenhang des vierten Experiments erstreckt sich beispielsweise von Wellen-Optik bis Materien-Struktur. Da die ersten beiden Unterrichtsentwürfe genaue Stundenverlaufspläne enthalten, geben diese zusätzlich einen möglichen Rahmen, in dem die dazu entworfenen Experimente durchgeführt werden können. Der lesenden Lehrkraft steht sowohl die Übernahme als auch eine Abänderung der hier präsentierten Unterrichtsvorschläge frei.

Damit leistet diese Arbeit einen Beitrag zur Themenvielfalt im Physikunterricht und wird der lesenden Lehrkraft eventuell neue Experimente nahebringen. Gleichzeitig ist diese Arbeit als didaktisch-planerisches Gesamtwerk zu verstehen, welches das Befassen mit Flugsicherheit – und nicht nur mit dem klassischen Thema des Fliegens selbst – mit methodischen und didaktischen Überlegungen aus Fliegerei und Schule verbindet, in dessen Rahmen die Lernenden vielfältige Kompetenzen trainieren können.

2 Gewählte Sachverhalte

2.1 Vorstellung der Sachverhalte

Die vier ausgewählten Sachverhalte befassen sich hauptsächlich mit vorkommenden Kräften, Drücken und dessen Auswirkungen auf Mensch und Material an Bord eines Flugzeuges in unterschiedlichen Flugphasen bzw. Flugmomenten.

Zunächst soll es um die als im Volksmund bekannten „Luftlöcher“ gehen. Diese bezeichnen das abrupte Absacken des Flugzeuges während des Fluges um einige bis viele Meter. Piloten sprechen dabei eher von Turbulenzen, welche nichts anderes als Luftmassenbewegungen sind. Das heißt, dass es z.B. im Falle eines „Luftloches“ einen Windstoß von oben gibt. Dieser schubst das Flugzeug nach unten, was dann in der Kabine so wahrgenommen wird (Göbel, 2024). Um zu verstehen, dass der Begriff „Luftloch“ irreführend und eigentlich falsch ist, wenn es um die physikalische Beschreibung dieses Phänomens geht, wird sich im ersten Unterrichtsentwurf mit dabei auftretenden Kräften bzw. Scheinkräften beschäftigt. Dabei wird auch über Trägheit bzw. Newtons Axiome gesprochen. Um die Relevanz dieses Sachverhaltes klarzumachen, lässt sich ein *Spiegel*-Beitrag zitieren, welcher über einen Vorfall berichtet, bei dem ein Mensch starb und Dutzende verletzt wurden (Göbel, 2024).

Die etwas reißerische Überschrift „Warum du im Flieger nie ein T-Shirt tragen solltest“ (Sobolewski, 2024) aus dem Internetauftritt der Zeitung *Der Westen* will darauf hinaus, dass es im Falle einer Notlandung mit anschließendem Evakuieren über die aufblasbaren Notrutschen des Flugzeuges zu Reibung der Haut mit der Oberfläche der Rutsche kommen kann. Dies kann zu Verletzungen führen und deshalb wird eher langärmlige Kleidung empfohlen (Sobolewski, 2024). Bei diesem Sachverhalt wird sich also mit Reibungskräften bzw. Reibungsarbeit und der dadurch entstehenden Erwärmung beschäftigt.

Anschließend soll der Sachverhalt des Drucks in der Flugzeugkabine betrachtet werden. Dieser unterscheidet sich nämlich in unterschiedlichen

Flugphasen und ist essenziell für das bei Bewusstsein Bleiben. Außerdem wird es spannend sein, zu überlegen, wie dieser Druckunterschied zwischen innen und außen aufrechterhalten wird und wie ein technischer Defekt dementsprechend zum Druckausgleich führt (Rathje, 2024). Dass es im Falle eines Versagens dieser Druckregulierung zu körperlichen Symptomen – von Ohrenbluten bis Ohnmacht – kommen kann, lässt sich einem Artikel des *Tagesspiegels* entnehmen (Rathje, 2024). Die Notwendigkeit zum Befassen mit diesem Thema ist damit gegeben.

Zuletzt wird sich der Stabilität eines Flugzeugs bzw. genauer der Stabilität der Flugzeugfenster gewidmet. Dabei stellt sich die Frage, warum Flugzeugfenster bzw. deren Rahmen immer rund – und nicht eckig – sind. Diese Fragestellung beinhaltet aber eine Untersuchung von unterschiedlichen Formen, welche unter physischer Belastung stehen und zwischen zwei Polarisationsfolien geklemmt sind. Damit kommt die optische Komponente der Polarisation als Analysemethode ins Spiel. Dieser vierte und damit letzte Sachverhalt lässt sich also schwer nur zu einem physikalischen Thema zuordnen, da zusätzlich noch die Strukturen im Material und damit Betrachtungen auf Molekül- bzw. Atomebene relevant werden. Das die Beschäftigung mit diesem Sachverhalt aber wichtig ist, zeigt ebenfalls die Historie von Flugunfällen. Zunächst hatten Flugzeuge noch eckige Fenster, welche allerdings den entstehenden Druckunterschied zwischen außen und innen beim Steigflug und die übrigen Kräften innerhalb des Flugzeugrumpfes nicht aushalten konnten und zerbarsten (Holleman, 2019).

2.2 Curriculare Verortung der Sachverhalte

Da es keine reinen Lehrpläne mehr gibt, in denen genaue Themen für alle Jahrgangsstufen zu finden sind, lässt sich der Kontext des Fliegens bzw. der Flugsicherheit im Physikunterricht theoretisch jederzeit einbauen. Auch die Sachverhalte der Kräfte und des Drucks müssen damit nicht zwingend in der 8. oder 9. Jahrgangsstufe behandelt werden. Trotzdem lassen sich beide Sachverhalte in der Mittelstufe (Jahrgangsstufe 8/9) platzieren, was sich

beispielsweise auch den Bildungsstandards bzw. dem Kerncurriculum des Landes Hessen entnehmen lässt. Dieses Kerncurriculum steht hierbei und im weiteren Verlauf dieser Arbeit nur beispielhaft für eben solche aus den anderen Bundesländern der Bundesrepublik. Diese sind natürlicherweise nicht komplett deckungsgleich. Da in dieser Arbeit aber hauptsächlich Unterrichtsentwürfe erstellt werden, können diese dann je nach Bundesland, Schulform oder Jahrgangsstufe an unterschiedlichen Stellen eingesetzt werden.

Unter dem Inhaltsfeld „Wettererscheinungen und Klima“ wird zum halben Stundenkontingent auf dem Weg zum Abschluss der 10. Jahrgangsstufe erwartet, dass „Druck als „Gepresstsein“ der Materie“, bzw. spätestens mit Abschluss der 10. Jahrgangsstufe „Druck als physikalische Zustandsgröße“ begriffen wird (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 33).

Spätestens nach der 10. Jahrgangsstufe wird im Inhaltsfeld „Fortbewegung und Mobilität“ erwartet, dass „Wechselwirkungen von Körpern“, „Trägheit eines Körpers“ und „Wirkung von Kräften“ von den Lernenden verstanden sind (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 34).

Die Beschäftigung mit der Wellenoptik in der Oberstufe lässt die „lineare Polarisation [...] von Licht“ als Thema im Unterricht zu (Hessisches Ministerium für Kultus, Bildung und Chancen, 2024, S. 41). Dies lässt sich im Zuge der „elektromagnetischen Wellen“ verwirklichen, welche in Hessen für die Q3 und damit das dritte Halbjahr der Oberstufe vorgesehen sind (Hessisches Ministerium für Kultus, Bildung und Chancen, 2024, S. 41). Die inhaltliche Komponente der Struktur von Materie – vor allem Festkörpern – lässt sich nicht eindeutig an eine Stelle des Kerncurriculums einordnen, könnte aber sowohl in die Q3 zu „Brechung, Reflexion und Beugung elektromagnetischer Wellen“ (Hessisches Ministerium für Kultus, Bildung und Chancen, 2024, S. 41) als auch in die Q4 zu „Festkörperphysik“ (Hessisches Ministerium für Kultus, Bildung und Chancen, 2024, S. 46-47) passen.

Diese drei curricularen Verortungen der Sachverhalte Kräfte, Druck und Wellenoptik sowie Materialstruktur lassen es somit zu, den Kontext des Fliegens in der Schule zu realisieren, indem die folgenden vier

Unterrichtseinheiten in der Mittelstufe, z.B. in Klasse 8 oder spätestens in Klasse 9, und in der Oberstufe, z.B. in der Q3 oder eher Q4, durchlaufen werden.

2.3 Erweiterung auf andere Sachverhalte

Natürlich sind die bereits mehrfach erwähnten und im Folgenden präsentierten Sachverhalte bzw. Unterrichtseinheiten nicht die einzigen, in denen sich der Kontext des Fliegens anwenden lässt. Ein weiterer möglicher Sachverhalt ist zum Beispiel die bis zu 100-fach höhere Strahlendosisleistung auf einer Flughöhe von ca. 10 km im Vergleich zur Meereshöhe (Breckow & Frank, 2014). Dies lässt sich in das Inhaltsfeld „Physik in der Verantwortung“ einordnen und könnte demnach auch in Klasse 9 durchgeführt werden. Im Kerncurriculum heißen diese inhaltlichen Schwerpunkte dann „radioaktive Zerfallsprozesse“ oder „Auswirkungen verschiedener Strahlungsarten“ (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 37). Soll das Thema der Strahlung in Flughöhe weniger phänomenologisch und mehr mathematisch erschlossen werden, bietet sich hier ebenfalls die Oberstufe bzw. Q4 in Hessen an, wo sich der Kontext der „Kernphysik“ bzw. genauer der „radioaktiven Strahlung“ anbietet (Hessisches Ministerium für Kultus, Bildung und Chancen, 2024, S. 45-46). Ein Gefühl für die Relevanz dieses Themas lässt sich durch folgenden Vergleich bekommen: Die Strahlendosis auf einen Menschen während eines Fluges über den Atlantik ist in etwa vergleichbar mit der Strahlendosis durch eine Röntgenaufnahme (Breckow & Frank, 2014). Zu Röntgenaufnahmen werden Blei-Kittel angezogen und das medizinische Personal, das die Messung durchführt, verlässt jedes Mal den Röntgen-Raum, um nicht dauerhaft einer höheren Strahlungsbelastung ausgesetzt zu sein.

Ein weiterer möglicher Sachverhalt ist die Strömungslehre im Sinne der Berücksichtigung des Luftwiderstandes beim Fliegen. Diese Überlegung beinhaltet, eine Kräftebilanz aller auf das Flugzeug bzw. die Flügel wirkenden Kräfte aufzusetzen. In diesem Zusammenhang kann motivational auch die

Frage beantwortet werden, warum ein Flugzeug überhaupt fliegt. Damit passt die Thematik des Fliegens insgesamt in den Sachverhalt der Kräfte in der 8. Jahrgangsstufe.

In dieser Arbeit werden die Sachverhalte der Strahlung und der Strömung nicht weiter berücksichtigt, da sich hierzu zwar auch Experimente durchführen lassen, die dazugehörigen Unterrichtsideen aber den Rahmen der Arbeit sprengen würden. Außerdem soll diese Arbeit nicht jeden möglichen Unterrichtsentwurf vorwegnehmen, sondern hauptsächlich als Anreiz dienen, Flugsicherheit als Kontext im Unterricht zu verwenden. Dennoch bieten sich die beiden zusätzlich erwähnten Sachverhalte für den Kontext der Flugsicherheit im Physikunterricht an, da hierzu neben Experimenten auch viele Rechnungen und Zeichnungen zum Strahlungsbelastungsverlauf während eines Fluges oder zu den Stromlinienformen um einen Flügel erstellt oder zumindest analysiert werden können. Das hiesige Unterkapitel soll demnach Anregung sein, um weitere Sachverhalte bzw. Inhaltsfelder der Mittel- und Oberstufe mit dem Kontext „Sicherheit im Flugzeug“ zu belegen.

3 Kontexte als sinnvoller Rahmen im Physikunterricht?

Wie im hiesigen Kapitel zu lesen ist, beschäftigen sich viele Arbeiten und Forschungen mit der Frage, wie sinnvoll Kontext im Physikunterricht überhaupt ist. Dazu ist zunächst ein Kontextbegriff notwendig, welcher dann beschreiben kann, wie der „Kontext“ der Flugsicherheit im Physikunterricht zu verwenden ist. Mit diesem Kapitel soll allerdings eher eine Berechtigung dazu gegeben werden, den Physikunterricht bewusst kontextorientiert zu gestalten. Daher folgt nun nur ein kleiner Einblick in die Diskussion um den Kontextbegriff und den Sinn eines Kontextes an sich.

In den meisten Fällen wird ein abstrakter Sachverhalt der Physik, z.B. die Energieerhaltung, kontextualisiert, indem er in Bezug zu Gegenständen und Alltagsanwendungen gesetzt wird, welche den Lernenden eventuell aus ihrem eigenen Leben bekannt sind. In diesem Fall könnte es also beispielsweise um das Fahren einer Achterbahn gehen, welche potenzielle Energie aufgrund ihrer

Höhe in kinetische Energie umwandelt und damit beim Hinabfahren an Geschwindigkeit zulegt. Durch diese Kontextualisierung soll zusätzlich die Relevanz des physikalischen Sachverhalts deutlich werden (Parchmann & Kühl, 2018, S. 195) und den Lernenden soll zudem die Frage „Warum sollen wir das Lernen?“ beantwortet werden (Merzyn, 2015, S. 5). Durch diese Verknüpfung von Fachwissen und Alltagsgegenständen bzw. -phänomenen steigt die Chance, dass die Lernenden physikalische Sachverhalte reproduzieren und auf andere Sachverhalte anwenden können, wenn sie im Alltag durch damit verknüpfte und bereits bekannte Kontexte daran erinnert werden (Merzyn, 2015, S. 5).

Dementsprechend formuliert Zügge (2021, S. 539) eine passende Definition für den Kontextbegriff, welche dieser Arbeit zugrunde liegen wird:

„Kontextualisierung“ im aktiv-didaktischen Sinn bezeichnet die Berücksichtigung, Aufnahme oder Inszenierung eines präexistierenden Gegenstandes, „Kontext“ genannt, welcher für die fachlogische Beschreibung optional ist, mit dem Zweck die Erschließung des Fachkonzeptes und/oder des Kontextes selbst durch die Aufnahme einer distinguierten und als relevant wahrgenommenen Dimension zu unterstützen.

Mit „distinguierter und als relevant wahrgenommener Dimension“ ist der zusätzlich in den Unterricht gebrachte Kontext, z.B. Achterbahn, gemeint.

Allerdings gilt es zwischen eben dieser Kontextualisierung eines Sachverhaltes durch ein Alltagsbeispiel und einer alternativen Interpretation des Begriffs „Kontext“ zu unterscheiden. So spricht Finkelstein (2005, S. 1206) von „the role of context, local situation and even local culture“ als zu berücksichtigende Aspekte des Kontextbegriffs. Weiter schreibt er (2005, S. 1207): „[It’s] not only what is happening in their classrooms, but why and how it is happening.“ Es geht also um den Kontext, in dem die Lernenden lernen. Das betont den Kontext des Klassenraums als Lernort oder die Art der Aufgaben als Kontext, in dem die Lernenden etwas Neues erlernen.

Da aber, wie beschrieben, die Lernumgebung und die dynamische kognitive und emotionale Entwicklung der Lernenden im bisherigen Kontextbegriff nicht

berücksichtigt wurden, erweitert Zügge (2021, S. 542) seine Kontextdefinition um folgende Passage:

„Innere Kontexte“ sind Kontexte im Sinne der formulierten Definition, die sich aus der Bearbeitung von Entwicklungsaufgaben ergeben. „Entwicklungssensible Kontextualisierung“ bezeichnet eine Kontextualisierung im Sinne der gegebenen Definition, die innere Kontexte aufnimmt.“

Diese Erweiterung der Kontexte auf innere Kontexte gelingt beispielsweise durch „Impulsfragen“ (mit dem Ziel der „Entwicklung“ der Lernenden), welche die Zusammenhänge des Unterrichts betrachten und so ein Netz der verschiedenen Sachverhalte aus dem Unterricht kreieren (Zügge, 2021, S. 542). Diese Impulsfragen können von Seiten der Lernenden kommen oder durch die Lehrkraft geplant sein. Bei dieser Vernetzung des Wissens ist ein Kontext also deshalb hilfreich, weil er „[verschiedene] Teilgebiete aus vielen anderen Disziplinen aufweist“ (Kepler, 2017, S. 14). Der Kontext der Sicherheit beim Fliegen tangiert viele verschiedene physikalische Sachverhalte und verknüpft sie in den Köpfen der Lernenden miteinander. Eine mögliche Impulsfrage könnte also sein: *Warum nimmt man so ein raues Material für eine Sicherheitsrutsche im bzw. am Flugzeug, wenn dort die Gefahr der Verbrennung an den Händen durch Reibung besteht?* Es geht also auch darum, durch unterrichtliche Überlegungen der Lehrkraft bzw. das situative Aufgreifen von Fragen der Lernenden eine kritische bzw. neugierige Grundhaltung zu fördern und damit nicht nur den Unterricht, sondern auch die Entwicklung der Lernenden weiterzubringen.

Internationale Studien wie TIMSS 1995 oder PISA 2000 zeigen, dass es nicht nur ein niedriges Interesse an Naturwissenschaften gibt, sondern auch dass das von den Bildungsstandards geforderte Verständnis von fachlichen Konzepten, die dann auf verschiedene reale Sachverhalte angewandt werden sollen (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 15), nicht ausreichend vorhanden ist (Duit & Mikelskis-Seifert, 2007, S. 7). Da PISA aber untersucht, „inwieweit Schülerinnen und Schüler ihr Wissen bei Aufgabenstellungen flexibel anwenden und erfolgreich nutzen können“ (Prenzel, Carstensen, Frey, Drechsel & Rönnebeck, 2007, S. 32), lässt sich schlussfolgern, dass dies keine ausreichende Rolle im Unterricht zu spielen scheint (Duit & Mikelskis-Seifert,

2007, S. 7). Der Verwendung von Kontexten im Physikunterricht wird allerdings hinsichtlich Motivation und Lernleistung der Lernenden großes Potential zugeschrieben (Kuhn, 2010, S. 265), da so das Herangehen der Lernenden an neue Alltagsbeispiele eher und mit mehr physikalischem Sachverstand passieren kann.

Außerdem sei noch gesagt, dass im Physikunterricht oft Dinge getan werden, die sonst nirgendwo getan werden, z.B. Klötze schiefe Ebenen hinunterrutschen zu lassen. Dazu werden Dinge benutzt, die sonst nicht benutzt werden, z.B. traditionelle Kraftmesser, und Begriffe verwendet, die nur im Physikunterricht vorkommen, z.B. Hangabtriebskraft (Müller, 2006, S. 102). Diesem doch sehr als fremd empfundenen Physikunterricht kann mit dem Hinzugeben eines Kontextes mehr Verbindung zur Realität der Lernenden gegeben werden. Zumal laut einer Studie von Berger (2000, S. 175-218) Kontexte das Interesse der Lernenden fördern – vor allem bei sonst unterdurchschnittlich motivierten Lernenden. Gleichzeitig zeigt die Studie aber auch, dass der kontextorientierte Unterricht im Vergleich zum Unterricht ohne Kontext keinen signifikanten Unterschied bezüglich des Lernerfolges auf Seiten der Lernenden zeigt. Nicht nur, weil dies nur das Ergebnis einer *einzelnen* Studie ist, sondern auch weil es hier nur um einen konkreten medizinischen Kontext geht, lässt sich kein eindeutiger Schluss ziehen, dass Kontexte im Physikunterricht nicht hilfreich für das Lernen wären. Zudem gibt es viele Befürchtungen, die bezüglich kontextorientierten Unterrichts geäußert werden. So können Kontexte den Unterricht erschweren, vom eigentlichen Fachinhalt ablenken oder nicht in adäquater Zeit bearbeiten werden (Parchmann, Gräsel, Baer, Nentwig, Demuth & Ralle, 2006, S. 11). Es zeigt sich, dass zur Effektivität von Kontext im Physikunterricht noch mehr geforscht werden sollte und bisher keine einigermaßen eindeutige Bewertung möglich ist.

Wird der Kontext des Physikunterrichtes allerdings an die Lernenden und die Lebensrealität angenähert, lassen sich durchaus Argumente für die Verwendung von Kontexten im Physikunterricht finden. Dabei sind Kontexte als inhaltliche Realitätsstütze und als Rahmen für das Lernen der Lernenden

im Unterricht zu sehen. Dementsprechend wird in den folgenden Unterrichtsentwürfen sowohl inhaltlich auf die Sicherheit beim Fliegen als auch auf die didaktische und methodische Unterrichtsgestaltung geachtet, welche es den Lernenden ermöglicht, Flugsicherheit mit physikalischen Sachverhalten zu verknüpfen. Duit und Mikelskis-Seifert (2007, S. 7) empfehlen bzw. bieten sogar Unterrichtsideen zur Verkehrssicherheit an, um die in der Mittelstufe eher schwerwiegende und unbeliebte Mechanik zu unterrichten.

4 Theoretischer Hintergrund

4.1 Luftloch: Newton'sche Axiome & Bezugssysteme

Der Zusammenhang zwischen der Bewegung eines Körpers und den in dieser Situation wirkenden Kräften fasste Newton in seinen drei Newton'schen Axiomen zusammen. Diese entsprechen drei aus der Erfahrung gewonnenen Grundannahmen und sind essenziell für das Verständnis der klassischen bzw. Newton'schen Mechanik (Demtröder, 2021, S. 53).

Das erste Newton'sche Axiom besagt (Demtröder, 2021, S. 53):

Jeder Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen gradlinigen Bewegung, solange keine Kraft auf ihn wirkt.

Da es für das Verständnis dieses Zusammenhangs zwischen Bewegung eines Körpers und der in diesem Fall nicht existierenden Kraft auf den Körper nicht wichtig ist, zwischen Geschwindigkeit und Impuls zu unterscheiden, wird dies hier nur kurz angerissen.

Um den Bewegungszustand eines Körpers zu messen, wird also der Impuls p eingeführt, welcher sich mittels

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

bzw. im Eindimensionalen mittels

$$p = m \cdot v$$

bestimmen lässt. Dabei steht $\vec{v}$ bzw. v für die Geschwindigkeit des Körpers und m für dessen Masse.

Folglich kann eine Bewegungsänderung oft auch als dazu proportionale Geschwindigkeitsänderung interpretiert werden, da sich für gewöhnlich die Masse des Körpers während der Bewegung nicht gravierend ändert. Dabei werden sowohl die Effekte der Relativitätstheorie als auch das Verringern des mittransportierten Treibstoffs über die Zeit vernachlässigt. Das erste Newton'sche Axiom kann somit auch wie folgt beschrieben werden (Demtröder, 2021, S. 54):

Der Impuls eines freien [Körpers] ist zeitlich konstant.

Diese Eigenschaft eines Körpers, in seinem Bewegungszustand zu verharren, wenn keine Kraft auf ihn wirkt, nennt sich auch *Trägheit* (Demtröder, 2021, S. 55).

Weiterführend sei noch gesagt, dass für den Fall, dass eine Impulsänderung eines Körpers zu beobachten ist, eine Kraft auf diesen Körper wirken muss bzw. musste. Dementsprechend ergibt sich das zweite Newton'sche Axiom zu (Demtröder, 2021, S. 54):

Da wir die Ursache der Impulsänderung in der auf [den Körper] wirkenden Kraft sehen, definieren wir diese Kraft als:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Mit

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

ergibt sich:

$$\vec{F} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{dm}{dt} \cdot \vec{v}$$

Da aber meistens keine Massenänderung über die Zeit wahrzunehmen ist, vereinfacht sich dies zu:

$$\vec{F} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt}$$

bzw.

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

mit der Beschleunigung $\vec{a}$.

Ein Spezialfall davon ist zum Beispiel die Gravitationskraft der Erde, welche auf umgebende Körper wirkt (mit der Erdbeschleunigung $g \approx 9,81 \frac{m}{s^2}$ (Demtröder, 2021, S. 46)):

$$\vec{F} = m \cdot \vec{g}$$

Beim Betrachten der Newton'schen Gesetze gehen wir von einem *abgeschlossenen System* aus, was bedeutet, dass die darin miteinander wechselwirkenden Körper keine Wechselwirkung mit außerhalb des betrachteten Systems existierenden Körpern haben (Demtröder, 2021, S. 54).

Das dritte Newton'sche Axiom betrachtet zunächst nur zwei Körper in diesem abgeschlossenen System, welche miteinander wechselwirken. Das heißt, dass Körper 1 mit Masse m_1 eine Kraft $\vec{F}_{12}$ auf Körper 2 mit Masse m_2 auswirkt. Andererseits wirkt auch durch Körper 2 eine Kraft $\vec{F}_{21}$ auf Körper 1. Newton stellte fest, dass diese beiden Kräfte nun entgegengesetzt wirken und vom Betrag her gleich groß sind. Das dritte Newton'sche Axiom lässt sich daher vereinfacht wie folgt formulieren (Demtröder, 2021, S. 54):

$$actio = reactio$$

bzw.

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$$

Dies lässt sich auch wieder mittels Impulsen beschreiben. Dazu lässt sich feststellen, dass in abgeschlossenen Systemen unter anderem die Impulserhaltung gilt:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = const.$$

Demnach folgt:

$$\frac{d\vec{p}_1}{dt} + \frac{d\vec{p}_2}{dt} = \vec{0}$$

Wie nach dem zweiten Newton'schen Axiom aber bereits beschrieben, folgt daraus aber, weil sich der Impuls $\vec{p}_1$ des Körpers 1 durch die Kraft $\vec{F}_{21}$ von Körper 2 auf Körper 1 ändert (und analog andersherum):

$$\vec{F}_{21} + \vec{F}_{12} = \vec{0}$$

bzw.

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$$

Dieses Wechselwirkungsprinzip findet sich nicht nur in Phänomenen wie der Gravitation und ihren anziehenden Kräften wieder, sondern lässt sich auch in kleinen Experimenten wie dem Ziehen an einer befestigten Federwaage mit einer weiteren mobilen Federwaage nachvollziehen. Dabei zeigen dann beide Federwaagen den gleichen Kraftbetrag an, obwohl die experimentierende Person nur an einer Feder aktiv zieht (Demtröder, 2021, S. 55).

Nun ist die Beschreibung einer Bewegung, wie die eines absackenden Flugzeugs durch einen vertikalen Luftstoß bzw. die des währenddessen im Flugzeug befindlichen Passagiers, mittels Newton'schen Axiomen möglich. Gleichzeitig sei aber gesagt, dass beim Erklären mittels des zweiten Newton'schen Axioms eine ruhende Beobachtungsperspektive von außerhalb des Flugzeugs eingenommen wird. Solche Beobachtungsperspektiven werden als Bezugssysteme bezeichnet. Es lässt sich auch die Perspektive eines mitfliegenden Passagiers einnehmen. Dieser wird dann augenscheinlich im Flugzeug nach oben gezogen bzw. gedrückt. Diese zu beobachtende Beschleunigung nach oben beruht auf einer Trägheitskraft, welche es nicht wirklich gibt, sondern nur im subjektiven Bezugssystem des Passagiers zu spüren ist. Daher wird sie auch Scheinkraft genannt (Demtröder, 2021, S. 89-90).

4.2 Notrutsche: Reibung, Arbeit, Temperatur

Um die Reibungsarbeit bei Reibungsprozessen formal darstellen zu können, ist es zuvor notwendig die Reibungskräfte zu erläutern. Bei Reibungsprozessen berühren sich (mindestens) zwei gleiche oder verschiedene Materialien und

bewegen sich bei anhaltender Berührung relativ zueinander. Allerdings kann es auch eine Reibungswirkung geben, wenn sich die Körper nicht relativ zueinander bewegen. Dieser Fall wird in diesem Kapitel auch betrachtet.

Der Grund bzw. Antrieb dieser Bewegung kann motorisiert (z.B. durch einen Motor in einem Auto) erfolgen. In diesem Fall würden dann die runden Reifen aus Gummi auf der ebenen Straße aus Asphalt rollen. Diese Reibungsart nennt sich Rollreibung und ist im Vergleich zu den anderen beiden, welche im Folgenden erklärt werden, am kleinsten. Das bedeutet, dass die Rollreibungskraft $\vec{F}_{RR}$ bei Verwendung gleicher Materialpaare (z.B. Gummi und Asphalt) und gleicher Massen der reibenden Objekte kleiner ist als die Gleitreibungskraft $\vec{F}_{GR}$ und die Haftreibungskraft $\vec{F}_{HR}$. Da die Rollreibungskraft aber nicht in der hierzu entworfenen Unterrichtseinheit vorkommt, wird diese in diesem theoretischen Kapitel nicht weiter erläutert.

Die relative Bewegung des ersten Körpers zum anderen kann aber auch durch die Gravitationskraft der Erde auf den ersten Körper hervorgerufen werden und damit nicht künstlich motorisiert sein. In einem solchen Fall braucht es eine schiefe Ebene, die als Teil der Erde angesehen wird, sodass die senkrecht zum Erdboden zeigende und auf den oberen Körper wirkende Gewichtskraft in seine Kraftkomponenten zerlegt werden kann und es somit eine die schiefe Ebene hinunterziehende Kraft gibt, welche den oberen Körper beschleunigt. Erst dann kann eine Beschleunigung vorliegen und wir können visuell nachvollziehbar von der Wirkung einer Reibungskraft sprechen. Eine solche schiefe Ebene inkl. aller bereits zu berücksichtigenden Kräfte findet sich in Abbildung 1 wieder.

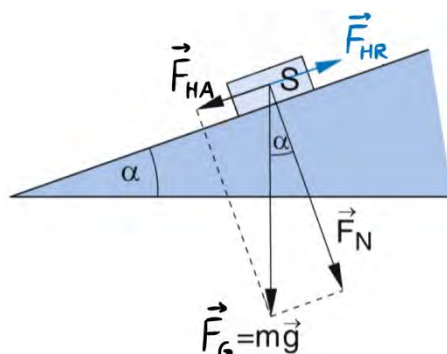


Abbildung 1: schiefe Ebene inkl. aller zu berücksichtigenden Kräfte zur Betrachtung der Auswirkungen von Reibungskräften; hier beispielhaft eingezeichnet: Haftreibungskraft (Demtröder, 2021, S.189, bearbeitet)

Ein beliebiger Körper mit der Masse m wird auf der Erde mit der Erdbeschleunigung $\vec{g}$ zur Erde hin beschleunigt. Diese beiden Faktoren ergeben die Gewichtskraft $\vec{F}_G = m \cdot \vec{g}$ auf den Körper. Da diese senkrecht zum Horizont „nach unten“ wirkt, der Körper aber auf einer schiefen Ebene liegt, lässt sich $\vec{F}_G$ in zwei Bestandteile zerlegen, welche senkrecht und parallel zur Oberfläche der schiefen Ebene liegen. Der senkrechte Anteil wird Normalkraft $\vec{F}_N$ und der den Hang hinabzeigende Anteil Hangabtriebskraft $\vec{F}_{HA}$ genannt. Insgesamt muss sich im Sinne der Vektoraddition von Kraftpfeilen ein Parallelogramm bzw. hier sogar ein Rechteck ergeben. Die Hangabtriebskraft $\vec{F}_{HA}$ zieht nun den Körper schräg hinab. Noch muss sich der Körper aber nicht bewegen, da die beiden Oberflächenmaterialien des Körpers und der schiefen Ebene womöglich so rau sind, dass die Reibung zwischen ihnen zu stark ist. In der Sprache der Kräfte muss es also eine betragsmäßig mindestens genauso große Kraft geben, welche der Hangabtriebskraft entgegenwirkt. Da der Körper bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht *hinabgleitet*, sondern noch *haftet*, wird die die schiefe Ebene hinaufzeigende Kraft *Haftreibungskraft* $\vec{F}_{HR}$ genannt. Die Haftreibung sorgt also bisher für keine Bewegung. In einem solchen Fall muss also gelten:

$$\vec{F}_{HR} \geq \vec{F}_{HA}$$

Sollte der Körper auf der schiefen Ebene aber anfangen hinabzugleiten, muss folglich gelten:

$$\vec{F}_{HR} < \vec{F}_{HA}$$

Nun gleitet der Körper die schiefe Ebene hinab, da die Hangabtriebskraft $\vec{F}_{HA}$ größer ist als die Haftreibungskraft $\vec{F}_{HR}$. Da weder der Körper seine Masse noch die Ebene ihre Neigung ändert, bleibt die Hangabtriebskraft $\vec{F}_{HA}$ während des Hinabgleitens gleich groß. Auch beim Hinabgleiten berühren sich aber immer noch die gleichen beiden Materialien, sodass es auch hier eine Reibungskraft geben muss, welche der Bewegung entgegenwirkt. Diese wird Gleitreibungskraft $\vec{F}_{GR}$ genannt und ist betragsmäßig kleiner als die Haftreibungskraft $\vec{F}_{HR}$, da sich die womöglich rauen Oberflächen von Körper

und schiefer Ebene beim aufeinander Ruhen noch mehr ineinander verhaken konnten als beim aneinander Hinabgleiten (siehe Abbildung 2). Außerdem können Teile von Oberflächen beim aneinander Reiben abbrechen (z.B. Kreide) oder sich zeitweise verformen (z.B. Leder).

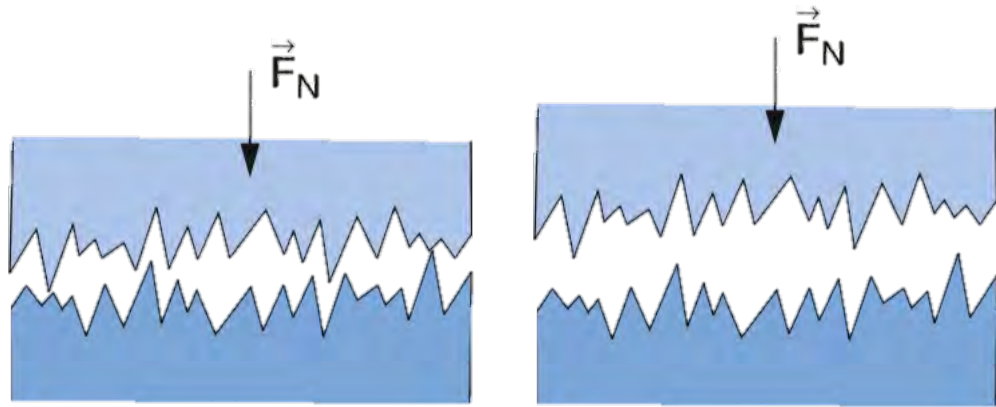


Abbildung 2: aneinander Haften (links) bzw. Gleiten (rechts) der rauhen Oberflächen von Körper und schiefer Ebene zur Erklärung der Größenverhältnisse von Haftreibungskraft und Gleitreibungskraft (Demtröder, 2021, S. 189, bearbeitet)

Theoretisch könnte sich daher die Hangabtriebskraft $\vec{F}_{HA}$ sogar verringern und der Körper würde in dieser Konstellation trotzdem weiter hinabgleiten, da die dem Hinabgleiten entgegenwirkende Gleitreibungskraft $\vec{F}_{GR}$ kleiner ist als die zu Beginn des Hinabgleitens noch wirkende Haftreibungskraft $\vec{F}_{HR}$. Anders gesagt, könnte die schiefe Ebene in ihrer Neigung auch weniger steil sein und der Körper würde trotzdem hinabgleiten. Wenn ein Körper also die schiefe Ebene hinabgleitet oder sogar noch beschleunigt, gilt:

$$\vec{F}_{GR} \leq \vec{F}_{HA}$$

Sollte der Körper während dem Hinabgleiten langsamer werden und stoppen, muss gelten:

$$\vec{F}_{GR} > \vec{F}_{HA}$$

Nun bleibt die Frage offen, wie sich die betragsmäßige Größe der beiden Reibungskräfte bestimmt. Unterschiedlichen Materialpaarungen von Körpern

und schiefen Ebenen lassen sich unterschiedlich große Reibungskoeffizienten zuordnen. Diese Koeffizienten beschreiben einheitenlos, wie groß die Reibung zwischen zwei unterschiedlichen Materialien ist. Um aus dieser einheitenlosen Größe aber eine Reibungskraft zu bekommen, muss sie mit einer Kraft multipliziert werden. Die entscheidende Kraft, welche ein Maß dafür sein kann, wie sehr die beiden Materialien aneinander reiben bzw. wie sehr sie sich verhakt haben, ist die Normalkraft $\vec{F}_N$ (siehe Abbildung 2), da diese nur den zur Oberfläche der schiefen Ebene senkrechten Teil darstellt und damit beschreibt, wie groß die auf die gemeinsame Berührungsfläche „aufdrückende“ Kraft ist (siehe Abbildung 1). So ergeben sich folgende Formeln zur Berechnung der beiden Reibungskräfte mittels Haftreibungskoeffizienten μ_{HR} , Gleitreibungskoeffizienten μ_{GR} und Normalkraft $\vec{F}_N$:

$$\vec{F}_{HR} = \mu_{HR} \cdot \vec{F}_N$$

$$\vec{F}_{GR} = \mu_{GR} \cdot \vec{F}_N$$

Die nun daraus resultierende Reibungsarbeit W_{GR} ergibt sich über die Kraftwirkung der Gleitreibungskraft $\vec{F}_{GR}$ über die hinabgeglittene Strecke $\vec{s}$ hinweg, da dies die zu verrichtende Arbeit des Körpers ist, um die während des Hinabgleitens wirkende Gleitreibungskraft $\vec{F}_{GR}$ aufzubringen. Je länger die Strecke $\vec{s}$ ist, welche der Körper hinabgleitet, desto höher ist dementsprechend auch die Reibungsarbeit W_{GR} . Es ergibt sich folgender formaler Zusammenhang:

$$W_{GR} = \vec{F}_{GR} \cdot \vec{s}$$

Dieser gilt allerdings nur für die Gleitreibung, da bei der Haftreibung keine Bewegung zu beobachten ist und somit auch keine Strecke $\vec{s}$ zurückgelegt wird.

Die mit Reibungsarbeit einhergehende Temperaturerhöhung der aneinanderreibenden Körper bzw. schiefen Ebenen lässt sich auf mikroskopischer Ebene erklären. Sowohl der Körper als auch die schiefe Ebene bestehen je nach Material aus verschiedenen Molekülen bzw. Atomen,

welche sich aufgrund ihrer Freiheitsgrade bzgl. Schwingung und Rotation in Feststoffen bewegen können. Diese Bewegungen finden nur auf mikroskopischer Ebene statt. Die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der einzelnen Moleküle bzw. Atome lassen sich aber bei Betrachtung vieler benachbarter Moleküle bzw. Atome zu einer bestimmten Geschwindigkeit mitteln. Dieser mittleren Geschwindigkeit lässt sich ein Wert für die mittlere kinetische Energie der Moleküle bzw. Atome zuordnen. Makroskopisch ist diese mittlere kinetische Energie der Moleküle bzw. Atome anhand der Temperatur des gesamten Materials zu beobachten. Es ergibt sich folgender formaler Zusammenhang für die mittlere kinetische Energie $\overline{E_{kin}}$ mit der Boltzmann-Konstante $k = 1,380649 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$ (Demtröder, 2021, S. 28) und der Temperatur T :

$$\overline{E_{kin}} = \frac{1}{2} kT$$

Diese Temperatur kann dazu noch steigen, indem das Material mit einem anderen Material reibt. Auf mikroskopischer Ebene bedeutet das, dass die Moleküle bzw. Atome des Körpers mit denen der schieben Ebene stoßen und somit teilweise deutlich höhere Geschwindigkeiten aufweisen als die bisherige mittlere Geschwindigkeit der Moleküle bzw. Atome. Dies führt wiederum zu einer höheren mittleren kinetischen Energie der Moleküle bzw. Atome, was dann zu einer Temperaturerhöhung an den reibenden Oberflächen der Materialien führt. Dies lässt sich dann makroskopisch mit einer Wärmebildkamera beobachten.

Neben dieser mikroskopischen Erklärung für die bei Reibungsprozessen zu beobachtende Temperaturerhöhung lässt sich auch eine makroskopische und auf Energiebetrachtung beruhende Erklärung dafür finden. Dem sich bewegenden Körper lässt sich je nach seiner Geschwindigkeit ein Wert für seine kinetische Energie zuordnen. Die Arbeit, die benötigt wird, um den Körper auf diese Geschwindigkeit zu bringen, ist betragsmäßig kleiner als der Wert der aktuellen kinetischen Energie des Körpers. Das liegt daran, dass ein Teil der Energie in thermische Energie umgewandelt wird und sich als Temperaturerhöhung beobachten lässt, wenn es Reibung gibt.

Dementsprechend lässt sich auch diese makroskopische Erklärung über Energien und dessen Umwandlungsprozesse verwenden.

4.3 Kabinendruck: Druck & Höhe

Die beiden später in Kapitel 5.3 vorgestellten Experimente werden auch hier in der theoretischen Betrachtung unterteilt. Zunächst wird sich mit den notwendigen physikalischen Grundlagen beschäftigt, um das Aufbrechen oder Reißen von abgedichteten Gefäßen mit hohem inneren Druck in einer Umgebung mit niedrigerem Druck zu erklären. Danach folgen eine Betrachtung des Luftdrucks und dessen Abnahme mit steigender Höhe in der Atmosphäre.

Das Formelzeichen für Druck ist p und die Einheit wird standardmäßig mit 1 Pa (Pascal) angegeben. Dies entspricht per Definition $1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ und beschreibt damit beispielsweise die Kräfte, die die Gasmoleküle/-atome in einem abgedichteten Gefäß von innen auf einen bestimmten Flächenbereich der Außenwände des Gefäßes ausüben (Wilhelm, Schecker & Hopf, 2021, S. 212).

Um solche Gase zu beschreiben, werden verschiedene Zustandsgrößen benötigt, welche unterschiedliche Eigenschaften des Gases aufgrund äußerer Gegebenheiten benennen. Bei Vollständigkeit aller dieser Eigenschaften des Gases lässt sich sein Zustand bzw. der des Systems genau bestimmen. Neben der energetischen Betrachtung und chemischen Zusammensetzung des Gases gehören zu den Zustandsgrößen auch noch der Druck p , das Volumen V und die Temperatur T . Diese physikalischen Größen lassen sich nun in einem Gesetz für ideale Gase zusammenführen. Dieses lautet:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Dabei bezeichnet $R = 8,314 \text{ J/mol K}$ die universelle Gaskonstante und $n = N/N_A$ die Stoffmenge des Gases in mol . Durch Einsetzen von $R = k_B \cdot N_A$ und $n = N/N_A$ lässt sich eine weitere Schreibweise des idealen Gasgesetzes entnehmen:

$$p \cdot V = N \cdot k_B \cdot T$$

Bei dieser Umformung bezeichnet $k_B = 1,38065 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ die Boltzmannkonstante, $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} / \text{mol}$ die Anzahl der Gasmoleküle/-atome pro *mol* und N die absolute Anzahl der Gasmoleküle/-atome. Alle Werte und Formeln lassen sich als Literaturwerte in Lehrwerken nachprüfen (vgl. z.B. Demtröder, 2021).

Ideales Gas meint hier, dass einige Annahmen getroffen werden, die das Rechnen einfacher machen, aber nicht nur näherungsweise der Realität entsprechen. Dazu zählt zum einen, dass es keine Wechselwirkung zwischen den Gasteilchen gibt, also keine anziehenden oder abstoßenden Kräfte. Außerdem stoßen die Gasteilchen ausschließlich und perfekt elastisch, sodass bei den Stößen keine Energie (z.B. in Form von Wärme) frei wird. Als drittes wird angenommen, dass die Gasteilchen selbst kein Volumen einnehmen, sondern nur eine Masse haben.

Natürlich gibt es auch ein Gesetz für reale Gase, auf welches in dieser Arbeit aber nur kurz eingegangen wird, da es für das Erklären der beiden in Kapitel 5.3 vorgestellten Experimente nicht notwendig ist und den inhaltlichen Anforderungsbereich einer Klasse in der Mittelstufe überschreitet.

Reales Gas bedeutet hier, dass die Wechselwirkungen bzw. Kräfte der Gasteilchen untereinander in Form eines addierten Binnendrucks $p_B = a/V_M^2$ mit einer gasabhängigen Konstanten a bzgl. des Molvolumens V_M zur bisherigen Gleichung hinzugefügt werden. Außerdem werden die Volumina der Gasteilchen selbst in Form des vierfachen Eigenvolumens $b = 4 \cdot N_A \cdot V_a$ bzgl. des Teilchenvolumens V_a abgezogen. Die sogenannte van-der-Waals-Gleichung lautet also:

$$(p + a/V_M^2) \cdot (V_M - b) = R \cdot T$$

Bei erneutem Betrachten der Gleichung des idealen Gasgesetzes lässt sich also unter anderem folgende Schlussfolgerung ziehen, welche sich auch im vorgestellten Experiment in Kapitel 5.3 beobachten lässt: Bei gleichbleibendem, verfügbarem Volumen V unter der Glasglocke und einer konstanten Temperatur T kann sich nur der Druck p verändern, wenn die Teilchenanzahl N durch das Raussaugen von Luft mittels Pumpe verringert

wird. Da es sich um eine Gleichung handelt, welche nur mit Multiplikationen auskommt und damit nur Proportionalitäten beschreibt, bedeutet eine niedrigere Teilchenanzahl N auch einen niedrigeren Druck p . Geschlossene Hohlkörper innerhalb dieser Umgebung sinkenden Drucks halten ihren Innendruck nahezu konstant, da sie abgedichtet sind. Dies führt bei sinkendem Umgebungsdruck zu einer immer größer werdenden Druckdifferenz zwischen Innendruck und Umgebungsdruck. Dem kann das Material irgendwann nicht mehr standhalten, sodass es reißt oder platzt.

Allerdings lässt sich auch ein Druck angeben, wenn sich ein Gas nicht in einem übersichtlich abgegrenzten Gefäß befindet. So herrscht auch ein Druck in der uns umgebenden Atmosphäre, welche durch die Gravitationskraft der Erde auf die Moleküle/Atome der Luft begrenzt wird. Somit muss in niedrigeren Höhen ein höherer Luftdruck herrschen, da über der betrachteten Höhe mehr Gasmoleküle/-atome zu finden. Weit oben in der Atmosphäre ist die Luft dünner und es befinden sich nicht mehr so viele Gasmoleküle/-atome oberhalb dieser bereits hohen Luftschicht. Auf Meeresniveau lässt sich demnach ein Normaldruck von $p_0 = 101.325 \text{ Pa}$ feststellen, was $p_0 = 1,01325 \text{ bar}$ entspricht (Demtröder, 2021, S. 203). Die Abnahme des Luftdrucks mit steigender Höhe in der Atmosphäre ist allerdings nicht linear, sondern ähnelt eher einem exponentiellen Verlauf. So ergibt sich folgende von der Höhe abhängige barometrische Höhenformel:

$$p(h) = p_0 \cdot e^{\varrho_0 g h / p_0}$$

Dabei bezeichnet $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ die Erdbeschleunigung und $\varrho_0 = 1,24 \text{ kg/m}^3$ die Dichte der Luft auf Meeresniveau (Demtröder, 2021, S. 204). Die barometrische Höhenformel gilt für eine isotherme Umgebung. Dies bedeutet, dass angenommen wird, dass sich die Temperatur mit steigender Höhe in der Atmosphäre nicht verändert. Da dies nicht der Realität entspricht, ist die barometrische Höhenformel nur eine Näherung an den tatsächlichen Druckverlauf in der Atmosphäre. Auch die Erdbeschleunigung wird mit kleinerer Höhe geringer, was in der barometrischen Höhenformel ebenfalls nicht berücksichtigt ist.

Die genaue Herleitung der barometrischen Höhenformel kann im Lehrbuch von Demtröder (2021, S. 203-204) nachvollzogen werden, spielt aber im Rahmen dieser Arbeit und der im folgenden vorgestellten Unterrichtsentwürfe keine Rolle.

4.4 Fensterform: Stabilitätscheck mittels Licht-Polarisation

Sowohl die Fenster als auch der Rumpf eines Flugzeugs sind eher rund als eckig. Dies hat Stabilitätsgründe, welche gerade bei großen Druckunterschieden zwischen Kabine und Umgebung zum Tragen kommen. Dies wurde bereits in Kapitel 4.3 inhaltlich vorbereitet und in Kapitel 5.3 in die Form einer Unterrichtsidee mit Experimenten gegossen. Nun sollen die Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Fensterformen und der Stabilität eben dieser analysiert werden. Um „Stabilität“ für Schulzwecke messbar bzw. eher beobachtbar zu machen, wird theoretisches Hintergrundwissen zur Optik benötigt, da im Zuge des Kapitels 5.4 Polarisationsfolien verwendet werden, um mögliche Schwachstellen bzw. Bruchstellen verschiedener Plexiglaszuschnitte zu erkennen. Auf die molekulare, amorphe Struktur des Plexiglases selbst soll in diesem Kapitel nur stellvertretend eingegangen werden, da auch andere Materialien bei zusätzlicher mechanischer Verzerrung und Biegung unterschiedliche optische Reflexions- und Brechungseigenschaften durchlaufen.

Dieses Thema wird nur qualitativ erläutert, da es – wie nachfolgend erkennbar – schwierig ist, die verschiedenen Farbverläufe auf den Aufnahmen des nachher vorgestellten Experiments quantitativ zu erschließen. Außerdem ist eine qualitative Erklärung – gerade für Schulzwecke – absolut ausreichend, was daran erkennbar ist, dass das physikalische Thema „Stabilität von Materialien“ weder in der in der Sekundarstufe 1 (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 29-37) noch in der Sekundarstufe 2 (Hessisches Ministerium für Kultus, Bildung und Chancen, 2024, S. 25-47) explizit erwähnt wird – nicht einmal in der „Festkörperphysik“. Diese Einordnung in das

Hessische Kerncurriculum dient wieder nur beispielhaft als solche für ein in Deutschland erstelltes Curriculum.

Plexiglas wird auch als Acrylglas bezeichnet und ist ein Polymerisat des Methacrylsäuremethylesters $C_5H_8O_2$ (Deubing, o. J.). Es hat eine amorphe Struktur, welche bei Betrachtung der Anordnung der Atome keinem kubischen oder anderweitig symmetrischen Gitter ähnelt. Oft wird Plexiglas in der Herstellung gegossen (PlasticExpress, 2020), was die unterschiedlich ausgerichteten Moleküle erklärt, welche sich z.B. auch bei frierendem und damit härtendem Eis wiederfinden lassen. Allerdings kann es durchaus kleinere Bereiche im Plexiglas geben, welche sich zumindest teilweise kristallähnlich strukturieren. Daher folgt nun dennoch ein kleiner Einschub zu optischen Achsen in Kristallen, welche im Plexiglas zwar selten vorkommen, aber eine gute Erklärungsvorlage geben, um auch amorphe und damit noch kleinere, in ihren Richtungen vermischte Molekülanordnungen in Bezug auf ihre Interaktion mit Licht zu verstehen.

Kristalle bzw. Gitterstrukturen haben (mindestens) eine optische Achse. An dieser erfährt jede Polarisationskomponente den gleichen Brechungsindex, was bedeutet, dass für alle Polarisationskomponenten das Verhältnis zwischen der Wellenlänge außerhalb (z.B. Vakuum oder Luft) und innerhalb des Kristalls sowie zwischen der Phasengeschwindigkeit außerhalb (z.B. Vakuum oder Luft) und innerhalb des Kristalls gleich ist. Dies wiederum bedeutet, dass die Brechung für alle Polarisationskomponenten gleich stark ist (z.B. bezogen auf den Ablenkwinkel des Lichts bzw. der Ausbreitungsrichtung der entsprechenden elektromagnetischen Welle). Je nach genauer Richtung, in der (weißes) Licht nun auf die optische Achse trifft, kommt es zu unterschiedlichen Farberscheinungen aus dem Kristall heraus. Beispielsweise sind *dichroitische Kristalle* solche, welche zwei verschiedene Farben herausstrahlen lassen, wenn sie in verschiedenen Positionen gegen das (weiße) Licht gehalten werden (Heintze & Bock, 2017, S. 198-199). Welche Farbanteile des (weißen) Lichts aber absorbiert und welche transmittiert werden, hängt mit den bereits erwähnten Polarisationskomponenten und deren Stellung zu den kristallographisch ausgezeichneten Achsen

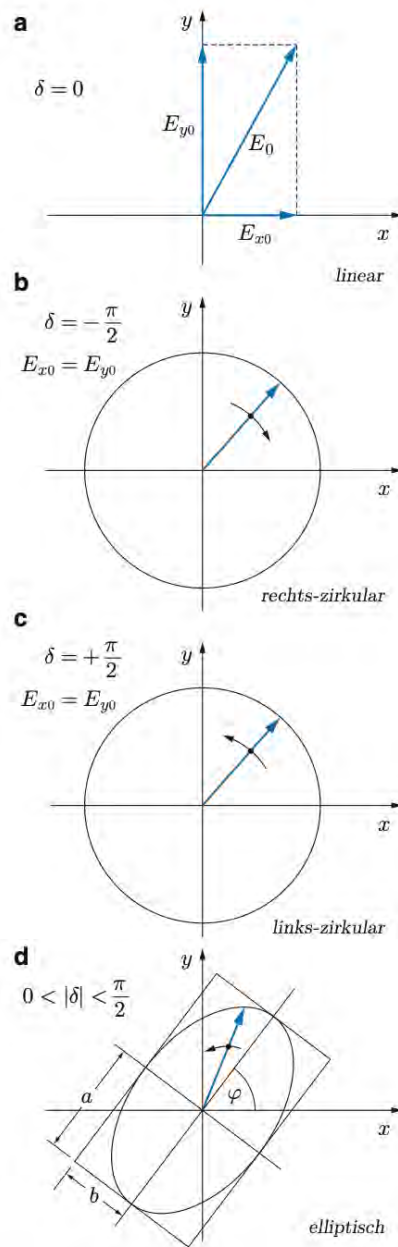


Abbildung 3: Polarisationszustände für linear, zirkulär und elliptisch polarisiertes Licht mit Ausbreitung in z-Richtung, also aus der Zeichenebene heraus (Heintze & Bock, 2017, S. 195)

(vereinfacht: optischen Achsen) zusammen (Heintze & Bock, 2017, S. 198-199).

Da Plexiglas keine großräumige kubische Kristallstruktur innehat, sondern hauptsächlich asymmetrisch bzw. amorph aufgebaut ist und die Plexiglasformen im folgenden Experiment zusätzlich belastet und gebogen werden, kann es bei Interaktion mit dem polarisierten Licht überhaupt zu unzähligen und damit verschiedenen Farben kommen, welche aber gleichzeitig aus einer Blickrichtung zu beobachten sind (siehe Abbildung 6).

Wie Licht polarisiert ist, entscheidet die Schwingungsrichtung des E -Vektors dieser elektromagnetischen Welle. Die Polarisationszustände für linear, zirkulär oder elliptisch polarisiertes Licht sind in Abbildung 3 dargestellt. Außerdem gibt es Polarisationsfilter, welche beispielsweise Licht mit einer linearen Polarisation senkrecht zu den Gitterstäben des Polarisationsfilters absorbieren, während sie Licht mit einer um dazu 90° gedrehten Polarisation komplett durchlassen. Auch linear polarisiertes Licht, welches weder senkrecht noch parallel zu den Gitterstäben des Polarisationsfilters polarisiert ist, wird

anteilig durchgelassen. Dieser Anteil entspricht der Projektion des E -Vektors des einfallenden Lichts auf die Ebene senkrecht zu den Gitterstäben des Polarisationsfilters (siehe Abbildung 4). In Abbildung 4 liegt der Polarisationsfilter mit seinen Gitterstäben entlang der x' Achse und der Winkel

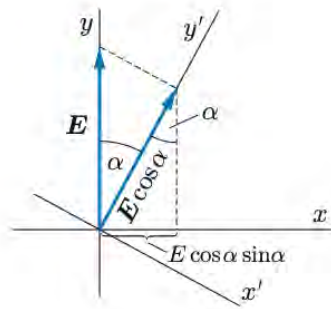


Abbildung 4:
Polarisationsänderung des einfallenden Lichts (E) durch Polarisationsfilter mit in x' ausgerichteten Gitterstäben (Heintze & Bock, 2017, S. 198)

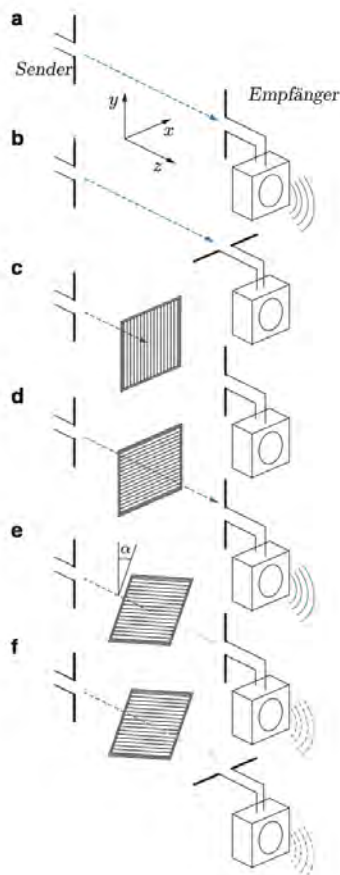


Abbildung 5:
unterschiedliche Signalstärken zwischen Sender und Empfänger durch verschieden positionierte Polarisationsfolien (Heintze & Bock, 2017, S. 197)

α bezeichnet demnach den Winkel zwischen Polarisationsrichtung des einfallenden Lichts (E -Vektor) und der Durchlassrichtung des Polarisationsfilters ($E \cos(\alpha)$ -Vektor).

Allgemein werden Polarisationsfilter auch zum Absorbieren oder Durchlassen anderer elektromagnetischer Signale verwendet. So kann die Ausrichtung des Polarisationsfilters die ankommende Signalstärke beim Empfänger nach Aussenden eines Signals beim Sender bestimmen (siehe Abbildung 5). Dies geschieht im Allgemeinen dadurch, dass durch den zu den Gitterstäben parallelen Anteil des E -Vektors der einfallenden elektromagnetischen Welle die Ladungen in den Gitterstäben mitschwingen und dadurch die E -Komponente absorbieren. Hinter den Gitterstäben lässt sich dann kein E -Vektor mehr feststellen, weil die mitschwingenden Ladungen in den Gitterstäben wiederum elektromagnetische Strahlung aussenden, welche genau um eine halbe Wellenlänge phasenverschoben ist und es somit zur destruktiven Interferenz hinter dem Polarisationsfilter kommt.

Werden nun die unterschiedlichen Erkenntnisse zum Plexiglas und zu den Polarisationsfiltern zusammengetragen, lassen sich die unterschiedlichen Farben beim Belasten eines Plexiglases zwischen zwei um 90° zueinander gedrehte Polarisationsfolien erklären (siehe Abbildung 6). Das von hinter

dem Aufbau durchscheinende (weiße) Licht wird durch die hintere Polarisationsfolie beispielsweise linear und horizontal polarisiert. Damit schwingt der *E*-Vektor des (weißen) Lichts im Zwischenraum bis zum Hartgummi-Haken nur horizontal von links nach rechts. Trifft dieses (weiße) Licht nun auf den fast durchsichtigen Hartgummi-Haken, wird es bei Interaktion mit dieser Materie immer neu bzw. anders polarisiert (Heintze & Bock, 2017, S. 197) – allerdings nicht in eine eindeutige und in diesem einfachen Experiment nachvollziehbare Richtung. Das bedeutet, dass es nach dem Durchgang durch den Hartgummi-Haken wieder Anteile des Lichts gibt, die (teilweise) linear und vertikal polarisiert sind, obwohl diese Anteile eigentlich zuvor mit dem Polarisationsfilter aussortiert wurden. Im Detail passiert folgendes im Hartgummi-Haken: Das zwar gleich polarisierte Licht trifft auf die unterschiedlichen, amorphen Strukturen des Plexiglasses und steht dadurch in unterschiedlichsten Winkeln zu den optischen Achsen einzelner kleiner Bereiche des Plexiglasses bzw. zu den amorphen Strukturen. Je nach dem wie der *E*-Vektor des bereits polarisierten Lichts auf die unterschiedlichen Molekülstellungen und optischen Achsen trifft (senkrecht, parallel oder jeweils anteilig), wird ein Anteil des Lichts absorbiert, transmittiert oder neu bzw. anders polarisiert (Heintze & Bock, 2017, S. 198-199). Anschließend gelangt das teilweise neu und damit auch teilweise wieder vertikal polarisierte Licht zum zweiten Polarisationsfilter. Dieser ist im Vergleich zum ersten um 90° gedreht und lässt damit nur senkrecht polarisiertes Licht durch. Das zuvor vom ersten Polarisationsfilter horizontal polarisierte Licht kommt hier nicht mehr bzw. kaum durch, weswegen es beim Durchschauen durch beide Polarisationsfilter auch ziemlich dunkel erscheint, obwohl zuvor weißes Licht von einer weißen Leinwand kam (siehe Abbildung 6). Durch den zweiten Polarisationsfilter kommen also nur Anteile des Lichts durch, welche wieder teilweise vertikal polarisiert sind. Dies sind nur die durch den Hartgummi-Haken neu polarisierten Anteile. Somit sind bei Betrachtung der Abbildung 6 nur die Farben sichtbar, welche durch die Verzerrungen und Biegungen des Plexiglasses entstehen. Dies erklärt sich dadurch, dass die unterschiedlich „starke“ Absorption bei unterschiedlichen Wellenlängen passiert. Einzelne Farbanteile bzw. Wellenlängenbereiche des ursprünglich

(weißen) Lichts werden aufgrund unterschiedlicher Molekülabstände/-ordnungen und damit auch durch die zusätzlichen Spannungen im Material absorbiert bzw. interferieren nach dem Hartgummi-Haken destruktiv.

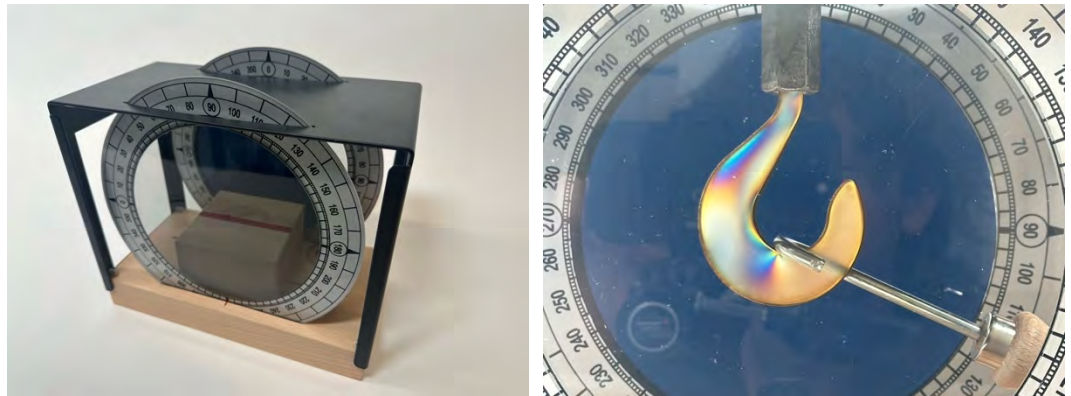


Abbildung 6: Aufbau von zwei Polarisationsfolien und beispielhaft ein Hartgummi-Haken dazwischen, der nach unten hin belastet/gezogen wird (selbst aufgenommen)

Ähnliche Effekte lassen sich bei der Lichtbrechung unterschiedlicher Farben beim Prisma erkennen (siehe Abbildung 7), da es aufgrund der amorphen Struktur des Plexiglasses zu unterschiedlichen Brechungsindexen kommt. Außerdem wird an dieser Stelle auch an die Bragg-Reflexion verwiesen, welche in der Oberstufe kennengelernt wird (Hessisches Ministerium für Kultus, Bildung und Chancen, 2024, S. 41) und welche auch einen Zusammenhang zwischen Materialstrukturen und Interferenz bei unterschiedlichen Wellenlängen bzw. Farben diskutiert.



Abbildung 7: Lichtbrechung und Unterteilung in unterschiedliche Farben durch unterschiedliche Wellenlängen, Dispersion (tec-science, 2019)

Die Stellen, an denen nun in den Aufnahmen des Experiments (viele verschiedene) Farben nah beieinander zu sehen sind, zeigen stark belastete Orte im Plexiglas bzw. im Hartgummi an. Dort steht das Material besonders unter Spannung und die Molekülstrukturen werden in ihrer Anordnung auseinandergezogen oder zusammengedrückt. Ab einem gewissen Punkt werden die Kräfte bzw. Spannungen so groß, dass das Plexiglas bricht oder der Hartgummi reißt. An dieser Stelle sei bereits gesagt, dass die Aufnahmen des Plexiglasses keine Farben zeigen (siehe Kapitel 5.4), sondern nur in Graustufen anzeigen, welche Stellen womöglich am ehesten brechen werden. Das hängt unter anderem mit der Materialauswahl für das Plexiglas zusammen, welches in der Physik-eigenen Werkstatt der Universität verarbeitet wurde. Daher bestand hierauf kein Einfluss. „Weiße“ Stellen sind dabei stärker belastet als „schwarze“ Stellen. Allerdings zeigen auch hier schnelle Übergänge zwischen „weiß“ und „schwarz“ starke Belastungen auf. Um an dieser Stelle bereits einen Eindruck dafür gewinnen zu können, folgt Abbildung 8.

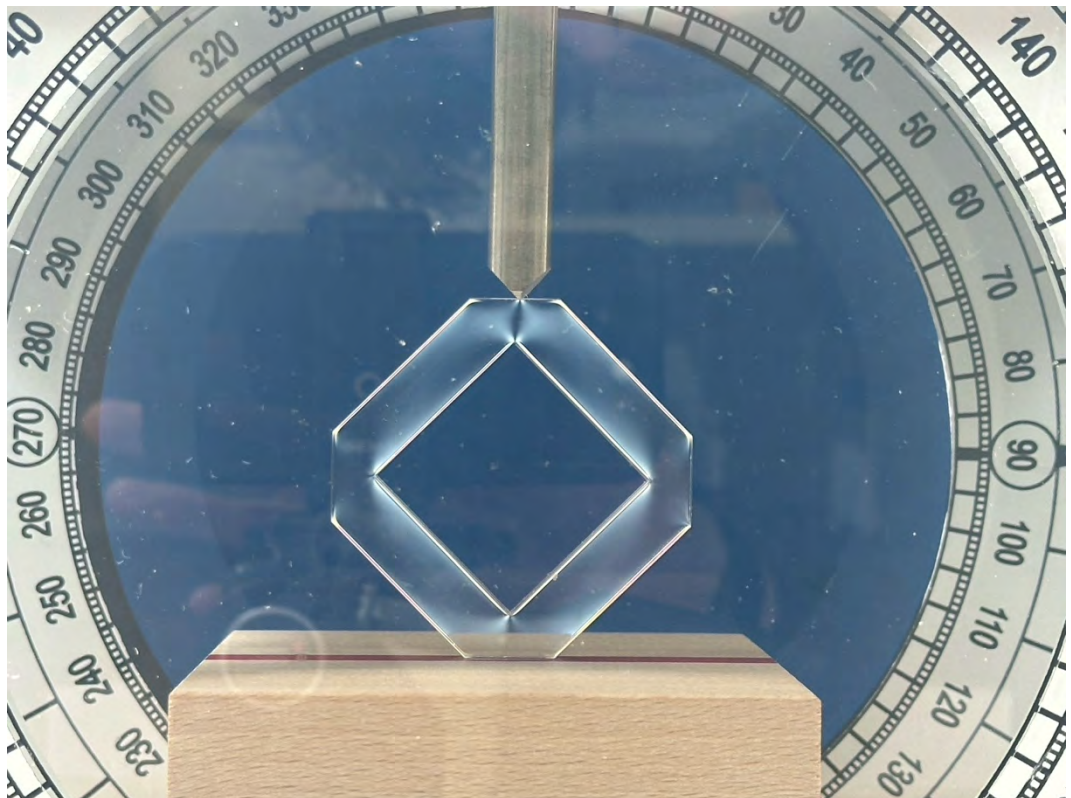


Abbildung 8: Aufbau von zwei Polarisationsfolien und beispielhaft ein Plexiglas-Quadrat dazwischen, das hauptsächlich von oben punktuell belastet wird (selbst aufgenommen)

5. Mögliche Unterrichtsentwürfe

5.1 Luftloch

5.1.1 Bisheriger Unterricht

In diesem ersten Teil zur Vorstellung des Unterrichtsentwurfs zum Luftloch beim Fliegen soll geklärt werden, welche Kenntnisse und Kompetenzen Voraussetzung auf Seiten der Lernenden sein müssen, um den im Folgenden vorgestellten Unterricht möglich zu machen und sinnvoll zu gestalten.

Für den ersten Unterrichtsentwurf zum Kontext des Luftlochs ist es sinnvoll, bereits einen Kraftbegriff in der zu unterrichtenden Klasse eingeführt zu haben. Dieser könnte beispielsweise so aussehen, dass die Lernenden eine Kraft zunächst vereinfacht als drückend oder ziehend kennengelernt haben. Dies könnte beispielsweise in einigen ersten Stunden zum Kräften messen mittels Kraftmesser gelernt worden sein. Dazu zählt auch das Kennen der Einheit Newton und das Zeichnen von Kräften mittels Pfeilen, wobei die Pfeillänge für den Kraftbetrag, die Pfeilrichtung für die Kraftrichtung und der Pfeilanfang für den Angriffspunkt der Kraft stehen.

Dieses Wissen und diese Fähigkeiten sind sinnvoll, damit die Lernenden beim Einzeichnen der Kräfte am Flugzeug oder am Passagier nicht erst verstehen müssen, dass eine Kraft irgendwo ansetzen muss oder von irgendeinem Körper ausgeübt werden muss. Sie werden so die passenden Kräfte-Zeichnungen zu den Bewegungsabläufen im absackenden Flugzeug eher erstellen können und es kann sich mehr auf die neuen Newton'schen Axiome konzentriert werden.

Auch ist es zwingend notwendig, dass sich zuvor mit Bewegungen und ihren Observablen beschäftigt wurde. Das heißt, dass den Lernenden klar ist, was eine Geschwindigkeit und eine Beschleunigung sind. Zusätzlich sollten die Lernenden entsprechende Diagramme zu den Bewegungen erstellen und interpretieren können. Dazu zählen vor allem das v-t-Diagramm und das Berechnen der Beschleunigung daraus, für den Fall, dass es sich um eine konstante Beschleunigung handelt. Dies ist wichtig, um dann im nun

folgenden Unterricht den Zusammenhang zwischen Beschleunigung und Kraft ergründen zu können.

5.1.2 Tabellarischer Unterrichtsentwurf

Im Folgenden wird ein möglicher Unterrichtsentwurf dargestellt, um zu zeigen, wie der Kontext der Flug-Sicherheit in den Physikunterricht integriert werden kann. Dieser Unterrichtsentwurf steht dabei nur beispielhaft für einen solchen. Im weiteren Verlauf des Kapitels wird vor allem auf die Gestaltung der Experimente und dessen unterrichtliche Verwirklichung wertgelegt, da diese jederzeit einfach übernommen werden können – auch wenn ein anderer Unterricht drum herum geplant wird.

Der folgende Unterrichtsentwurf läuft über drei Schulstunden, da er zwei Experimente mit jeweils verschiedenen Experimentierdurchgängen beinhaltet und die beiden ersten Newton'schen Axiome in den Kontext der Flug-Sicherheit setzen soll.

Die im Folgenden beschriebenen Handlungen und Äußerungen der Lehrkraft und der Lernenden sind hier teilweise sehr konkret benannt. Sollten beispielsweise die Antworten der Lernenden in eine andere Richtung gehen als erwartet, kann die Lehrkraft natürlich den Unterricht lenken und entsprechende Hinweise geben.

Außerdem wird sowohl in diesem Unterkapitel 5.1.2 wie auch im später folgenden Unterkapitel 5.2.2 zum nächsten Unterrichtsentwurf der jeweilige Stundenverlaufsplan vollständig abgedruckt, da dies das durchgehende und flüssige Lesen unterstützt. Dennoch werden beide Stundenverlaufspläne nochmals im Anhang dieser Arbeit abgedruckt, damit die lesende Lehrkraft schneller und einfacher Zugriff darauf hat und die Verlaufspläne direkt mit den Arbeitsblättern ausdrucken kann.

Tabelle 1: Unterrichtsentwurf „Luftloch“

Phase (Zeit)	Unterrichtsinhalt & Handlungen	Sozialform/ Methode	Materialien/ Medien
1. Stunde			
Einstieg/ Motivation/ Kontextsetzung (5 min)	Lehrkraft zeigt Video¹ von Startabbruch (äußere Perspektive) Lehrkraft fragt nach Beobachtungen Lernende erkennen Startabbruch bzw. beschreiben diesen Lehrkraft zeigt Video² von Startabbruch (innere Perspektive) Lehrkraft fragt nach Beobachtungen bzgl. der Bewegungen, die die Passagiere im Moment des Startabbruches machen Lernende beschreiben erst ein „sich weiter nach vorne Bewegen der Passagiere trotz Bremsen des Flugzeuges“ und dann ein „doch sehr ruckartiges Abbremsen der Passagiere vor dem Vordersitz“	im Plenum / Unterrichtsgespräch bzw. Fragen-entwickelnder Unterricht	- / Beamer, Lautsprecher, Tablet von Lehrkraft
Erarbeitung (25 min)	Lehrkraft weist kurz in folgenden Arbeitsauftrag ein und stellt Arbeitsblätter sowie Materialien zur Verfügung Lernende entwickeln bzw. modellieren die Flugzeug-Passagier-Bewegungen mittels Eiern und durchsichtigen Kisten und nehmen ihre Experimente mittels Bewegungs-Analyse-App auf den Tablets auf	Gruppenarbeit / geführtes Experimentieren bzw. teilweises Modellieren	Arbeitsblatt ³ , Eier, durchsichtige Kisten / Tablets der Lernenden (inkl. Bewegungs-Analyse-App)

Sicherung (10 min)	eine (zufällige) Gruppe stellt ihre Videos, v-t-Diagramme und Überlegungen zu Aufgabe 3 (Sinn von Sicherheitsgurten) des Arbeitsblattes vor Lehrkraft greift ggfs. in Vorstellung ein und korrigiert inhaltlich Lernende ergänzen ggfs. ihre Aufschriften inhaltlich während der Besprechung	im Plenum / Vorstellungen der Arbeitsergebnisse der Gruppen	- / Beamer, Tablets der Lernenden
Aufräumen (5 min)	Lernende hinterlassen ihre Arbeitsplätze sauber und trocken	Gruppenarbeit / Arbeitsteilung und Verantwortungs-übernahme	Eier, durchsichtige Kisten / Tablets der Lernenden (inkl. Bewegungs-Analyse-App)

2. Stunde

Einstieg/ Wiederholung (5 min)	Lernende stellen Wiederholungs-Fragen an die Klasse zu den Erkenntnissen der letzten Stunde Lehrkraft greift evtl. ein und stellt wichtige Fragen, die von den Lernenden nicht gestellt wurden	im Plenum / Lernende befragen sich selbst bzw. gegenseitig	- / -
Einführung/ Erarbeitung (15 min)	Lehrkraft zeigt mehrere Bilder von verschiedenen Kontexten, in denen Körper beschleunigt oder verzögert wurden, und fragt nach der Ursache Lernende antworten wahrscheinlich so etwas wie: „Berührung des Körpers mit einem anderen Körper, welcher den Ursprungskörper drückt oder an ihm zieht (also eine Kraft auswirkt)“ Lehrkraft erstellt Zeichnung ⁵ von Situation mit Ei und Kasten bzw. mit Passagier und Flugzeug und zeichnet mit Hilfe der Beiträge der Lernenden die Kräfte bzw. Beschleunigungen ein	im Plenum / physikalische Gemeinsamkeiten in Bildern finden	- / Beamer, Tablet von Lehrkraft, Fotoreihe ⁴

Sicherung/ Regelformulierung (5 min)	Lehrkraft fragt nach Zusammenhang zwischen Kraft und Beschleunigung erwartete Antwort der Lernenden: „Kraft ist Ursache von Beschleunigung“ Lehrkraft lenkt und formuliert dies in den Worten des zweiten Newton'schen Axioms: „Beschleunigung ist proportional zu einwirkender Kraft (mit Masse als Faktor), Richtungen von Beschleunigung und Kraft sind identisch, $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$“	im Plenum / gemeinsame Erarbeitung bzw. Formulierung einer neuen Regel	- / Beamer, Tablet von Lehrkraft
Spezialisierung (10 min)	Lehrkraft zeigt Arbeitsauftrag⁶ an der Tafel und erläutert ihn kurz Lernende suchen beispielhaft Momente bzw. Zeiträume aus ihren Videos, in denen eine konstante Geschwindigkeit des Eies zu beobachten ist, und erkennen, dass genau dann keine Kraft auf das Ei durch einen anderen Körper wirkte Lernende formulieren Spezialfall von zweitem Newton'schem Axiom	Gruppenarbeit / Analyse der selbstgedrehten Videos durch Finden von Spezialfällen	- / Beamer, Tablet von Lehrkraft, Arbeitsauftrag bzw. Tafelbild, Tablets der Lernenden (inkl. Bewegungs-Analyse-App)
Sicherung/ Regelformulierung (10 min)	Lernende stellen ihre Ergebnisse vor (Zeitraum im Video und spezifizierte Regel) Lehrkraft ergänzt während der Besprechung des Arbeitsauftrages den Namen des Spezialfalls als „erstes Newton'sches Axiom“ Lernenden übernehmen die Formulierung der vorstellenden Gruppe bzw. gleichen diese mit ihrer selbst-gewählten Formulierung ab	im Plenum / Vorstellung der Ergebnisse einer Gruppe und (gemeinsame) Formulierung einer neuen Regel	- / Beamer, Tablets der Lernenden (inkl. Bewegungs-Analyse-App)

3. Stunde

Einstieg/ Motivation/ Kontextsetzung (5 min)	Lehrkraft zeigt Video ⁷ von „im Luftloch absackendem Flugzeug“ und motiviert damit die Stunde	im Plenum / Motivation zur Beschäftigung mit „Alltagsbeispiel“	- / Beamer, Lautsprecher, Tablet von Lehrkraft
---	--	--	--

Erarbeitung (25 min)	Lehrkraft weist kurz in folgenden Arbeitsauftrag ein und stellt Arbeitsblätter sowie Materialien zur Verfügung Lernende entwickeln bzw. modellieren die Flugzeug-Passagier-Bewegungen mittels Eiern und durchsichtigen Kisten und nehmen ihre Experimente mittels Bewegungs-Analyse-App auf den Tablets auf (diesmal inkl. zusätzlicher Beschleunigung nach unten durch vertikalen Windstoß/“Luftloch“)	Gruppenarbeit / geführtes Experimentieren bzw. teilweises Modellieren	Arbeitsblatt ⁸ , Eier, durchsichtige Kisten / Tablets der Lernenden (inkl. Bewegungs-Analyse-App)
Sicherung (15 min)	Besprechung der Ergebnisse des Arbeitsblattes und des Experiments, indem einzelne Lernende ihre Ergebnisse präsentieren Lehrkraft betont an geeigneter Stelle während der Besprechung die Gewichtskraft F_G und die Erdbeschleunigung g (bzw. Lehrkraft fragt danach) Lehrkraft betont an geeigneter Stelle während der Besprechung die unterschiedlichen Bezugssysteme und die unterschiedlichen Beobachtungen daraus (bzw. Lehrkraft fragt danach) nach Besprechung von Aufgabe 5 gemeinsames Formulieren eines Merksatzes über Bezugssysteme bzw. verschiedene Beobachtungen von verschiedenen Standpunkten	im Plenum / Vorstellungen der Arbeitsergebnisse der Gruppen und gemeinsame Formulierung eines Merksatzes	- / Beamer, Tablets der Lernenden, Dokumentenkamera

¹ (GaboAir, 2021a)

² (GaboAir, 2021b)

³ Das Arbeitsblatt bzw. die Erläuterungen dazu folgen im Anhang bzw. im folgenden Unterkapitel 5.1.3.

⁴ Die Fotoreihe zum Zusammenhang von Beschleunigung und Kraft – inkl. kurze Erläuterung – folgt im Unterkapitel 5.1.3.

⁵ Das Tafelbild zum Ablauf des Experiments und dem Zusammenhang von Beschleunigung und Kraft folgt im Unterkapitel 5.1.3.

⁶ Der Arbeitsauftrag zur Spezialisierung des zweiten Newton'schen Axioms folgt im Unterkapitel 5.1.3.

⁷ (Brahaj, 2019)

⁸ Das Arbeitsblatt bzw. die Erläuterungen dazu folgen im Anhang bzw. im folgenden Kapitel 5.1.3.

5.1.3 Arbeitsblätter, Tafelbilder & Videos

In diesem Teilkapitel werden im Unterrichtsverlaufsplan erwähnte Arbeitsblätter, Tafelbilder, Videos und andere unterrichtliche Arbeitsmittel dargestellt und didaktisch sowie methodisch eingeordnet bzw. begründet.

Erstes Video

Die Unterrichtseinheit startet mit dem Betrachten eines Videos, welches einen Startabbruch zeigt. In diesem Video ist die Perspektive einer neben der Startbahn stehenden Person eingenommen worden. Zwar lässt sich anhand der folgenden Abbildung 9 erahnen, welche Geschwindigkeit das Flugzeug jeweils am Anfang oder am Ende des Startabbruchs hat, dennoch empfiehlt es sich, das Video als solches anzuschauen, um die doch ziemlich starke Verzögerung des Flugzeugs im zweiten Teil des Videos zu sehen. Da dieses Video zu Beginn der ersten Stunde der Unterrichtseinheit gezeigt wird, werden hier erstmal nur allgemeine Beobachtungen von den Lernenden abgefragt. Welche allgemeinen Funktionen Videos im Unterricht erfüllen können und welche Überlegungen in dieser Unterrichtseinheit erfolgt sind, findet sich in Teilkapitel 5.1.5 wieder.

Zweites Video

Das zweite Video zeigt denselben Vorfall bzw. Startabbruch wie das erste Video, nur aus der Perspektive einer im Flugzeug befindlichen Person. Nachdem die Lernenden ihre Beobachtungen bezüglich des ersten Videos geäußert haben, werden sie auch nach ihren Beobachtungen bezüglich des zweiten Videos gefragt. Die Lehrkraft fragt diesmal aber konkreter und lenkt die Diskussion, indem sie nach der beobachteten Bewegung der mitreisenden Person fragt. Hier fällt auf, dass sich die Person trotz stark bremsendem Flugzeug erstmal weiterhin nach vorne bewegt. Dies lässt sich an den letzten beiden schwarzen Bildern in Abbildung 10 sehen, da die Person im Flugzeug nicht mehr in der Lage ist, ihr Handy stabil festzuhalten. Außerdem lassen sich



Abbildung 9: Screenshots aus dem ersten Video der Unterrichtseinheit, Perspektive von außen auf Startabbruch des Flugzeugs (GaboAir, 2021a)



Abbildung 10: Screenshots aus dem zweiten Video der Unterrichtseinheit, Perspektive von innen auf Startabbruch des Flugzeugs (GaboAir, 2021b)

die Vögel im dritten Bild von Abbildung 10 sehen, welche den Startabbruch verursacht haben. Auch die Reaktionszeit der Cockpitbesatzung nach dem Vogelschlag wird anhand eines vierten Bildes in Abbildung 10 klar, da die mitreisende Person ihr Handy dort noch stabil festhalten kann. Dieses Video bietet sich also an, um zu erkennen, dass es erst zu einer Beschleunigung – bzw. hier Verzögerung – der mitreisenden Person kommt, wenn diese an den Vordersitz stößt bzw. von ihrem Anschnallgurt gebremst wird. Welche allgemeinen Funktionen Videos im Unterricht erfüllen können und welche Überlegungen in dieser Unterrichtseinheit erfolgt sind, findet sich in Teilkapitel 5.1.5 wieder.

Erstes Arbeitsblatt

Das Arbeitsblatt für die Erarbeitungsphase der ersten Stunde des Unterrichtsentwurfs findet sich in voller Ansicht im Anhang wieder. Hier wird dieses Arbeitsblatt in seinem Aufbau und seinem Inhalt begründet, während alle Teile des Arbeitsblattes einzeln und zerstückelt abgebildet werden, sodass ein Blick in den Anhang dieser Arbeit nur für etwaiges Kopieren des Arbeitsblattes notwendig ist. Dies gilt genauso für weitere in dieser Arbeit vorgestellte Arbeitsblätter in späteren Unterkapiteln.

Neben einer inhaltlich-thematischen Überschrift „Startabbruch“ bzgl. des Kontextes der Sicherheit im Flugzeug besitzt das Arbeitsblatt auch eine inhaltlich-physikalische Überschrift „Zusammenhang von Beschleunigung und Kraft“ (siehe Abbildung 11). Somit ist den Lernenden nicht nur sofort klar, auf welches Thema bzw. Video vom Stundenanfang sich dieses Arbeitsblatt bezieht, sondern auch welche physikalische Fragestellung auf dem Arbeitsblatt zu bearbeiten sein wird. Der Kopf dieses Arbeitsblattes beinhaltet allerdings keine Spalte für den Namen der Lernenden, da diese Arbeitsblätter nicht zum Draufschreiben und Abgeben gemacht sind. Der Hintergrund ist, dass es mehrere und ausführliche Aufgaben beinhaltet, die die Lernenden zum Modellieren, Experimentieren, Aufnehmen, Ausdrucken und Schreiben (Beschreiben, Erläutern) auffordern. Somit bedient das Arbeitsblatt mehrere Kompetenzbereiche durch die Wahl verschiedener Operatoren (Pietsch, 2021,

S. 30-31). Diese Operatoren werden auch im Sinne einer klaren Aufgabenstellung kursiv gedruckt (Pietsch, 2021, S. 31). Dazu ist es für die interne Ordnung der Arbeitsmappen der Lernenden sinnvoll Fach, Datum und großes Thema der ganzen Unterrichtsreihe (hier: „Kräfte“) zum Kopf des Arbeitsblattes hinzuzufügen. Daraufhin folgen zwei Abbildungen (siehe Abbildung 11), welche nicht nur für ein ansprechenderes Design sorgen und damit verschiedene Sinne aktivieren und die Aufmerksamkeit der Lernenden auf sich ziehen (Pietsch, 2021, S. 31), sondern im Sinne von Aufgabe 1 klarmachen, welche Modellierung bzw. Übersetzung zwischen realer Welt (Passagier im Flugzeug) und zu benutzenden Experimentierutensilien (Ei und Kiste) zu führen ist.



Abbildung 11: Erstes Arbeitsblatt, Titel und Bilder

Das Arbeitsblatt beinhaltet teilweise längere Aufgabentexte, weil diese oft schon Hinweise bzw. Fragestellungen beinhalten, welche die Lernenden im Falle des Nicht-Weiterkommens lenken sollen. Damit soll sichergestellt werden, dass neben dem Arbeitsblatt keine weiteren mündlichen Erläuterungen der Lehrkraft notwendig sind (Schrackmann, 2022, S. 8). Ein Beispiel hierfür ist eine Anweisung für das Positionieren der Kamera relativ zum ablaufenden Experiment (siehe Abbildung 12). Auch soll bei mehreren aufeinander folgenden Aufgaben sichergestellt werden, dass die Lernenden zwischendurch weiter-verwertbare Ergebnisse erarbeitet haben, z.B. der

Hinweis, die v-t-Diagramme erst mit der Lehrkraft abzusprechen, bevor sie ausgedruckt werden (siehe Abbildung 12).

1) *Stellt* die Situation im Flugzeug mit dem „sich nach vorne bewegendem Passagier bzw. Handy“ experimentell *nach*. Dazu bekommt ihr mehrere Eier, welche die Passagiere darstellen sollen und damit behutsam behandelt werden sollten, und eine durchsichtige Kiste, welche das Flugzeug symbolisieren soll. *Filmt* dieses Experiment mit der Video-Analyse-App und lasst euch ein v-t-Diagramm der Bewegung des Eies *ausgeben*. Dazu sollte die Kamera stillstehen und sich der Kasten, samt Ei darin, im Blickfeld der Kamera bewegen.

- a) Zunächst eine Aufnahme eures Experiments in Anlehnung an einen nicht angeschnallten Passagier.
- b) Dann eine Aufnahme eines weiteren Durchgangs des Experiments, in dem ihr darstellt, dass der Passagier angeschnallt ist. (Dazu gibt es am Pult vorne Klebeband, welches einen Anschnallgurt darstellen soll.)

Wenn ihr damit fertig seid, lasst ihr mich kurz mit euch die Diagramme besprechen. Danach könnt ihr sie ausdrucken und habt ihr so gesichert.

Abbildung 12: Erstes Arbeitsblatt, Aufgabe 1

Während bei Aufgabe 1 neben dem Modellieren und Experimentieren auch die benötigten v-t-Diagramme erstellt werden, werden diese nun bei Aufgabe 2 analysiert (siehe Abbildung 13). Damit wird das Interpretieren von Diagrammen und Daten trainiert (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 13). Damit rückt das Arbeitsblatt bei Aufgabe 2 in den höheren Anforderungsbereich 2 vor. Dazu sei gesagt, dass das Modellieren bzw. Experimentieren in Aufgabe 1 auch durch das Arbeitsblatt geleitet wird und das v-t-Diagramm auch durch das Aufnahme-Programm selbst erstellt wird. Diese Tätigkeiten wurden bereits im vorherigen Unterricht zu Bewegungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen erlernt und sind somit eher Anforderungsbereich 1. Somit kann hier bei Aufgabe 2 von einem Anstieg im Schwierigkeitsgrad gesprochen werden, was innerhalb eines Arbeitsblattes auch passieren sollte (Pietsch, 2021, S. 31-32). Aufgabe 3 ist wiederum eine Bewertungs- bzw. Reflexionsaufgabe und könnte damit Anforderungsbereich 3 abdecken (siehe Abbildung 13). Allerdings sei gesagt, dass Aufgabe 3 durch das Alltagswissen der Lernenden und die vorherige Bearbeitung von den Aufgaben 1 und 2 machbar sein sollte.

- 2) *Bestimmt* die Zeitpunkte in beiden Experimentabläufen, zu denen im v-t-Diagramm eine abrupte Beschleunigung bzw. Verzögerung zu erkennen ist. Dazu schaut ihr eure Videos am besten in Slow-Motion an und habt gleichzeitig einen Blick auf eure v-t-Diagramme. *Beschreibt*, was zu diesen Zeitpunkten im Experiment passiert ist und was damit der Grund für die jeweilige Beschleunigung bzw. Verzögerung ist.
- 3) *Erläutert* den Vorteil den Anschnallgurten im Flugzeug, Auto oder anderen Verkehrsmitteln haben. Nutzt dazu eure Erkenntnisse aus der Bearbeitung von den Aufgaben 1 und 2. Macht euch dabei jeweils klar, was mit dem Ei bzw. dem Passagier in beiden Fällen a) und b) passiert.

Abbildung 13: Erstes Arbeitsblatt, Aufgabe 2 und 3

Eine Differenzierung bzw. Individualisierung je nach Fähigkeitsstand der Lernenden ist in diesem Arbeitsblatt nicht eindeutig verarbeitet. Da es nur aus drei Aufgaben besteht und inhaltlich-physikalisch für die Lernenden neu ist. Daher handelt es sich hierbei um ein eher den Erarbeitungsprozess führendes Arbeitsblatt, welches als Grundlage dafür dient, dass alle Lernenden bzw. Gruppen durch das Experiment und die Auswertung begleitet werden (Kirchner, Girwidz & Fischer, 2020, S. 321). Das wird beim zweiten Arbeitsblatt dieser Unterrichtseinheit anders sein. Allerdings werden bereits mit diesem ersten Arbeitsblatt alle drei methodischen Schwerpunkte eines Arbeitsblattes erreicht: Es bietet inhaltliche Orientierung, verbindet Praxis mit Theorie durch die verwendeten Bilder, es steuert den Arbeitsablauf, leitet somit durch gezielt eingestreute Arbeitshinweise zu Lösungen hin und beinhaltet Hilfen für die gezielte Auswertung der aufgenommenen Daten durch Nebeneinanderlegen von v-t-Diagramm und Video (Kirchner, Girwidz & Fischer, 2020, S. 321).

Fotoreihe

Die im Verlaufsplan erwähnte Fotoreihe soll Bewegungsabläufe aus Natur und Technik zeigen, welche eine Beschleunigung oder Verzögerung aufgrund einer Krafteinwirkung darstellen. Diese Krafteinwirkung kommt durch den Zusammenstoß eines Körpers mit einem anderen zustande, welcher eine andere Geschwindigkeit hatte. Für eine mögliche und beispielhafte Fotoreihe siehe Abbildung 14: Kugel durch Pistolenstift/-feder beschleunigt (Tsvetoslav Hristov, 2020), Football durch Tritt beschleunigt (Bob Bob, 2010), Auto durch

Zusammenstoß mit Baum verzögert (San Marcos Daily Record Negatives, 2018), Badegast durch Bauchklatscher mit Wasser verzögert (Jasßn, 2009).



Abbildung 14: Fotoreihe zum Zusammenhang von Beschleunigung und Kraft

Tafelbild

Für eine mögliche Zeichnung bzw. ein mögliches Tafelbild zum Erkennen des Zusammenhangs zwischen Beschleunigung und Kraft siehe Abbildung 15.

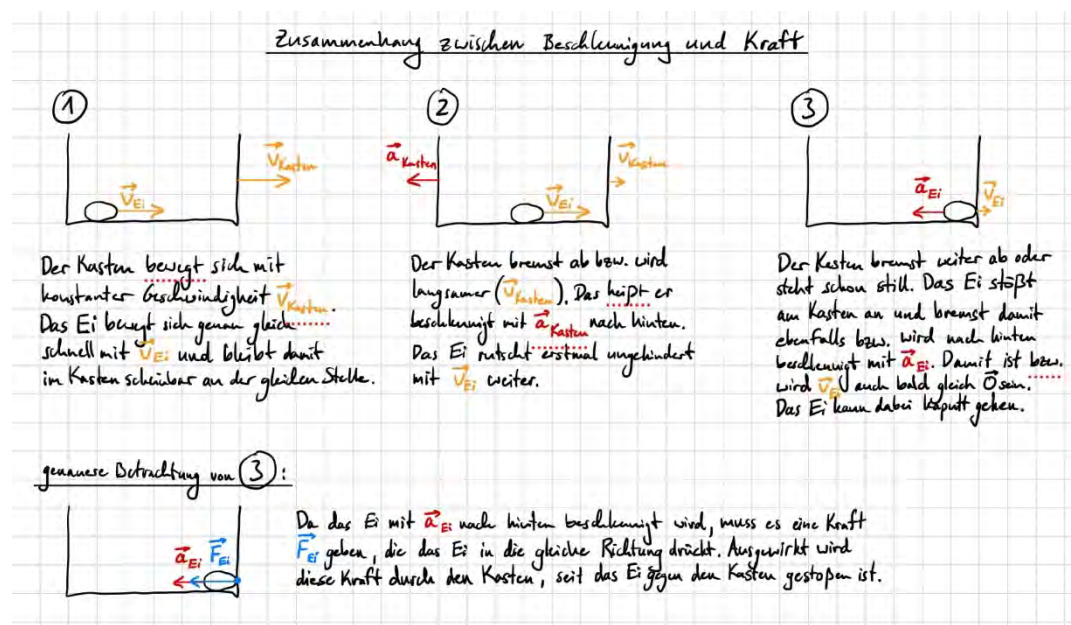


Abbildung 15: Tafelbild zu Experimentablauf; Zusammenhang von Beschleunigung und Kraft

Arbeitsauftrag

Der Arbeitsauftrag zur Spezialisierung des zweiten Newton'schen Axioms wird nur per Beamer an die Leinwand/Tafel angeworfen (siehe Abbildung 16), da es für diese kurze Arbeitsphase keine Arbeitsblätter braucht und die Lernenden die schriftliche Formulierung des ersten Newton'schen Axioms im Zuge der Besprechung dieser Aufgaben in ihre Hefte eintragen.

- 1) Sucht in euren Aufnahmen des Ei-Experiments nach Momenten bzw. kurzen Zeiträumen, in denen sich das Ei mit konstanter Geschwindigkeit bewegt.
- 2) Stellt fest, ob in diesen Momenten bzw. kurzen Zeiträumen eine Kraft auf das Ei wirkte, wie zuvor beim zweiten Newton'schen Axiom.
- 3) Formuliert eine neue Regel, die als Spezialfall des zweiten Newton'schen Axioms erhalten kann und in welcher wieder ein Zusammenhang zwischen Beschleunigung und Kraft für eben diesen Spezialfall benannt wird.

Abbildung 16: Arbeitsauftrag zur Spezialisierung des zweiten Newton'schen Axioms durch Formulierung des ersten Newton'schen Axiom

Drittes Video

Mit diesem dritten Video der Unterrichtseinheit motiviert die Lehrkraft die darauffolgende Beschäftigung mit dem zweiten Newton'schen Axiom an einem weiteren Anwendungsbeispiel im Flugzeug. Diesmal geht es aber um vertikale Beschleunigungen bzw. Verzögerungen und die damit in Zusammenhang stehenden Kräfte. Auch hier zeigt das Video, wie die Flugbegleiterin samt ihrem Getränkewagen scheinbar „nach oben“ beschleunigt wird, obwohl sie eigentlich nur ihre Bewegungszustand beibehält und das Flugzeug plötzlich stärker „nach unten“ beschleunigt (siehe Abbildung 17). Dieses Video passt also nicht nur zur Beschäftigung mit dem zweiten Newton'schen Axiom, sondern auch zur Frage der Bewegungsbeschreibung je nach Beobachtungsposition bzw. Perspektive. Welche allgemeinen Funktionen Videos im Unterricht erfüllen können und welche Überlegungen in dieser Unterrichtseinheit erfolgt sind, findet sich in Teilkapitel 5.1.5 wieder.

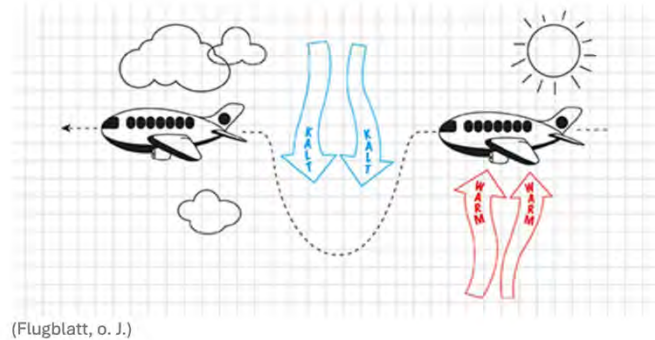


Abbildung 17: Screenshots aus dem dritten Video der Unterrichtseinheit, Perspektive von innen auf Flug durch ein Luftloch (Brahaj, 2019)

Zweites Arbeitsblatt

Da zum Kopf dieser Arbeitsblätter bereits alles gesagt wurde, lässt sich als nächstes zur Bild- bzw. Graphikwahl sagen, dass hier beim zweiten Arbeitsblatt keine Fotos mehr nötig sind, die das Experiment visuell erläutern oder in die Modellierung einführen. Die Zeichnung zur Situation eines durch ein „Luftloch“ fliegendes Flugzeug dient hier nicht nur der optischen Abwechslung auf einem Arbeitsblatt, sondern soll auch hier eine inhaltlich-helfende Rolle erfüllen (Pietsch, 2021, S. 31). Schon bevor in Aufgabe 1 der Einführungstext zur Definition eines Luftlochs gelesen wird, macht die Zeichnung klar, dass es eigentlich kein „Loch“ ist, in das das Flugzeug fällt (siehe Abbildung 18). Vielmehr wird durch die Windpfeile mit der Aufschrift „KALT“ deutlich, dass das Flugzeug durch Luftmassenbewegungen nach unten gedrückt bzw. gezogen wird.

„Luftloch“
Anwendung des zweiten Newton'schen Axioms



(Flugblatt, o. J.)

Abbildung 18: Zweites Arbeitsblatt, Titel und Bilder

Diese Definition eines Luftlochs wird allerdings nicht nur in Form des Bildes transportiert. Auch der in Aufgabe 1 folgende Text bietet die Möglichkeit die Vorgänge in einem Luftloch zu verstehen (siehe Abbildung 19). Somit ist für verschiedene Lernende ein unterschiedliches Auffassen der Informationen möglich. Durch die verschiedenen Darbietungen (Text und Bild) werden auch die Kompetenzen des Verbalisierens (Bild zu Text) oder des Darstellens (Text zu Bild) angesprochen (Pietsch, 2021, S. 31). Um zu überprüfen, inwieweit der Text verstanden wurde, bietet Aufgabe 1 die Möglichkeit diesen zusammenzufassen und auch bereits zu erklären, warum der Begriff des „Luftlochs“ eigentlich falsch bzw. irreführend ist. Dies ist als Vorarbeit für die

- 1) Liest zunächst die Definition eines „Luftlochs“ und fasst in eigenen Worten zusammen, was ein Luftloch ist und warum der Begriff irreführend bzw. eigentlich falsch ist.

WAS IST EIN LUFTLOCH?

Im Prinzip gibt es das Phänomen des Luftlochs nicht. Jedoch steht der Begriff für eine Wetter- und Windkonstellation, die ein Flugzeug binnen Sekunden in Turbulenzen bringen kann. Völlig unvorbereitet gerät die Maschine auf eine Art Achterbahnfahrt und sackt [...] in ein Loch nach unten. Für Passagier:innen stellt sich in diesem Moment ein Gefühl der Schwerelosigkeit ein. Piloten und Pilotinnen sprechen jedoch nicht von einem Luftloch, sondern bezeichnen diese Lage im Fachjargon als Turbulenzen in wolkenfreier Luft, kurz CAT. Aus physikalischer beziehungsweise meteorologischer Sicht handelt es sich um abwärts gerichtete Luftströmungen. Heizt die Sonne die Erdoberfläche auf, steigt warme Luft nach oben. So nutzen beispielsweise Segelflieger diese Aufwinde zu ihrem Vorteil, um mit der Thermik die gewünschte Höhe zu erreichen und zügig aufzusteigen. Manche Bereiche bleiben dagegen vergleichsweise kühl und die Luft sinkt dort wieder rapide nach unten ab. Dadurch entstehende Abwinde lassen ein Flugzeug ohne Vorwarnung einige Meter nach unten absacken. In der Nähe von Gewittern oder Stürmen setzen die Turbulenzen Kräfte frei, die Maschinen tatsächlich zum Absturz bringen können. Die abrupten Bewegungen des Flugzeugs machen vielen Passagier:innen Angst, doch eine große Gefahr geht von einem Luftloch in der Regel nicht aus. Im Cockpit werden CATs kaum mit Sorge betrachtet, lediglich die Einschränkungen der Bewegungsfreiheit im Flugzeug selbst [also das Anschlallen] sollte nach Ansicht von Pilot:innen möglichst ohne Zwischenfälle gewährleistet sein.

(Panorama Air, o. J.)

Abbildung 19: Zweites Arbeitsblatt, Aufgabe 1

Aufgaben sinnvoll (Schrackmann, 2022, S. 10), da für die wirkenden Kräfte auf das Flugzeug ein Verständnis des Luftlochs als Luftmassenbewegung essenziell ist.

Aufgabe 2 (siehe Abbildung 20) fordert das Experimentieren bzw. Modellieren ein und muss wie auch der Hinweis auf gemeinsame Kontrolle mit der Lehrkraft vor dem Ausdrucken der Diagramme nicht erneut begründen werden. Dies wurde bereits in der Analyse zum ersten Arbeitsblatt beschrieben.

- 2) Stellt die Situation des „sich durch ein Luftloch spontan nach unten bewegenden Flugzeugs“ experimentell *nach*. Dazu bekommt ihr wieder Eier und eine durchsichtige Kiste. Lasst euch wieder mit dem Video-Analyse-Programm ein v-t-Diagramm der *gefilmten* Bewegung des Experiments *ausgeben*. Die Kamera soll wieder still auf dem Tisch stehen und die ganze Bewegung von Kiste und Ei soll andauernd im Blickfeld der Kamera sein.
- a) Zunächst eine Aufnahme eures Experiments in Anlehnung an einen nicht angeschnallten Passagier.
 - b) Dann eine Aufnahme eines weiteren Experimentierdurchgangs, in dem ihr darstellt, dass der Passagier angeschnallt ist. (Dazu gibt es vorne am Pult wieder Klebeband.)

Wenn ihr damit fertig seid, lasst uns auch hier die Diagramme zusammen besprechen, bevor ihr sie ausdruckt und für die weiteren Aufgaben verwendet.

Abbildung 20: Zweites Arbeitsblatt, Aufgabe 2

Nun wird das v-t-Diagramm noch genauer analysiert als auf dem ersten Arbeitsblatt. Aufgabe 3 verlangt eine Berechnung der Beschleunigung des Eies bzw. Passagiers nach unten, sobald das Flugzeug im Luftloch absackt (siehe Abbildung 21). Dies können die Lernenden, da dies im vorherigen Unterricht zu den Themen der Bewegung, Geschwindigkeit und Beschleunigung geübt wurde. Außerdem handelt es sich bei der Erdbeschleunigung – wie sie dann in der nach dem Arbeitsblatt folgenden Besprechung im Plenum genannt wird – um eine konstante Beschleunigung, sodass das Einzeichnen eines Steigungsdreiecks in das v-t-Diagramm zur Lösung führt. Die folgende Aufforderung nach einem Namen für diese Kraft, die das Ei bzw. den Passagier nach unten beschleunigt, sollte aus dem Alltagswissen der Lernenden sehr wahrscheinlich erfüllbar sein. Falls dies nicht der Fall ist, gibt es in dem Fall den einfachen Hinweis, sich mit der Lehrkraft abzusprechen. Aufgabe 4 leitet

dann mit einem Verweis auf die Tatsache ein, dass diese „Erdanziehungskraft“ auf alle Objekte am und im Flugzeug wirkt. Dies ist hilfreich, um dann erläutern zu können, warum das Flugzeug noch stärker nach unten beschleunigt als nur die Passagiere darin. Mit diesen vier Aufgaben wäre das Phänomen eines Luftlochs bereits geklärt.

- 3) *Berechnet* anhand des v-t-Diagramms die Beschleunigung des Eies bzw. Passagiers nach unten, sobald das Flugzeug absackt. *Erläutert* dann, welche Kraft diese Beschleunigung nach unten „verursacht“. (Kontrolle auf Nachfrage 😊)

4) Nun wird das Flugzeug auch die ganze Zeit über durch die gleiche Kraft wie in Aufgabe 3 nach unten gezogen, da diese Kraft bekanntermaßen ständig auf alles wirkt (Flugzeug, Passagiere, Getränkewagen, ...). *Erkläre*, warum es nun trotzdem so wirkt, als ob die Passagiere im Flugzeug während des Flugs durch ein Luftloch nach oben gezogen werden.

Abbildung 21: Zweites Arbeitsblatt, Aufgabe 3 und 4

Die beiden letzten Aufgaben dienen eher der Vertiefung in die Physik hinter einem Luftloch. Aufgabe 5 beschäftigt sich mit den Bezugssystemen, in welchen die Bewegungen von Flugzeug und Passagier unterschiedlich aussehen (siehe Abbildung 22). Hier sollen die Lernenden lernen verschiedene Perspektiven einzunehmen und die Relativität von Bewegungen zueinander begreifen. Individualisierung und Differenzierung bietet Aufgabe 6, da sie eine offene Fragestellung beinhaltet und mehrere selbstgefundene Lösungen fordert (Pietsch, 2021, S. 33). Außerdem wird durch Aufgabe 6 überprüft, inwieweit die Lernenden das kennengelernte zweite Newton'sche Axiom zur Erklärung von beobachteten Bewegungen anwenden können. Dies stellt auch die benötigte Zuordnung von „beschleunigter Masse“ und „kraftausübendem Körper“ sicher. An dieser Stelle sei gesagt, dass dies physikalisch nicht ganz so einfach bzw. korrekt ist. Das dritte Newton'sche Gesetz wird erst im Anschluss an diese Unterrichtseinheit behandelt und greift die Frage nach einer *Gegenkraft* und der Beschleunigung oder Verzögerung des bisher nur kraftausübenden Körpers auf. Dazu wird ein weiterführender Ausblick im Kapitel 5.1.6. gegeben.

- 5) *Beschreibe*, wie die Bewegungen von Flugzeug und Passagier von einer außerhalb des Flugzeugs ruhenden Position aussehen würden und wie die Bewegungen von Flugzeug und Passagier für einen im Flugzeug befindlichen Passagier aussehen würden. *Frage* dich dabei jeweils, was sich scheinbar nach unten oder oben bewegt.
- 6) *Findet* mindestens drei „Momente“ während des Flugs durch ein Luftloch, die sich mit dem zweiten Newton'schen Axiom erklären lassen. *Ordnet* jeweils zu, welcher Körper die beschleunigte Masse ist, die ihr in eurem Beispiel betrachtet, und von welchem anderen Körper eine Kraft auf euren betrachteten Körper ausgeübt wird.

Abbildung 22: Zweites Arbeitsblatt, Aufgabe 5 und 6

Allgemein sei zu diesem Arbeitsblatt gesagt, dass es ein informierendes, vertiefendes und kontrollierendes Arbeitsblatt zugleich ist (Kirchner, Girwidz & Fischer, 2020, S. 320). Das liegt an den Informationsquellen durch Text und Bild, den tiefergehenden Fragestellungen zu den aufeinander-addierten Kräften von Schwerkraft und Kraft der nach unten strömenden Luftmassen, sowie der letzten Kontrollfrage nach weiteren Bewegungen aus dem aufgenommenen Video, die sich mit dem zweiten Newton'schen Axiom erklären lassen. Auch dieses Arbeitsblatt verfolgt den Sinn eines begleitenden Leitfadens, der Aufgaben enthält, welche die Lernenden auf einen Weg der Erkenntnisgewinnung bringen sollen. Da erneut nicht direkt auf das Arbeitsblatt zu schreiben ist, sondern nur die Aufgaben selbst das Blatt füllen, müsste richtigerweise eigentlich von einem *Aufgabenblatt* gesprochen werden (Pietsch, 2021, S. 33). Der Einfachheit halber wird in dieser Arbeit aber von *Arbeitsblättern* geschrieben. Durch die beiden Arbeitsblätter, welche die Lernenden möglichst allein bearbeiten können sollen, ist es der Lehrkraft möglich, individuell zu helfen und sicherzustellen, dass keine Gruppe zwischendurch ein falsches Arbeitsergebnis in die nächste Aufgabe trägt (Schrackmann, 2022, S. 4).

5.1.4 Experimente

In diesem Unterkapitel sollen sich die beiden Experimente der beiden Arbeitsblätter genauer angeschaut werden. Dazu werden selbstgeschossene Fotos der Experimente und Screenshots der Bewegungsanalyse-App gezeigt und analysiert. Während auf den Arbeitsblättern hauptsächlich von Eiern als

Passagieren die Rede ist, werden in diesem Unterkapitel auch Fotos mit einem Plüschbären als Passagier zu sehen sein. Dies dient – wie im folgenden Teilkapitel 5.1.5 erwähnt – dem Ressourcenschonen, kann aber auch Nachteile mit sich bringen, wenn es um das Zeigen konkreter physikalischer Sachverhalte geht. Dies wird im Folgenden stellenweise erläutert.

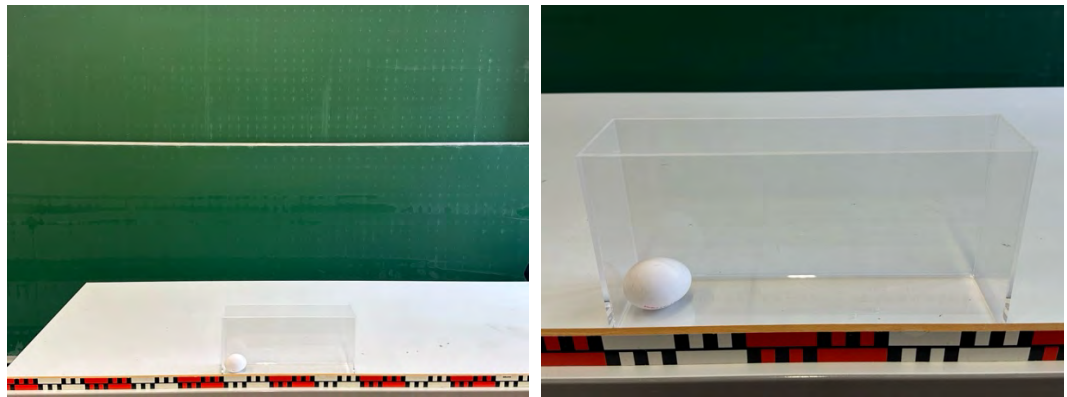


Abbildung 23: Aufbau des Experiments zum Startabbruch eines Flugzeugs mit Ei als Passagier

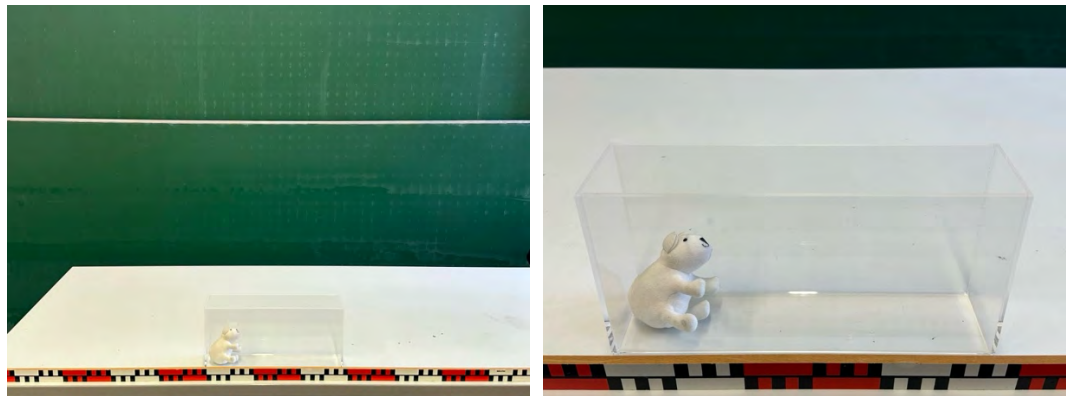


Abbildung 24: Aufbau des Experiments zum Startabbruch eines Flugzeugs mit Plüschbären als Passagier

In Abbildung 23 und 24 lassen sich die Modellierungen bzw. Übersetzungen von der realen Situation *Passagier im Flugzeug* hin zum Modell *Ei im durchsichtigen Plexiglas kasten* bzw. *Plüschbär im durchsichtigen Plexiglas kasten* sehen. Der in diesem Unterrichtsentwurf gewählte Ansatz der „reproduktiven Modellanwendung“ begründet sich damit, dass die Lernenden die Übersetzung nicht komplett selbst finden sollen wie bei der „konstruktiven

Modellfindung“, sondern das Modell hier eher als Hilfsmittel auf dem Weg zum Erkenntnisgewinn genutzt wird, indem zur Erklärung der aufgenommenen bzw. gemessenen Daten das Modell – in ausreichendem Abgleich mit der Realität – verwendet wird (Schlichting, 1977, S. 158). Das Modellieren in diesem didaktischen Zusammenhang findet sich auch als Kompetenz bzw. Ziel in den Bildungsstandards, z.B. im Hessischen Kerncurriculum wieder. Dort geht es um das Modellieren „zur Orientierung in einer zunehmend durch [...] Technik geprägten Welt“ (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 12) und dem Erkenntnisgewinn durch das „Arbeiten mit Modellen“ (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 13). In dieser Unterrichtseinheit dient das Modellieren bzw. Experimentieren dem Finden des zweiten Newton’schen Axioms durch das Abbilden eines komplexen realen Zusammenhangs in ein vereinfachtes Modell, das sich auf das wesentliche, was zur Lösung der Aufgaben nötig ist, beschränkt. Diese erkenntnistheoretische Funktion des Modellierens wird einer Studie von Dilling und Kraus (2024, S. 66-73) zufolge häufig von Lehrkräften genannt, wenn sie Modelle im Unterricht verwenden. Auch auf die didaktische Funktion im Sinne der Anschaulichkeit des physikalischen Sachverhalts für die Lernenden wird in diesem Unterrichtsentwurf zurückgegriffen.

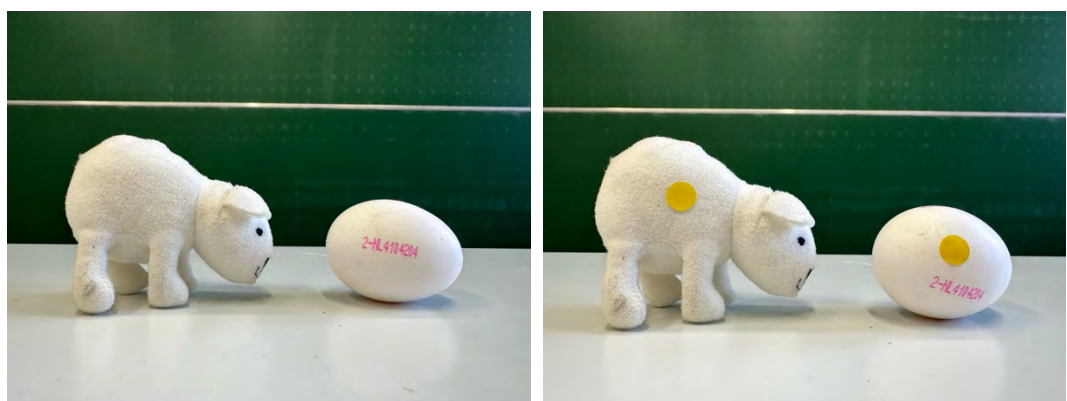


Abbildung 25: Markierung der Eier und Plüschbären durch einen farblich markanten Punkt

Damit die App die bewegten Objekte selbstständig im Video erkennen und verfolgen kann, werden farblich markante Punkte auf die Objekte geklebt

(siehe Abbildung 25). Wahrscheinlich funktionieren hierbei rote Punkte besser als die verwendeten gelben. Sollte die App nicht zur automatischen Bewegungserkennung fähig oder die Objekte zu schnell sein, bieten sich zwei Lösungen an. Entweder werden die Videoaufnahme-Einstellungen von *30 fps* (*frames per second* bzw. Bilder pro Sekunde) auf bis zu *120 fps* erhöht oder die Videoaufnahme wird manuell durchlaufen und in jedem Bild bzw. *frame* wird das sich bewegende Objekt eigenhändig markiert (siehe Abbildung 26).

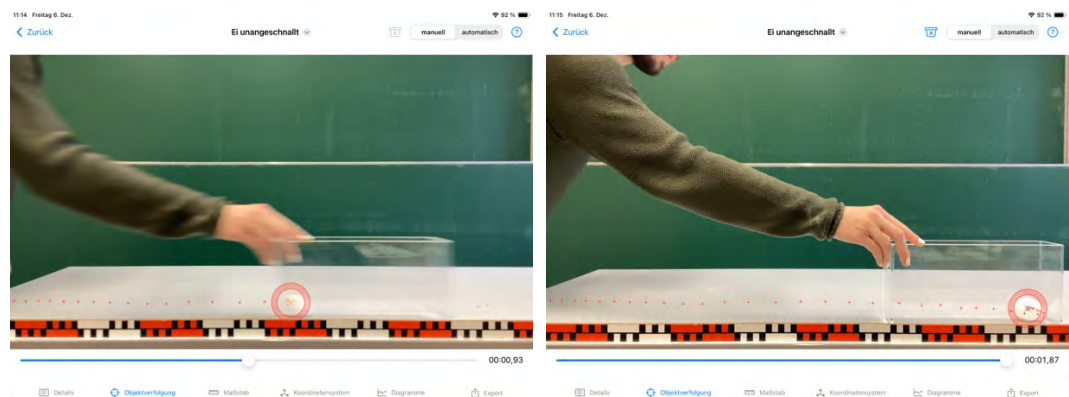


Abbildung 26: Manuelles Setzen der Punkte zur Objektverfolgung

Der abwechselnd weiß und rot bemalte Maßstab am unteren Bildrand aller Abbildungen dient in der Bewegungsanalyse-App zur Festsetzung eines Maßstabs (siehe Abbildung 27, rechts), damit die App aus den aufgenommenen Videos im Anschluss maßstabsgetreue v-t-Diagramme erstellen kann. Dies geschieht durch das Ziehen der roten Kreise auf relevante Markierungen im Video (siehe Abbildung 27, rechts). Außerdem sollte der relevante Videoausschnitt durch das Verschieben der grünen und roten Dreiecke ausgewählt werden (siehe Abbildung 27, links). Damit wird sichergestellt, dass nachher auf den v-t-Diagrammen nicht unnötig weite Bereiche ohne aussagekräftigen Graphen zu sehen sind.

Ein möglicher Bewegungsablauf des Plüschbären oder des Eies kann in Abbildung 28 betrachtet werden. Es ist deutlich zu sehen, dass der Plüschbär bis zum dritten Bild in Abbildung 28 an seiner hinteren Stelle im Kasten bleibt, während er in der Bremsphase des Experiments im Kasten (relativ gesehen)

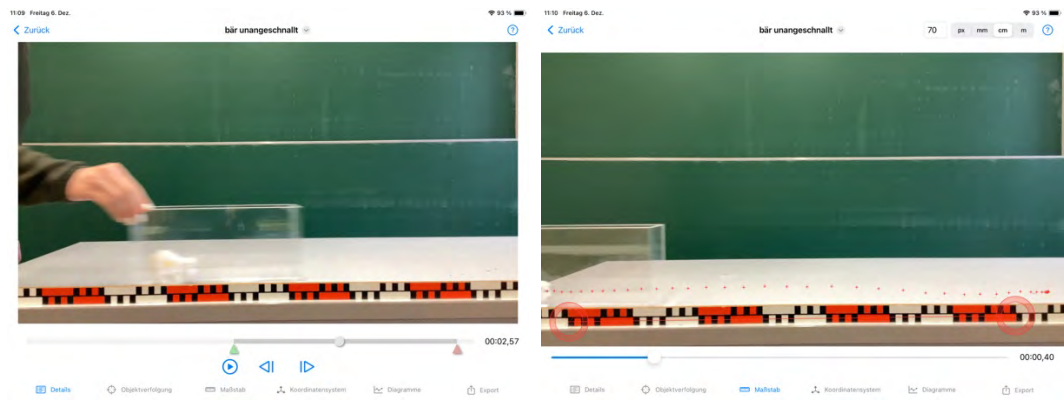


Abbildung 27: Auswählen des relevanten Videoausschnitts (links), Festsetzen des realen Maßstabs (rechts)

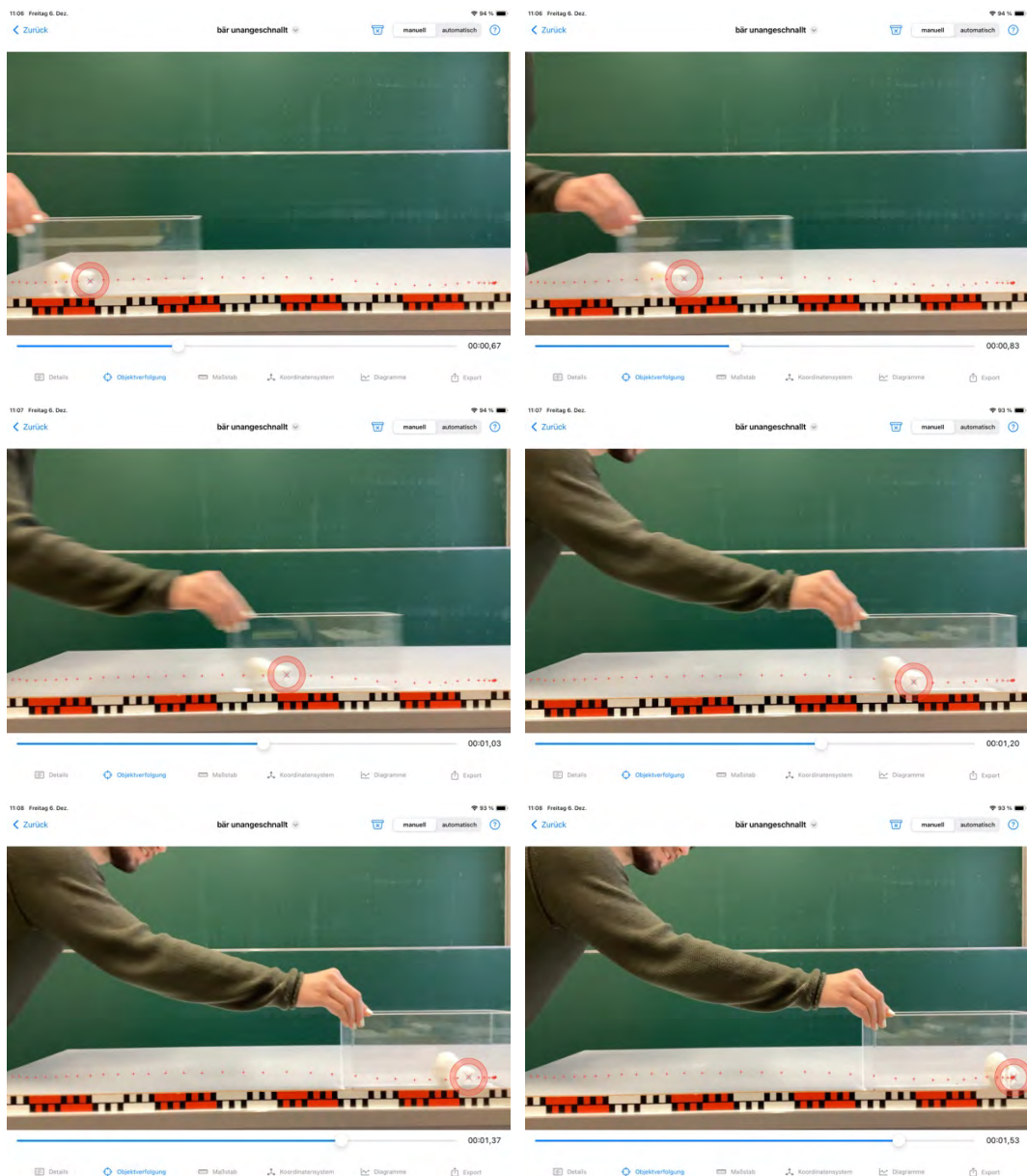


Abbildung 28: Ablauf eines Experimentiervorgangs zum Startabbruch des Flugzeugs

nach vorne rutscht. Da der Plüschbär im Gegensatz zum Ei aus Baumwolle und zudem auch leichter ist, schafft der Plüschbär es nicht immer beim modellhaften Abbremsen des durchsichtigen Kastens das Ende des Kastens zu erreichen. Das Ei hingegen ist schwerer und glatter, wodurch es eher bis an das Ende der Kiste rutscht, wenn die Kiste im Experiment gebremst wird. Dies mag für das spätere Finden der Newton'schen Axiome hilfreicher sein, da das Ei stark durch den Aufprall am Ende der Kiste gebremst wird (zweites Newton'sches Axiom) und sich bis dahin aber ziemlich gleichmäßig weiterbewegt (erstes Newton'sches Axiom).

Als nächstes wird in Abbildung 29 das Koordinatensystem im Sinne der Orientierung der Achsen positioniert. Dies ist für die Auswahl der korrekten Diagramme (x - t -Diagramm und v_x - t -Diagramm) wichtig. Allerdings ist hier bereits die Grundeinstellung korrekt gewesen, in der das Koordinatensystem unten links im Videoausschnitt positioniert wird. Anschließend lässt sich der Moment, zu dem das Ei an das Ende des Kastens stößt, gut im v - t -Diagramm erkennen (siehe Abbildung 29). Dieser Moment ist im Videoausschnitt, aber

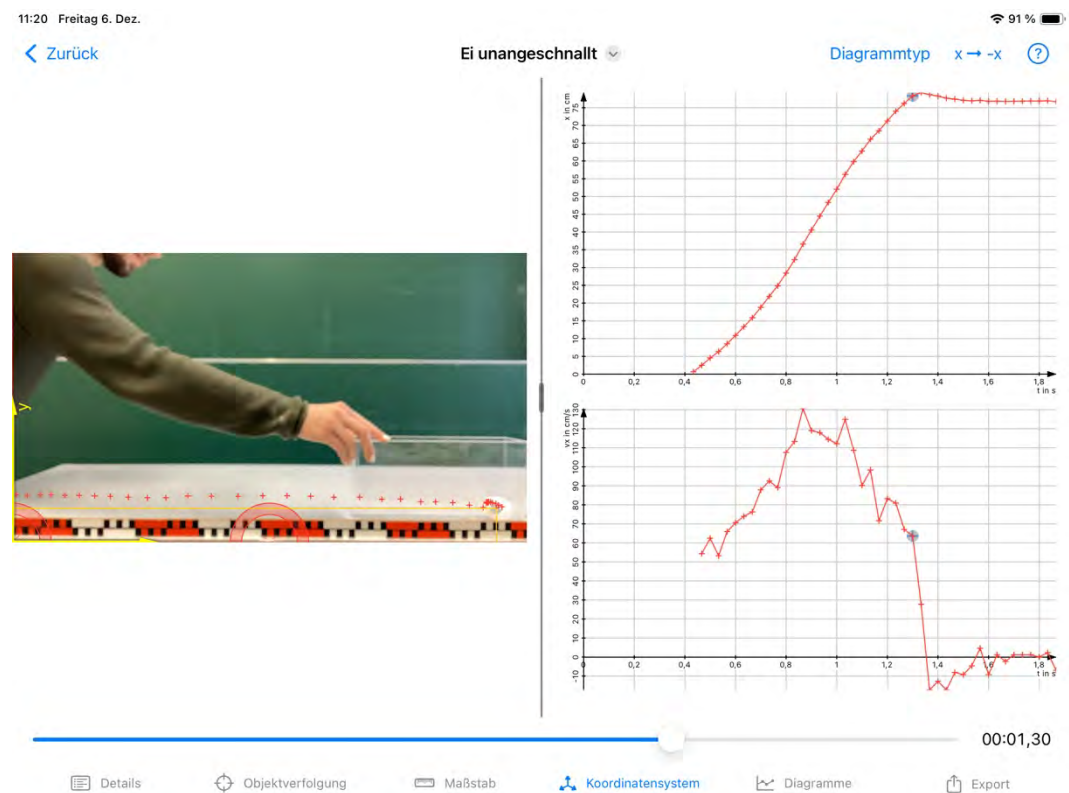


Abbildung 29: Vergleich von Videoausschnitt und Diagrammen mittels „grauen Punkten“

auch in beiden Diagrammen, durch einen grauen Punkt markiert. Das Ei verzögert stark, was sich durch den starken Abfall im v-t-Diagramm erkennen lässt. Mit diesem Diagramm ließe sich Aufgabe 2 vom ersten Arbeitsblatt der Unterrichtseinheit korrekt bearbeiten (siehe Abbildung 13), da als Grund für die abrupte Verzögerung der Zusammenstoß mit dem hinteren Ende des Kastens im Video zu erkennen ist. Diese Funktion mit dem grauen Punkt in Diagrammen und Videoausschnitt ist also eine sinnvolle Funktion der Bewegungs-Analyse-App.

In Abbildung 30 sind die Diagramme nochmals größer zu sehen. Gut zu erkennen ist auch, dass sich das Ei nach dem Zusammenstoß mit dem Ende des Kastens nicht mehr bewegt, da der Graph im v-t-Diagramm bei ca. 0 cm/s verweilt. Vor dem Aufprall des Eies mit dem Kasten ist leichtes Auf und Ab des Graphen im v-t-Diagramm zu sehen. Dies entsteht, da das händische Beschleunigen des Kastens am Anfang mit aufgezeichnet wird (ca. 0,5 s bis 0,9 s im v-t-Diagramm) und das Ei bereits leicht verzögert, während es durch

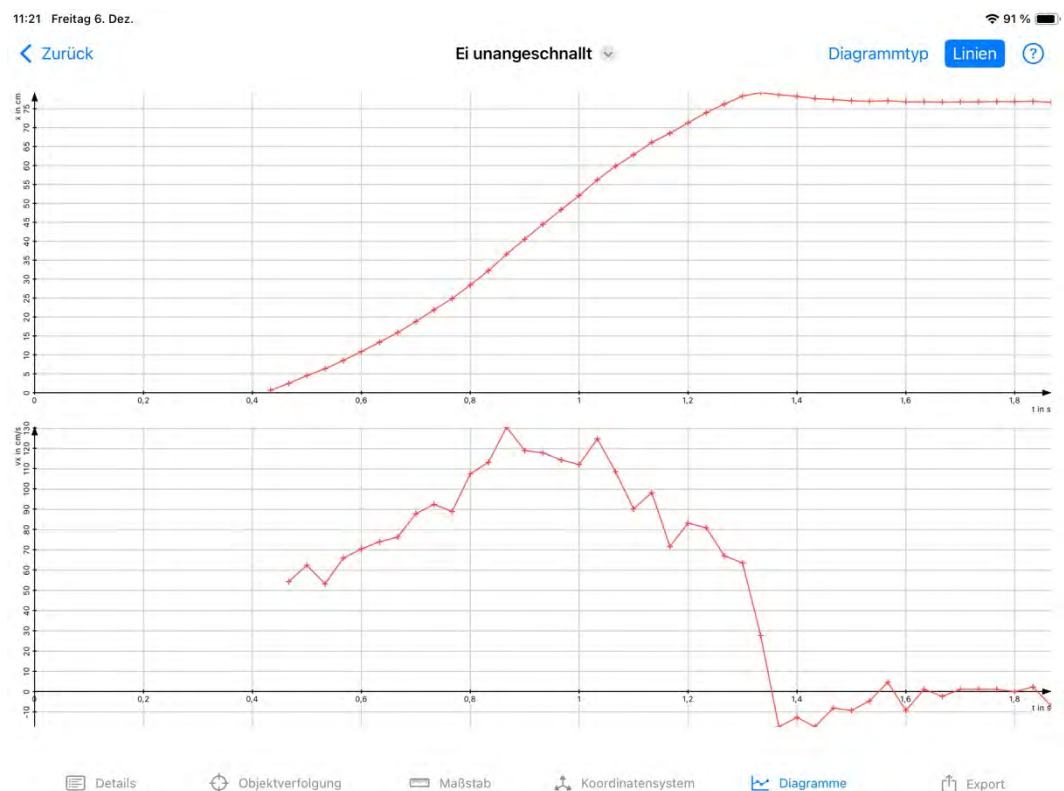


Abbildung 30: x-t- und v-t-Diagramme beim Experiment zum Startabbruch des Flugzeugs mit Ei als unangeschnalltem Passagier

den Kasten rutscht, sobald der Kasten selbst verzögert (ca. 0,9 s bis 1,3 s im v-t-Diagramm). Diese Dinge werden dann im Rahmen der Besprechung des ersten Arbeitsblattes erwähnt oder spätestens dann bearbeitet, wenn in den folgenden Stunden auch das erste Newton'sche Axiom behandelt wird.

Im Zuge von Aufgabe 1 des ersten Arbeitsblattes (siehe Abbildung 12) sollte auch ein Experimentierdurchgang mit angeschnalltem Ei bzw. Plüschbären durchgeführt werden. Diese Aufbauten sind in Abbildung 31 zu sehen. Tatsächlich bleiben sowohl Plüschbär als auch Ei an ihrem anfänglichen Platz im durchsichtigen Kasten, wenn dieser verzögert. Für die hier gezeigten Aufnahmen empfiehlt sich farbiges Isolier-Klebeband, da dieses eine starke Klebekraft hat und im Kontrast mit dem weißen Ei oder dem weißen Plüschbären klar zu sehen ist. Hier wurde daher sogar schwarzes Isolier-Klebeband benutzt.

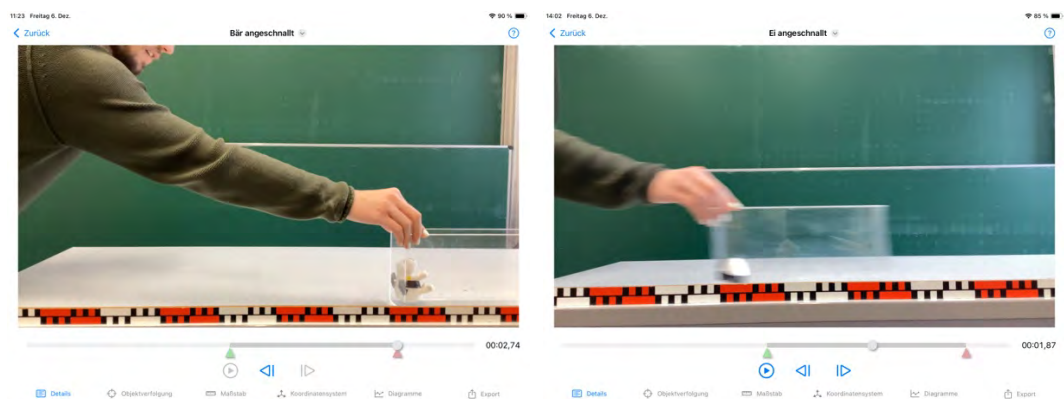


Abbildung 31: Experimentierdurchgänge zum Startabbruch des Flugzeugs mit angeschnalltem Plüschbären bzw. Ei

In den dazugehörigen v-t-Diagrammen lassen sich dann auch keine abrupten Verzögerungen mehr erkennen (siehe Abbildung 32), was in Aufgabe 3 des ersten Arbeitsblattes auch zur Begründung von Sicherheitsgurten im Allgemeinen verwendet werden kann (siehe Abbildung 13). Hier lohnt es sich also Abbildung 30 mit Abbildung 32 zu vergleichen.

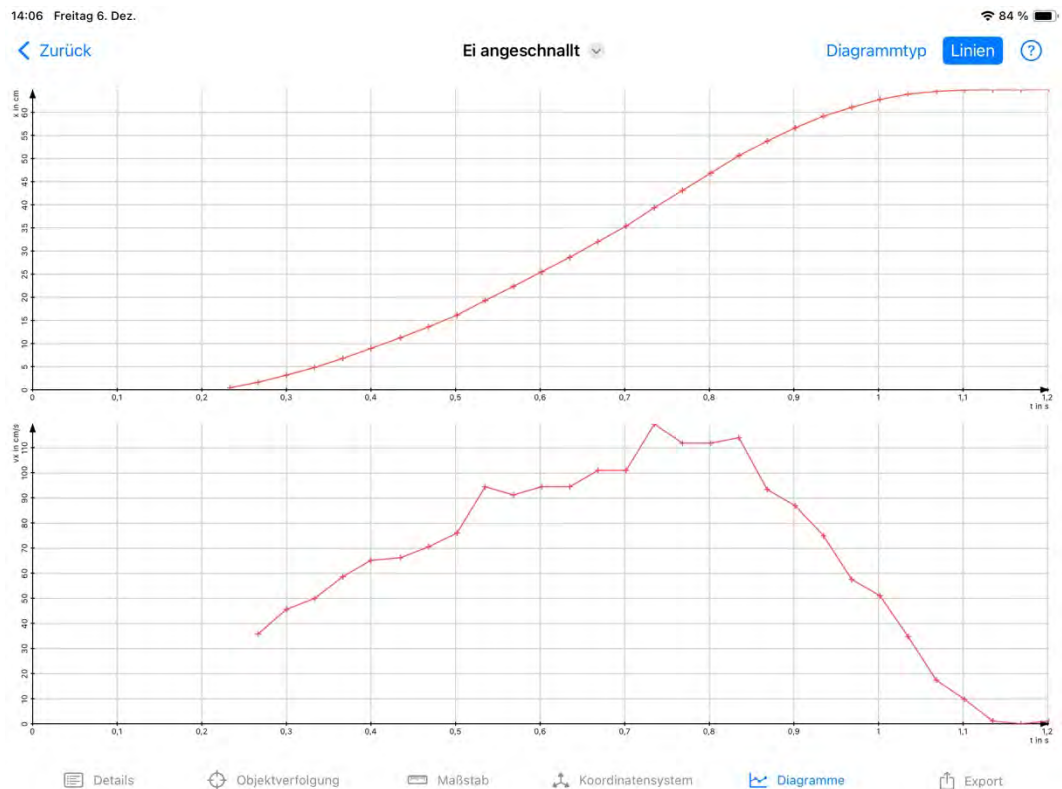


Abbildung 32: x - t - und v - t -Diagramme beim Experiment zum Startabbruch des Flugzeugs mit Ei als angeschnalltem Passagier

Das zweite größere Experiment, das in dieser Unterrichtseinheit durchgeführt werden soll, ist das Modellieren des Flugs durch ein Luftloch. Dies wird dargestellt, indem sich der durchsichtige Plexiglaskasten wie bisher auch von links nach rechts im Video bewegt. Allerdings passiert dies nun nicht auf dem Tisch, sondern in einer ausreichenden Höhe über dem Tisch, auf dem der Maßstab liegt. Anschließend wird mit einer abrupten Handbewegung der Kasten samt Ei bzw. Plüschbären zusätzlich nach unten beschleunigt. Kurz vor dem Aufprall auf dem Tisch wird der Kasten wieder verzögert, damit es zu keinen Schäden am Mobiliar oder an den für das Experiment benötigten Utensilien kommt. Im vierten Bild von Abbildung 33 lässt sich erkennen, dass sich der Bär bereits vom Boden des Kastens löst. Im folgenden fünften Bild ist deutlich zu erkennen, dass der Kasten schneller nach unten beschleunigt als der Bär. Ab dem sechsten Bild berührt der Bär dann wieder den Boden des Kastens, wodurch klar ist, dass der Kasten seine stärkere Beschleunigung nach unten beendet haben muss. Dass die Arbeitsgruppen die Bewegung

korrekt bzw. ausreichend stark ausgeführt haben, kontrolliert die Lehrkraft nach der Bearbeitung von Aufgabe 2, wenn die v-t-Diagramme vor dem

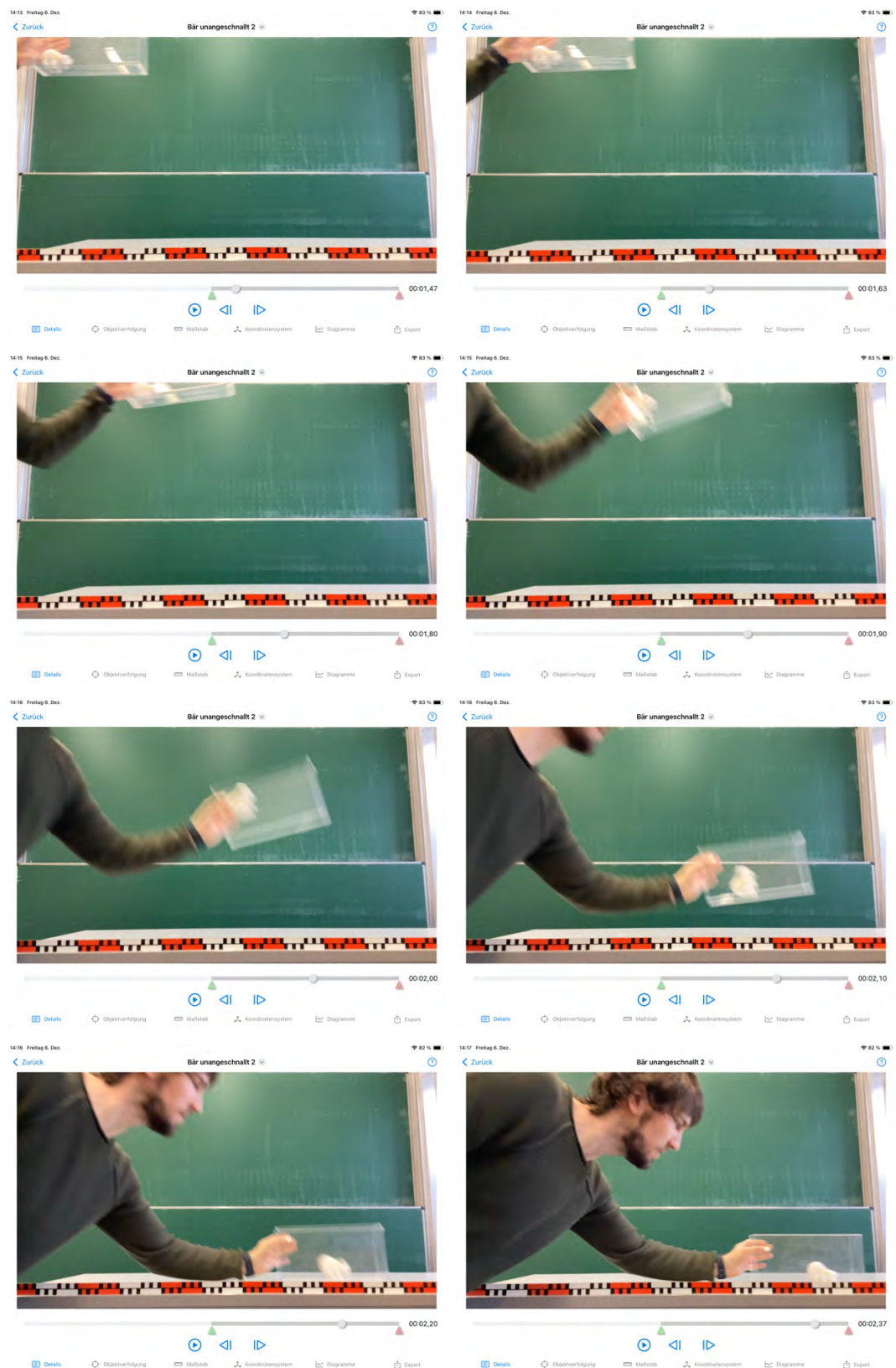


Abbildung 33: Ablauf eines Experimentiervorgangs zum Flug durch ein Luftloch

Ausdrucken betrachtet werden (siehe Abbildung 20). Dies ist wichtig, damit die folgenden Aufgaben 3 und 4 sinnvoll bearbeitet werden können (siehe Abbildung 21). Hier können schnell Fehler passieren, da beispielsweise nicht mehr die horizontale Geschwindigkeit gemessen werden soll, sondern die vertikale. Damit müssen in der Bewegungsanalyse-App nun die y-Komponenten des Ortes und der Geschwindigkeit aus den zur Verfügung stehenden Diagrammen rausgesucht werden (y-t-Diagramm und v_y -t-Diagramm).

Beim Betrachten der Diagramme dieser Bewegung lässt sich ein gradliniger Abfall des Graphen im v-t-Diagramm zwischen 0,5 s und 0,76 s erkennen. Im Vergleich zum Video fällt auf, dass dies die Zeitspanne ist, in welcher der Bär im nach unten beschleunigenden Kasten selbst unberührt hinabfällt (siehe Abbildung 34). Damit lässt sich also die Erdbeschleunigung bestimmen und auf die Erdanziehungskraft zurückführen. Dies ist für die Aufgaben 3 und 4 des

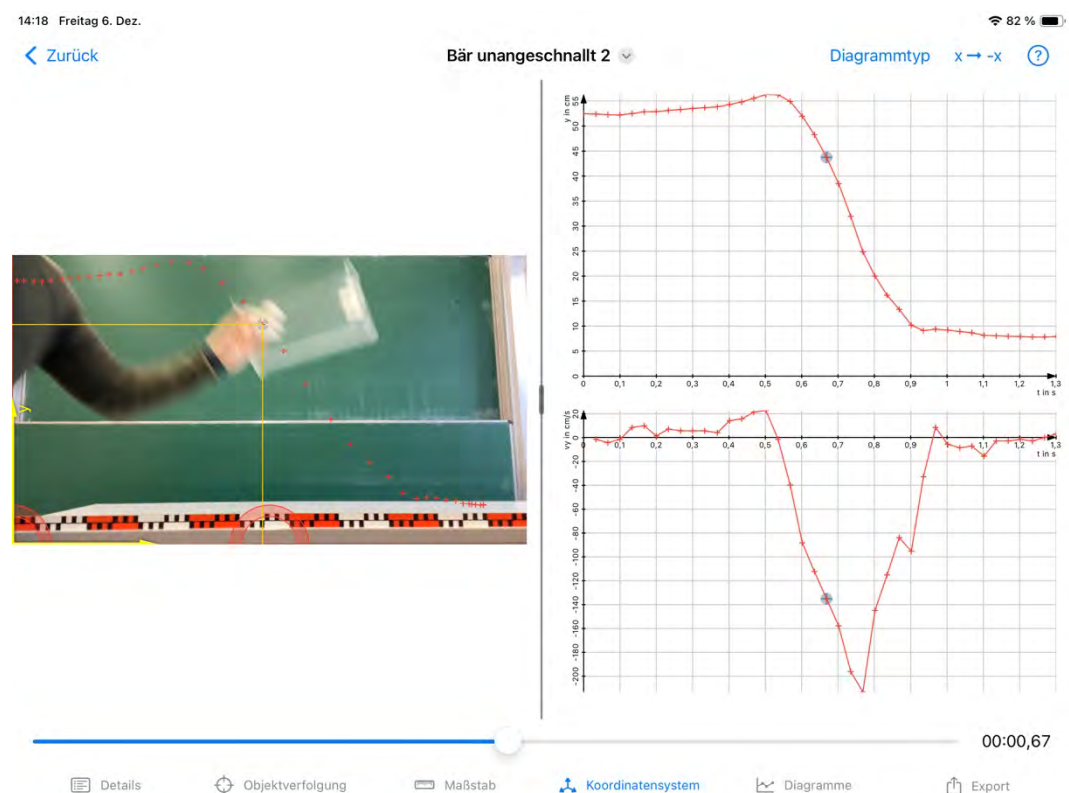


Abbildung 34: Vergleich von Videoausschnitt und Diagrammen mittels „grauen Punkten“ zur Bestimmung der Erdbeschleunigung bzw. zum Erkennen der „Erdanziehungskraft“ auf den Plüschbären

zweiten Arbeitsblattes relevant und wird je nach bisherigem Kenntnisstand der Lernenden mehr oder weniger ausführlich in der Besprechung des Arbeitsblattes analysiert (siehe Teilkapitel 5.1.3 und 5.1.6). Beispielhaft wird die Berechnung des Betrags von $\vec{g}$ hier mittels Steigungsdreiecks einmal durchgeführt:

$$g = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{(-220 \text{ cm/s}) - 20 \text{ cm/s}}{0,76 \text{ s} - 0,5 \text{ s}} = \frac{-240 \text{ cm/s}}{0,26 \text{ s}} = 923,0769 \text{ cm/s}^2$$

Dieser Wert entspricht einer berechneten Erdbeschleunigung von $g_{\text{berechnet}} = 9,23 \text{ m/s}^2$ und ist damit nicht weit vom Literaturwert von $g_{\text{Literatur}} = 9,81 \text{ m/s}^2$ entfernt (Demtröder, 2021, S. 46).

Für das gleiche Experiment, aber mit dem Ei als Passagier, ergibt sich folgendes v-t-Diagramm (siehe Abbildung 35). Auch hier ließe sich die Erdbeschleunigung bestimmen. Es macht bei dieser Gelegenheit aber Sinn, einen weiteren Teil des v-t-Diagramms zu betrachten. Sobald das Ei auf den



Abbildung 35: Vergleich von Videoausschnitt und Diagrammen mittels „grauen Punkten“ zur Bestimmung von „Momenten“, in denen das zweite Newton'sche Axiom wirkt

Boden des Kastens aufprallt, verzögert es sehr stark und sehr abrupt. Das lässt sich an dem steilen Anstieg des Graphen zwischen 0,96 s und 1,03 s erkennen. Die Lernenden könnten diesen Moment als Beispiel für die Anwendung des zweiten Newton'schen Axioms im Sinne von Aufgabe 6 des zweiten Arbeitsblattes verwenden (siehe Abbildung 22).

Mit Eiern, statt mit Plüschbären, zu experimentieren hat neben dem nachteiligen Ressourcenverbrauch allerdings zwei gravierende Vorteile. Zum einen lässt sich anschaulich erfahren, was der Vorteil eines Sicherheitsgurtes ist, da das gleiche Experiment mit „angeschnalltem Ei“ tatsächlich dazu führt, dass das Ei in den meisten Fällen nicht mal einen Riss in der Schale ausweist (siehe Abbildung 36, links). Zum anderen macht das Experimentieren tatsächlich vielen Lernenden nochmal mehr Spaß, wenn auch mal Dinge kaputt gehen dürfen, was an den in diesem Fall aufkommenden aufbrausenden und imposanten Gefühlen von Macht und Neugier liegt (Jarrett, o. J.). Das Ei kann nach dem ungebremssten Aufprall auf dem Boden der Kiste mehr oder weniger zerstört sein (siehe Abbildung 36, rechts).

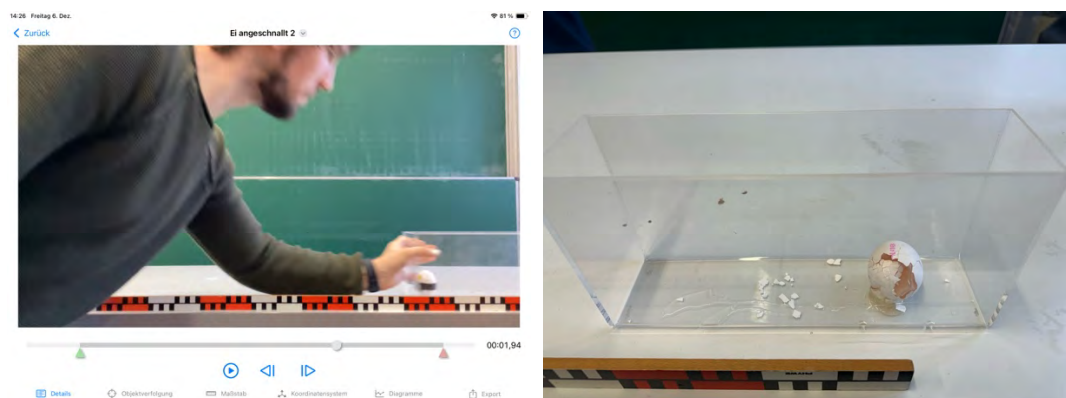


Abbildung 36: Ergebnis des Experimentierdurchgangs mit Ei als angeschnalltem Passagier (links) bzw. unangeschnalltem Passagier (rechts)

Zuletzt bietet sich noch ein Blick auf die Diagramme des angeschnallten Plüschbären bzw. des angeschnallten Eies an (siehe Abbildung 37). Die errechnete Beschleunigung $\vec{a} = 13,84 \text{ m/s}^2$, mit der sich – in dem Fall – Bär

und Kiste zusammen nach unten bewegen, ist ungleich der Erdbeschleunigung $\vec{g}$.

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{(-180 \text{ cm/s}) - 0 \text{ cm/s}}{1,2 \text{ s} - 1,07 \text{ s}} = \frac{-180 \text{ cm/s}}{0,13 \text{ s}} = 1.384,6153 \text{ cm/s}^2$$

Dies zeigt zunächst einmal, dass in dem Fall nicht die Erdbeschleunigung das Absacken der Kiste beschreibt, sondern die führende Hand eine Kraft auf die Kiste samt Bären ausübt. Analog ist in der Realität bei einem Luftloch ein zusätzlicher Windstoß von oben – also auch eine Kraft – der Grund für das extreme Absacken des Flugzeugs. Außerdem zeigt dies, dass Sicherheitsgurte die Funktion haben, Passagiere und Flugzeug aneinander zu halten, damit diese nicht frei durch die Kabine fliegen können und gegen Decke oder Vordersitz stoßen.

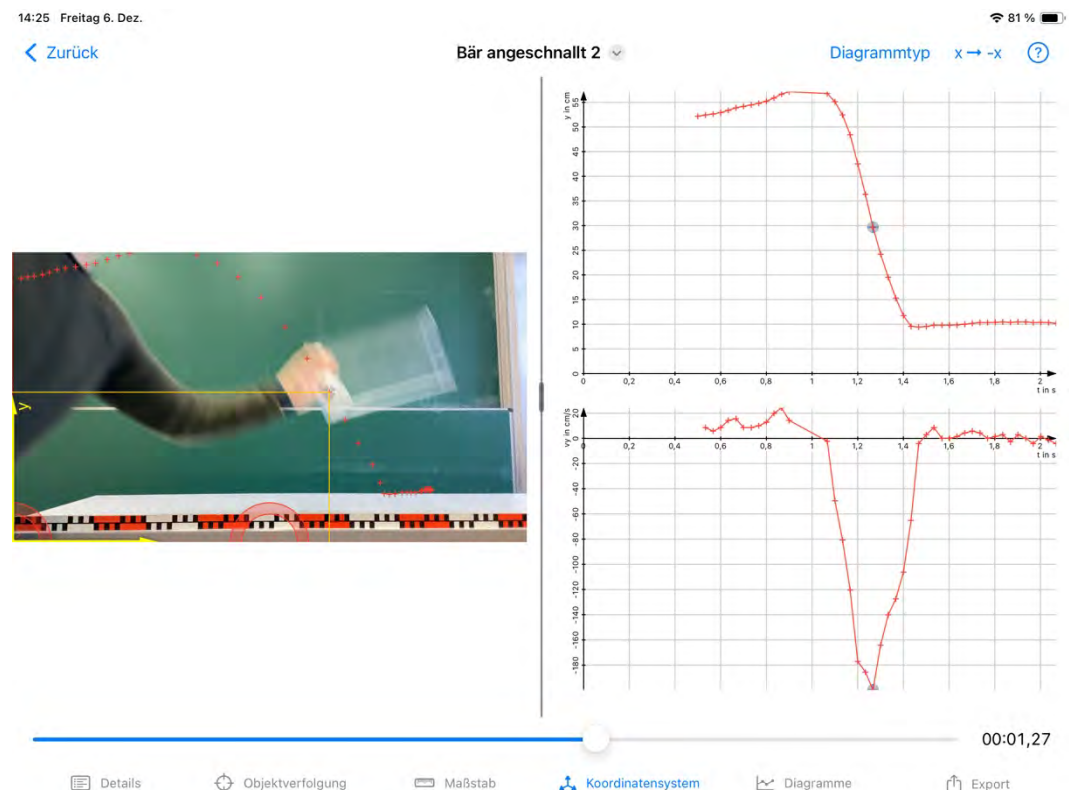


Abbildung 37: Vergleich von Videoausschnitt und Diagrammen mittels „grauen Punkten“ zur Berechnung der Beschleunigung durch die führende Hand bzw. den vertikalen Windstoß in einem „Luftloch“

Alle in diesem Teilkapitel verwendeten Screenshots zeigen die Benutzeroberfläche der Bewegungsanalyse-App *Viana 2*, welche durch die Freie Universität Berlin entwickelt und evaluiert wird (Schwarzahns & Nordmeier, o. J.). Ein Abbild des App-Symbols findet sich in der folgenden Abbildung 38.

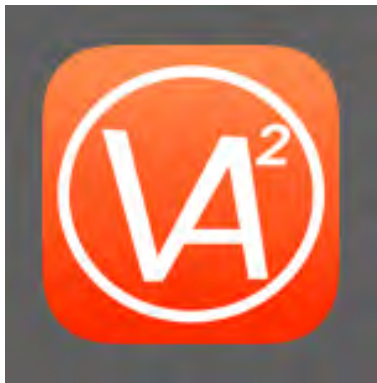


Abbildung 38: Appsymbol von Bewegungs-Analyse-App Viana 2 (Screenshot von für Experiment benutztem Tablet)

5.1.5 Didaktische & Methodische Begründung

In diesem Unterkapitel werden didaktische und methodische Entscheidungen des ersten Unterrichtsentwurfs begründet und belegt. Dies passiert später auch bezüglich des nächsten Unterrichtsentwurfs zur Notrutsche.

Zu Beginn der ersten Stunde dieses hier präsentierten ersten Unterrichtsentwurfs bieten die Videos eines Startabbruchs aus verschiedenen Perspektiven die Möglichkeit der Motivation für die Beschäftigung mit Flugsicherheit allgemein, aber auch mit der Physik, welche gewisse Sicherheitsentscheidungen begründet (z.B. Anschnallgurt). Gleichzeitig wird das Verwenden von Videos zur Erläuterung oft als anschaulicher bewertet, verglichen mit einem längeren Text (Petri-Ouani & Löffler, 2023, S. 7). Die Aufmerksamkeit der Lernenden sollte zu Beginn der Stunde damit vorhanden sein. Auch das kritische Hinterfragen von gezeigten Videos bzw. darstellenden Medien im Internet kann hier durch eine kurze Diskussion zum Unterrichtsbeginn gefördert werden. Dies wird auch in

verschiedenen Curricula der Länder so erwähnt, beispielsweise im Hessischen Kerncurriculum (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 8).

In der Erarbeitungsphase der ersten Stunde bietet sich das Modellieren der Situation des bremsenden Flugzeugs durch ein Ei und einen durchsichtigen Kasten an, da für das Überprüfen von Sachverhalten in Kontexten (wie es hier mit der Flugsicherheit der Fall ist) die Kompetenz des Modellierens unabdingbar ist (Kirchner, Girwidz & Fischer, 2020, S. 450). Zugegebenermaßen handelt es sich in dem hier dargestellten Unterrichtsentwurf nicht um reines Modellieren, sondern eher um „Organisierendes Experimentieren“, welches eine Mischung aus einer durch die Lehrkraft gegebenen Experimentieranleitung und einer komplett offenen Material- und Fragestellungsbeschaffung auf Seiten der Lernenden ist (Kirchner, Girwidz & Fischer, 2020, S. 448). Dieser Unterricht ist schülerzentriert und zumindest teilweise schülerorientiert (Kirchner, Girwidz & Fischer, 2020, S. 448), da die Lernenden hier Materialien und Fragestellungen in Form eines Arbeitsblattes bekommen, sich aber die Durchführung und Zusammensetzung des Experiments selbst überlegen müssen. Anschließend wird beim Aufnehmen der Experimente mit den Tablets eine Bewegungsanalyse-App benutzt. Diese gibt es von vielen verschiedenen Anbietern. Sie erkennt Bewegungen von ausgewählten und markierten Objekten und erstellt dazu automatisch s-t- oder v-t-Diagramme. Mobile Videoanalyse-Apps können zu einem höheren Lernerfolg bei den Lernenden führen, gerade auch in Bezug auf beschleunigte Bewegungen (Becker, Klein, Gößling & Kuhn, 2019, S. 14). Außerdem ermöglichen die erstellten Diagramme das Weiterarbeiten mit selbigen, z.B. zum Berechnen der Beschleunigung in einem Zeitraum mit gleichmäßig ansteigender oder fallender Geschwindigkeit. Dies passiert nachher im Zuge des zweiten Arbeitsblattes dieses Unterrichtsentwurfs.

Das Durchführen des Experiments bzw. das Bearbeiten des ganzen Arbeitsblattes in Gruppen soll verschiedene Ideen und Betrachtungsweisen auf das Experiment bzw. die Fragestellungen möglich machen, um zu einem insgesamt kreativeren und abgewogeneren Ergebnis zu kommen (Kirchner,

Girwidz & Fischer, 2020, S. 244-245). Außerdem dient Gruppenarbeit dem sozialen Lernen, was die sozialen und zwischenmenschlichen Kompetenzen der Curricula abdeckt, z.B. „Kooperation und Teamfähigkeit“ im Hessisches Kerncurriculum (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 9). Gleichzeitig werden durch Gruppenarbeit weniger Materialien gebraucht, als es bei Partner- oder Einzelarbeit der Fall wäre. Dies ist bei benötigten Utensilien wie durchsichtigen Kisten oder Eiern sicherlich hilfreich. Das anschließende Präsentieren der Ergebnisse durch eine Gruppe scheint zunächst die Arbeitsergebnisse der anderen Gruppen weniger wertzuschätzen. Da sich aber alle Gruppen bei der Sicherung der Ergebnisse beteiligen können und die vortragende Gruppe ergänzen bzw. korrigieren sollen, werden alle Arbeitsergebnisse wertgeschätzt und zumindest teilweise verwendet. Sicherlich lässt sich an dieser Stelle aber auch eine andere Präsentationsmöglichkeit als Sicherung der Stunde verwenden, um Kompetenzbereiche der Kommunikation bzw. Präsentation abzudecken (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 13).

Die zweite Stunde der Unterrichtseinheit beginnt mit einer kurzen Wiederholungseinheit, um sich dem neu erlernten Wissen bzw. den neu erlernten Kompetenzen der ersten Stunde zu vergewissern. Um dies nicht in der gängigsten Form zu tun, indem die Lehrkraft nur Wiederholungsfragen stellt und die Lernenden im Sinne des Charakters eines mündlichen Tests antworten, wird hier eher auf die Methode des *reziproken Lehrens* zurückgegriffen. Das bedeutet, dass die Lernenden selbst Fragen stellen und sich gegenseitig im Klassenverbund drannehmen (Hattie, 2023, S. 378). Sie übernehmen damit teilweise die Rolle der Lehrkraft und benutzen damit Lernstrategien wie das Zusammenfassen, Fragen und Vorhersagen (Hattie, 2023, S. 378). Mit einer Effektstärke von 0,74 auf den Lernzuwachs der Lernenden ist diese Art des Lehrens und Lernens eine der stärksten unter allen in der Hattie-Studie gemessenen Lehr- und Lernmethoden (Hattie, 2023, S. 388). Trotzdem erfüllt die Lehrkraft hier eine wachende und kontrollierende Rolle, indem sie am Ende dieser Selbstbefragungsrunde der Lernenden eventuell noch Fragen stellt oder auf Probleme hinweist, die die Lernenden nicht selbst genannt haben.

In der folgenden Unterrichtsphase zeigt die Lehrkraft verschiedene Bilder von beschleunigten Bewegungen, denen sichtbar eine Krafteinwirkung durch einen anderen Körper zugrunde liegt (siehe Abbildung 14). Durch Moderation dieser Unterrichtsphase sollte es der Lehrkraft gelingen, die Lernenden dazu zu bringen, selbst auf die Idee der „Beschleunigung durch eine Krafteinwirkung“ zu kommen. In einem Bild übt der Fuß eine Kraft auf dem Ball aus, welcher gleichzeitig beschleunigt wird. In einem anderen Bild bremst die Wasseroberfläche den Körper des Turmspringers ab, welcher in dem Moment verzögert. Dass Verzögerung nur eine Beschleunigung in die negative Bewegungsrichtung ist, ist den Lernenden bereits klar. Daher sollte diese Unterrichtsphase zu nicht allzu großen Problemen führen. Anschließend werden gemeinsam Zeichnungen angefertigt, die diesen Zusammenhang zwischen Kraft und Beschleunigung auf das durchgeführte Experiment mit Ei und Kasten übertragen (siehe Abbildung 15). Auch hier sollte es durch die Moderation der Lehrkraft gelingen, dass die Beschleunigungs- und Kraftpfeile richtig eingezeichnet werden, da diese Größen bereits zuvor als Vektoren im Unterricht betrachtet wurden. Anschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse in Form eines Merksatzes oder einer Regelformulierung zusammengetragen. Diesen neuen Zusammenhang benennt die Lehrkraft als „Erstes Newton’sches Axiom“. Dass die Proportionalitätskonstante zwischen Beschleunigung $\vec{a}$ und Kraft $\vec{F}$ die Masse m des Körpers ist, auf welchen die Kraft wirkt, kommt in dieser Unterrichtsplanung als zusätzliche Information von der Lehrkraft. Sicherlich lassen sich dazu auch weitere Experimente durchführen, sodass diese Konstante von den Lernenden selbst erarbeitet wird. Der hier dargestellte Unterrichtsverlauf dient nur als beispielhafte Darstellung und kann jederzeit ergänzt oder abgeändert werden. An dieser Stelle wird aber nur kurz auf die Konstante eingegangen, da es hier erstmal nur um den Zusammenhang von Beschleunigung und Kraft geht und das Finden des ersten Newton’schen Axioms bereits einiges an Aufmerksamkeit für neue Informationen erfordert. Dieser in diesem Abschnitt formulierte zentrierte und *darstellende Unterricht* kann in einem Setting, in welchem den Lernenden noch Informationen zur Lösungserarbeitung bzw. -formulierung fehlen, sinnvoll sein, um eben diese Wissens- und Kompetenzvoraussetzungen für

schwierige Themen erst einmal zu schaffen (Kirchner, Girwidz & Fischer, 2020, S. 135).

Um zu verstehen, dass das Erste Newton'sche Axiom nur ein Spezialfall des Zweiten Newton'schen Axioms ist, folgt ein Arbeitsauftrag an die zuvor bereits arbeitenden Gruppen. Durch die Analyse der selbst-erstellten Aufnahmen der Bewegung von Ei und Kasten werden Momente bzw. Zeiträume im Ablauf gesucht, in welchen sich das Ei gleichmäßig – also mit konstanter Geschwindigkeit – bewegt. Nun wird methodisch deduktiv gearbeitet, da das allgemeine Gesetz (Erstes Newton'sches Axiom) bereits bekannt ist und mit einem Experiment bzw. der Analyse eines bereits durchgeführten Experiments bestätigt bzw. spezifiziert wird. Den Lernenden sind also die nötigen Vorkenntnisse bereits bekannt und es muss anschließend nur eine Sicherung der Ergebnisse geben (Kirchner, Girwidz & Fischer, 2020, S. 137). Diese Sicherung bzw. Regelformulierung, bei welcher die Lehrkraft fast nur noch den Namen ergänzen muss (Erstes Newton'sches Gesetz), passiert dann auch in der letzten Unterrichtsphase der zweiten Stunde.

Da bereits alle in der folgenden bzw. dritten Stunde vorkommenden Methoden, Sozialformen und Medien im Rahmen der ersten und zweiten Stunde begründet wurden, dient dieser letzte Absatz zur dritten Stunde eher dazu, begründete Hinweise und Tipps zur Durchführung dieser Stunde zu geben. Die dritte Stunde beginnt wieder mit einem kurzen Video zur Motivation der Stunde bzw. dessen inhaltlicher Fragestellung bzgl. der teils heftigen Bewegungen von Passagieren beim Flug durch ein „Luftloch“. Anschließend arbeiten die Gruppen, welche diesmal im Sinne der Abwechslung gerne neu zusammengesetzt werden können, an einem sie führenden Arbeitsblatt zur Erarbeitung der wirkenden Kräfte während eines Flugs durch ein Luftloch. Diesmal kann die Experimentdurchführung aber auch mit kleinen Kuscheltieren oder Spielfiguren durchgeführt werden, damit nicht unnötig viele Eier gekauft bzw. zerstört werden müssen. Auch das anschließende Säubern aller Utensilien fällt dann am Stundenende im Sinne eines ausführlicheren inhaltlichen Arbeitens weg. In der diese Unterrichtseinheit abschließenden Sicherung tragen eine oder (je nach zu besprechender

Aufgabe des Arbeitsblattes) mehrere Gruppen ihre Ergebnisse vor. Der Lehrkraft kommt in dieser Phase eine wichtige Rolle zu. Während der Bearbeitung des Arbeitsblattes dient die Lehrkraft zwischendurch als Vergewisserungsinstanz, damit die Gruppen mit korrekten Ergebnissen einzelner Teilaufgaben an den noch kommenden Teilaufgaben weiterarbeiten können. Sollte es in der gemeinsamen Besprechung dazu kommen, dass Begriffe wie „Schwerkraft“, „Gewichtskraft“ oder „Erdbeschleunigungskraft“ nicht genannt werden, bezieht sich die Lehrkraft bei Besprechung von Aufgabe 3 und 4 nochmals darauf. Hierbei ist nicht wichtig, dass $\vec{F}_G = m \cdot \vec{g}$ bereits als solche Formel bekannt ist, sondern eher, dass die durch Alltagssprache bekannte „Schwerkraft“ auch im Beispiel mit dem Passagier im Flugzeug wirkt und eine Beschleunigung nach unten bewirkt. Auch bei der Besprechung von Aufgabe 4 und 5 ist es wichtig auf die verschiedenen Beobachtungsperspektiven einzugehen und diese als statische oder sich mitbewegende *Bezugssysteme* zu bezeichnen. Sollte diese Unterscheidung nicht von Seiten der Lernenden erfolgen, kann die Lehrkraft hier interagieren. Dies sollte aber angesichts des ausführlichen und führenden Arbeitsblattes vermutlich nicht nötig sein. Zuletzt soll noch ein Merksatz zu Bezugssystemen formuliert werden. Dieser wird diesmal aber nicht vorgegeben, sondern von den Lernenden formuliert. Dies fördert auch Kompetenzen des allgemeinen wissenschaftlichen Arbeitens (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 14-16), wovon das Präsentieren nach dem Experimentieren bzw. Sammeln von Daten ein Teil ist (Kirchner, Girwidz & Fischer, 2020, S. 266). Die Lernenden merken so, dass ihre Arbeit auf dem Weg hin zum Merksatz sinnvoll und nötig war, um diesen zu formulieren.

Eventuell ist das Bearbeiten des Arbeitsblattes, inkl. Experiment und Aufnahme dessen, sowie das Besprechen dergleichen zu umfangreich für eine Schulstunde. Auch hier gilt wieder, dass mit diesen Unterrichtsentwürfen variabel umzugehen ist. So kann die Besprechung der vorherigen Arbeitsphase auch in einer noch kommenden und damit vierten Stunde durchgeführt werden.

5.1.6 Folgender Unterricht & Kritischer Rückblick

In diesem Unterkapitel soll es darum gehen, wie der folgende Unterricht nach der beschriebenen Unterrichtseinheit fortgeführt werden könnte. Dazu bietet es sich an, den Unterrichtsentwurf nochmal kritisch zu betrachten und für größere didaktische Entscheidungen Alternativen aufzuzeigen. Einige dieser Alternativen oder kritischen Punkte wurden bereits zwischendurch im bisherigen Text zum ersten Unterrichtsentwurf genannt. Weitere folgen nun hier.

Wie bereits erwähnt, kann es sein, dass die gemeinsame Besprechung des zweiten Arbeitsblattes im Plenum zeitlich nicht mehr in die dritte Stunde dieser Unterrichtseinheit passt. In diesem Fall empfiehlt es sich in der nächsten und damit vierten Stunde die Sicherung der Arbeitsergebnisse zu beenden. Nun gibt es aber nach der Durchführung dieser Unterrichtseinheit unterschiedliche Optionen, wie weitergemacht werden kann.

Zunächst einmal wurde bereits das nur kurze Befassen mit der Gewichtskraft $\vec{F}_G$ und der Erdbeschleunigung $\vec{g}$ erwähnt. Hier könnte es sich also anbieten, auf diese spezielle Kraft genauer einzugehen. Es könnte allerdings sein, dass bereits vor dieser Unterrichtseinheit die Gewichtskraft als allen Lernenden bekanntes Beispiel für eine Kraft behandelt wurde und damit den Lernenden ausreichend bekannt sein sollte.

Dann könnte das erste Newton'sche Axiom als Spezialfall des zweiten Newton'schen Axioms für einige Lernende zu kurz betrachtet worden sein. Auch hier bietet sich – wie es in der Unterrichtseinheit bereits für das zweite Newton'sche Axiom passiert ist – an, einen weiteren Anwendungsfall des ersten Newton'schen Axioms zu bearbeiten. Auch grundsätzlich bieten sich weitere Übungsstunden an, nachdem die beiden ersten Newton'sche Axiome in nur drei Stunden eingeführt bzw. kennengelernt wurden.

Was aber in allen Fällen früher oder später an diese Unterrichtseinheit anschließen muss, ist das dritte Newton'sche Axiom. Wie bereits zuvor erwähnt, ist es nicht ganz richtig, dass die herabsinkenden kalten Luftmassen nur als Kraft-auswirkender Körper zu betrachten sind und das Flugzeug als

Objekt, das einzig und allein beschleunigt wird. Dieses Beispiel könnte also erneut aufgegriffen werden, um zu erarbeiten, dass auch das Flugzeug eine – gleich große – Kraft auf die Luftmassen auswirkt. Die Verzögerung der Luftmassen aufgrund des Flugzeugs hat einfach vorher nicht interessiert. Sollte dieses Beispiel aus dem Kontext der Flugsicherheit der Lehrkraft zu speziell und den Lernenden zu „unsichtbar“ erscheinen, kann als erstes Beispiel für das dritte Newton’sche Axiom auch ein anderes Pärchen von Körpern und Kräften betrachtet werden. Eine mögliche Alternative wäre, warum das Flugzeug überhaupt auf der Startbahn beschleunigt und dass der Boden bzw. die Erde auch „nach hinten“ und damit vom Flugzeug weggedrückt wird. Nur hat bisher die Beschleunigung der Erde unter einem startenden Flugzeug nicht interessiert, da ihre Masse der Erde um ein Vielfaches höher ist. Für diesen Zusammenhang würde sich allerdings wieder das Startabbruch-Video anbieten.

5.2 Notrutsche

5.2.1 Bisheriger Unterricht

Die nun folgende Unterrichtseinheit zur Reibung auf der Notrutsche eines Flugzeugs benötigt auch ein gewisses physikalisches Vorwissen der Lernenden. Wie im vorherigen Unterrichtsentwurf auch, sollte bereits bekannt sein, was Kräfte sind, in welchen Einheiten man sie angibt, und dass man sie mittels Pfeilen als Vektoren (bzw. Größen mit Richtungen) darstellen kann. Darüber hinaus sollten Reibungskräfte bereits bekannt sein. Das bedeutet, dass dazu Zeichnungen mit schiefen Ebenen angefertigt wurden, in denen dann alle relevanten Kräfte eingezeichnet wurden. Das umfasst die Hangabtriebskraft $\vec{F}_{HA}$ und die Normalkraft $\vec{F}_N$ als Zerlegungsbestandteile der Gewichtskraft $\vec{F}_G$ eines Objektes auf der schiefen Ebene. Außerdem wurden die Bedingungen für das Hinunterrutschen oder das Stehenbleiben des Objektes auf der schiefen Ebene besprochen, wozu unter anderem die Unterscheidung zwischen der Haftreibungskraft $\vec{F}_{HR}$ und der Gleitreibungskraft $\vec{F}_{GR}$, sowie der jeweilige Vergleich mit der Hangabtriebskraft

$\vec{F}_{HA}$ gehören. Das Berechnen dieser Reibungskräfte wurde auch geübt, sodass den Lernenden klar ist, dass es einheitenlose Haftreibungs- μ_{HR} und Gleitreibungskoeffizienten μ_{GR} gibt, welche mit der Normalkraft $\vec{F}_N$ multipliziert dann die jeweiligen Reibungskräfte $\vec{F}_{HR}$ und $\vec{F}_{GR}$ ergeben. Die Abhängigkeit der Koeffizienten von den beiden aneinanderreibenden Materialien ist auch bekannt.

Die physikalischen Sachverhalte der Kräfte und speziell auch der Reibungskräfte werden meistens vor den Sachverhalten der Arbeit bzw. dann der Energie behandelt (Wilhelm, Schecker & Hopf, 2021, S. 160). Das dies nicht unbedingt so sein muss (S. 176) und auch nicht zu besseren Lern- bzw. Testergebnissen führt (S. 182), haben Wilhelm, Schecker und Hopf (2021) dargestellt. Daher wird in dieser Unterrichtseinheit außerdem bereits verlangt, dass sich die Lernenden vorher schon mit der Arbeit bzw. der Energie beschäftigt haben. Das bedeutet konkret, dass der Begriff der Arbeit als Prozessgröße bzw. Energiedifferenz bei einer Energieübertragung zu verstehen ist (Wilhelm, Schecker & Hopf, 2021, S. 179) und darüber hinaus die allgemeine Formel $W = \vec{F} \cdot \vec{s}$ bekannt ist. Natürlich sind damit auch die Einheiten klar und der Fakt, dass die Kraft $\vec{F}$ entlang des Weges $\vec{s}$ betrachtet wird. Da der Kraftbegriff aber oft als schwieriger zu erlernen wahrgenommen wird als der Energie- bzw. Arbeitsbegriff, und die ebenso schwierige Abgrenzung des Kraftbegriffs zu Arbeit und Energie damit einhergehend oft zu fehlerhaften Schülervorstellungen führt (Wilhelm, Schecker & Hopf, 2021, S. 160), bietet sich die folgende Unterrichtseinheit als Verbund beider Sachverhalte an. Um auf Schülervorstellungen einzugehen und diese aufzulösen bzw. aufzuweichen, bietet sich beispielsweise das Aufkommen bzw. Hervorlocken dieser Schülervorstellung während des Unterrichts an (Schecker, Wilhelm, Hopf & Duit, 2018, S. 57). Das wird in der kommenden Unterrichtseinheit gegen Ende der ersten bzw. zu Beginn der zweiten Stunde passieren – und damit in etwa mittig, bezogen auf die ganze Unterrichtseinheit. Dies ist vorteilhaft, da so in beiden Stunden nochmals an den Schülervorstellungen gearbeitet werden kann. Beim Erinnern an alte Unterrichtsinhalte und dem Zusammenfügen dieser, bevor es zum

eigentlichen Experiment kommt, werden sich Schülervorstellungen offenbaren, die es dann einzuordnen gilt. Auch während des folgenden Experiments kann dies noch getan werden.

Die kommende Unterrichtseinheit baut damit sowohl auf dem Vorwissen zu Kräften und auf dem Vorwissen zur Arbeit auf. Sie verbindet diese beiden physikalischen Sachverhalte im Sinne der inhaltlichen und didaktischen Kontextualisierung (siehe Kapitel 3) miteinander.

Zum Ende der Unterrichtseinheit wird es auch wichtig sein, einen mikroskopischen Blick auf Temperaturerhöhung bei Reibungsprozessen zu werfen. Das passt zusammen mit der Tatsache, dass im vorherigen Unterricht bereits Arbeit und insbesondere Energie behandelt wurde. Dabei sollte die Teilchenbewegung mit der inneren Energie eines Körpers in Zusammenhang gebracht worden sein. Allerdings reicht es auch aus, sich nur oberflächlich mit Teilchenbewegungen in Zusammenhang mit höheren Temperaturen beschäftigt zu haben. Derartig passiert dies oft in der Unter- bzw. Mittelstufe im Physikunterricht.

Sicherlich ist es auch hilfreich, in Physik oder anderen Fächern bereits kritisch auf Medien geblickt zu haben und damit bereits ein Auge für zu hinterfragende Medienbeiträge zu haben. Nichtsdestotrotz wird in der kommenden Unterrichtseinheit ein doch eher reißerischer Artikel – mit klaren Worten *gegen* das Tragen von kurzer Kleidung im Flugzeug, um Reibungsverbrennungen auf einer eventuell zu benutzenden Notrutsche zu verhindern – nach dem kritischen Reflektieren desgleichen *nicht* in seinen inhaltlichen Aussagen widerlegt werden. Denn die Aussagen des Artikels stimmen, sind vielleicht aber leicht dramatisierend dargestellt. Dieses doch eher überraschende Resultat bezüglich des kritischen Hinterfragens als Kompetenz in der Schule könnte die Lernenden überraschen, weshalb ein bisschen Erfahrung in eben diesem kritischen Blick für die folgende Unterrichtsidee sicherlich hilfreich ist.

5.2.2 Tabellarischer Unterrichtsentwurf

Erneut wird ein möglicher Unterrichtsentwurf dargestellt, um zu verdeutlichen, wie der Kontext der Flug-Sicherheit in den Physikunterricht eingearbeitet werden kann. Dieser Unterrichtsentwurf ist dabei nur als Beispiel zu betrachten. In weiteren Unterkapiteln wird hauptsächlich die Gestaltung der Experimente und dessen unterrichtliche Verwirklichung diskutiert, da diese von der Lehrkraft einfach übernommen werden können – selbst, wenn die Lehrkraft einen anderen Unterricht drum herum geplant hat.

Der folgende Unterrichtsentwurf läuft über zwei Schulstunden, da er ein Experiment mit jeweils verschiedenen Experimentierdurchgängen beinhaltet und die Reibungsarbeit sowie die Reibungskräfte in den Kontext der Flug-Sicherheit setzen soll.

Die in der Tabelle 2 beschriebenen Handlungen und Äußerungen der Lehrkraft und der Lernenden sind oft sehr genau formuliert. Für den Fall, dass die Antworten der Lernenden deutlicher davon abweichen als erwartet, sollte die Lehrkraft den Unterricht spontan lenken und eben dafür passende Arbeitsaufträge geben bzw. Fragen formulieren.

Tabelle 2: Unterrichtsentwurf „Notrutsche“

Phase (Zeit)	Unterrichtsinhalt & Handlungen	Sozialform/ Methode	Materialien/ Medien
1. Stunde			
Einstieg/ kritisches Hinterfragen/ Kontextsetzung (5 min)	Lehrkraft zeigt Überschrift und Design des Artikels¹ zum Tragen langer Kleidung im Flugzeug und fragt nach spontaner Einstellung der Lernenden zur Seriosität des Artikels Lernende geben ihre Meinung und Empfindung zur Seriosität des Artikels ab und begründen diese kurz	im Plenum / Unterrichtsgespräch bzw. Fragen-entwickelnder Unterricht	- / Beamer, Tablet von Lehrkraft
Einarbeitung / Problem verstehen (10 min)	Lehrkraft weist kurz in folgenden Arbeitsauftrag (Aufgabe 1 & 2) ein und stellt Arbeitsblatt zur Verfügung Lernende formulieren und begründen schriftlich ihre Einstellung bzgl. des Artikels nach Lesen des ganzen Artikels Lernende entwickeln Fragestellungen und Experiment-Ideen bzgl. der gemachten Aussagen im Artikel zur Reibung, welche sich anschließend im Unterricht überprüfen lassen	Partnerarbeit / kritisches Hinterfragen von Medien, Entwickeln von Fragen und Experimenten zur Überprüfung	Arbeitsblatt ² / -

Zwischen- besprechung/ Kontextsetzung (10 min)	Lehrkraft fragt erneut nach Einstellungen zum Artikel nach Lesen des Artikels und nach ersten Fragestellungen bzw. Ideen für Experimente, um diese zu überprüfen Lernende melden sich und äußern sich entsprechend Lehrkraft koordiniert das Sammeln der Vorschläge der Lernenden und schreibt nur einige wenige Fragestellungen und Experiment-Ideen zusammengefasst und kategorisiert an die digitale Tafel (Lenkungsfunktion der Lehrkraft hin zum Thema „Reibung(skräfte/-sarbeit)“ und „Temperaturentwicklung/-erhöhung“ – nur falls nötig) Lehrkraft zeigt beispielhaftes Video³ einer Flugzeug-Evakuierung über die Notrutschen, um erneut Kontext zu setzen und für folgende Aufgabenstellung womöglich Erinnerungen an schiefe Ebenen und Reibung(skräfte) zu wecken	im Plenum / Sammeln von Arbeitsergebnissen	- / Beamer, Lautsprecher, Tablet von Lehrkraft
Recherche von alten Informationen (10 min)	Lehrkraft weist kurz in folgenden Arbeitsauftrag (Aufgabe 3) ein Lernende sammeln aus ihren Erinnerungen und ihren (alten) (Regel-)Heften Informationen zur Reibung, (Gleit-)Reibungskraft, Formeln wie $\vec{F}_{GR} = \mu_{GR} \cdot \vec{F}_N$, Koeffizienten wie den (Gleit-) Reibungskoeffizienten μ_{GR}, Zeichnungen von schiefen Ebenen inkl. der Normalkraft $\vec{F}_N$, etc.	Partnerarbeit / Sammeln und Recherchieren von (alten, bereits gelernten) Informationen	Arbeitsblatt / -
Sicherung/ Erinnerung schaffen (10 min)	Lernende melden sich und tragen jeweils einzelne Erinnerungen/Informationen zum bisher Gelernten bei Lehrkraft notiert diese in geeigneter Form in einem übersichtlichen Tafelbild⁴ Lernende übernehmen die ihnen jeweils fehlenden Informationen in ihr Heft, sodass sie damit in der kommenden Stunde weiterarbeiten können	im Plenum / Sammeln von Arbeitsergebnissen	- / Beamer, Tablet von Lehrkraft

2. Stunde

Einstieg/ Wiederholung (5 min)	Lehrkraft zeigt Tafelbild der letzten Stunde zur Wiederholung des Themas der (Gleit-)Reibungskraft und fragt, wie die Reibungsarbeit nun berechnet werden kann Lernende melden sich vielleicht mit allgemeineren und bekannteren Äußerungen wie $W = \vec{F} \cdot \vec{s}$ Lehrkraft lenkt und fragt, was im Zusammenhang des Hinunterrutschens auf der Notrutsche nun die Strecke $\vec{s}$ und die Kraft $\vec{F}$ ist Lernende benennen die schiefe Rutschenlänge als Strecke $\vec{s}$ und die (Gleit-)Reibungskraft als die entlang der Strecke $\vec{s}$ (entgegen-) wirkende Kraft $\vec{F}$ Lehrkraft bzw. Lernende notieren diese Erkenntnisse zusammen auf der (digitalen) Tafel bzw. in ihren Heften⁴	im Plenum / Unterrichtsgespräch bzw. Fragen-entwickelnder Unterricht	- / Beamer, Tablet von Lehrkraft
Recherche von neuen Informationen/ Erarbeitung (10 min)	Lehrkraft weist kurz in folgenden Arbeitsauftrag (Aufgabe 4 & 5) ein Lernende recherchieren Materialien von Haut, Kleidung sowie Notrutsche und die (Gleit-) Reibungskoeffizienten zwischen sinnvollen Paarungen dieser Materialien Lehrkraft geht durch die Reihen und fordert/fördert ggfs. (sinnvolleres) Formulieren von Fragen für die KI Lernende berechnen die (Gleit-) Reibungskräfte und die daraus folgenden Reibungsarbeiten	Partnerarbeit / Sammeln und Recherchieren von (neuen, fremden) Informationen, Berechnen von physikalischen Größen	Arbeitsblatt / Tablets der Lernenden (inkl. KI-Funktion)

Ergebnis- besprechung/ Sicherung (10 min)	Lernende stellen ihre Recherche- und Rechenergebnisse selbst an der digitalen Tafel vorne vor Lehrkraft und andere Lernende ergänzen oder korrigieren ggfs.	im Plenum / gemeinsame Besprechung der Arbeitsergebnisse	- / Beamer, Tablet von Lehrkraft
Kontextsetzung, Experiment (10 min)	Lehrkraft zeigt zusammengefasste Fragestellungen und Experiment-Ideen der Lernenden aus der letzten Stunde und stellt dazu die mitgebrachten Utensilien vor (wahrscheinlich passend zu den Vorstellungen der Lernenden) Lernende helfen bei von Lehrkraft angeleitetem Demonstrations-Experiment (Wärmebild-Kamera bzw. Tablet halten, schiefe Ebene und Gewicht mit verschiedenen Bezügen beziehen, Experiment durchführen, Beobachtungen der Temperaturerhöhung notieren, ...)	im Plenum / gemeinsames und angeleitetes Experimentieren	schiefe Ebene, Nylon-Oberfläche, Gewicht, Baumwollen-Bezug, Haut-ähnlichen Gummi-Bezug / Beamer, Tablet von Lehrkraft, Wärmebild-Kamera
Interpretation des Experiments/ Kontextsetzung (10 min)	Lernende und Lehrkraft vergleichen zusammen die beiden Temperaturentwicklungen zwischen dem Haut-Notrutsche- und dem Baumwolle-Notrutsche-Durchgang des Experiments Lehrkraft fragt nach Grund für stärkere Temperaturentwicklung bei Haut-Notrutsche-Durchgang Lernende erkennen und benennen Zusammenhang zwischen mehr verrichteter Reibungsarbeit und stärkerer Temperaturentwicklung (makroskopisch) Lehrkraft zeigt erneut Video zur Flugzeug-Evakuierung über die Notrutschen und fragt, warum Passagiere ihre Hände beim Rutschen hochnehmen Lernende beantworten diese Frage sicherlich mit Leichtigkeit	im Plenum / gemeinsame Diskussion über Experimentausgang, Anwenden der gewonnenen Erkenntnisse auf Kontext bzw. Beispiel	- / Beamer, Lautsprecher, Tablet von Lehrkraft

	<i>Lehrkraft gibt Hausaufgabe (Arbeitsblatt, Aufgabe 6) zur wiederholenden – aber auch vertieften – Erklärung des erkannten Zusammenhangs (mikroskopisch) und zur erneuten Beurteilung der Seriosität des Artikels</i>		
--	--	--	--

¹ Der Beginn dieses Artikels, inkl. Betrachtung von Überschrift und Design, folgt im Unterkapitel 5.2.3.

² Das Arbeitsblatt bzw. die Erläuterungen dazu folgen im Anhang bzw. im folgenden Unterkapitel 5.2.3.

³ (davidicusb, o. J.) – Minute 2:14-3:19 ausreichend

⁴ Das Tafelbild zur Zusammenfassung des bisherigen Kenntnisstandes zum Thema Reibungskräfte, inkl. der Ergänzung zur Reibungsarbeit nach Besprechung im Plenum, folgt im Unterkapitel 5.2.3.

5.2.3 Arbeitsblätter, Tafelbilder & Videos

Einführender Artikel

Zu Beginn der ersten Unterrichtsstunde soll erstmal nur die Überschrift bzw. das Design des vorliegenden Artikels betrachtet werden (Sobolewski, 2024). Wie in Abbildung 39 zu sehen, handelt es sich um eine große Schriftgröße und eine erstmal sehr abwegige inhaltliche Aussage. Noch reißerischere Überschriften sind aus Zeitungen, Kurznachrichtendiensten oder Kurzvideos bekannt. Hier soll also die kritische Reflexion von Medien im Sinne der Medienkompetenz angesprochen werden (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 10). Auch wenn sich am Ende herausstellen sollte, dass die Überschrift zwar etwas reißerisch, aber dennoch physikalisch korrekt bzw. sinnvoll ist, ist es wichtig, den Schritt des kritischen Hinterfragens gegangen zu sein. Somit wird sofort mit Beginn der ersten Stunde der kompetenzorientierte Fahrplan dieser Unterrichtseinheit gesteckt. Es geht also um das Hinterfragen von gefundenen Aussagen und das Entwickeln von geeigneten Fragestellungen bzw. Experimenten zur Überprüfung dieser.



Abbildung 39: Überschrift und Design des Artikels zum Tragen langer Kleidung im Flugzeug

Arbeitsblatt

Zur allgemeinen optischen Gestaltung und Funktion von Arbeitsblättern bzw. Aufgabenblättern wurde in Unterkapitel 5.1.3 bereits viel geschrieben. Daher soll dieser Teil hier nur kurzgefasst werden. Zunächst sei gesagt, dass es sich wieder um ein *Aufgabenblatt* – und kein *Arbeitsblatt* – handelt, da die Gedankengänge und Lösungen der Lernenden nicht direkt auf das Blatt geschrieben werden (Pietsch, 2021, S. 33). Auch hier wird der Einfachheit halber trotzdem von einem *Arbeitsblatt* gesprochen.



Abbildung 40: Artikel von Online-Zeitschrift auf Arbeitsblatt zur Notrutsche

Das in dieser Unterrichtseinheit verwendete Arbeitsblatt hat einen informierenden Charakter, da es einen Artikel aus einer Online-Zeitschrift beinhaltet (siehe Abbildung 40), und einen kontrollierenden Charakter, da es unter anderem Aufgaben zur Wiederholung alter Unterrichtsinhalte beinhaltet (siehe Abbildung 43). Allerdings lässt sich auch ein vertiefender Charakter feststellen, da auch Aufgaben zum Berechnen und Verständnis neuer physikalischer Größen vorhanden sind (siehe Abbildung 46). Diese Charakterzüge von Arbeitsblättern formulieren unter anderem Kirchner, Girwidz und Häußler (2015, S. 217).

Auf eine ausreichende Schriftgröße, genug Abstand zum Rand sowie zu anderen Elementen des Arbeitsblattes (Artikel, Aufgaben, Überschrift, ...) wurde geachtet.

Ein sinnvoller Einsatz eines Arbeitsblattes kann auch mit einer gleichzeitigen Verwendung eines anderen frontalen Mediums einhergehen (Hopf, Schecker, Höttecke & Wiesner, 2022, S. 120). Das bedeutet in diesem Fall, dass das Arbeitsblatt als Arbeitsgrundlage und Anleitung für die Lernenden dient, damit diese einen Fahrplan durch die Unterrichtseinheit haben. Gleichzeitig werden aber an der digitalen Tafel über das Tablet der Lehrkraft die Unterrichts- und Arbeitsergebnisse festgehalten, sowie Videos und von den Lernenden entwickelte Experiment-Ideen sichtbar. Dies ermöglicht also insgesamt ein sinnvolles Zusammenspiel mehrerer Arbeitsoberflächen.

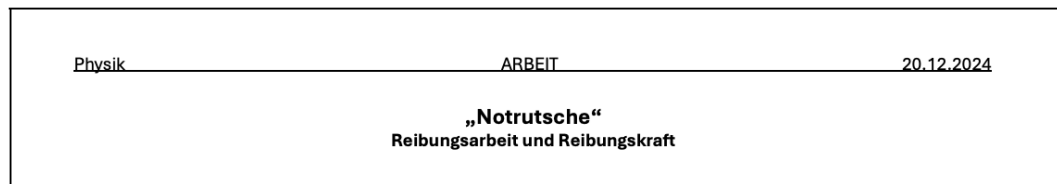


Abbildung 41: Kopfzeile und Überschrift des Arbeitsblatts zur Notrutsche

Erneut hat das Arbeitsblatt eine Kopfzeile, welche in die Reihe der vorherigen Arbeitsblätter passt und den Lernenden damit eine nachvollziehbare Chronologie ermöglicht (siehe Abbildung 41). Außerdem verrät die Überschrift „Notrutsche – Reibungsarbeit und Reibungskraft“ den Lernenden bereits vor Bearbeitung des Arbeitsblattes, wo es thematisch hingehen wird. Dies könnte für das Erinnern an Inhalte zum Thema Reibung(skraft) sinnvoll sein und ordnet dem inhaltlichen Kontext der „Notrutsche“ den physikalischen Sachverhalt „Reibungsarbeit und Reibungskraft“ zu.

Nun soll genauer auf die Aufgaben des Arbeitsblattes eingegangen werden. Zunächst sei gesagt, dass mit den Aufgaben 1 und 2 (siehe Abbildung 42) das kritische Hinterfragen der Lernenden von in den Medien präsentierten Artikeln gefördert werden soll (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 10). Dabei wird es in diesem Fall vermutlich so sein, dass das erst kritische Betrachten des reißerisch daherkommenden Artikels am Ende zwar immer noch für leicht übertrieben in der Ansprache der Lesenden gehalten wird, aber trotzdem

- 1) *Liest* zunächst den Artikel der Online-Zeitschrift „Der Westen“ über das Tragen von langer, hautbedeckender Kleidung im Flugzeug und *formuliert* eure begründete Einstellung bezüglich der Seriosität dieses Artikels.
- 2) *Entwickelt* physikalische Fragestellungen und passende Experiment-Ideen bezüglich der im Artikel getroffenen Äußerungen, warum keine T-Shirts in Flugzeugen getragen werden sollten. Diese können wir im Anschluss experimentell oder durch Recherchen beantworten.

Abbildung 42: Aufgaben 1 und 2 des Arbeitsblattes zum Notrutsche

- 3) *Sammelt*, welche Themen, physikalische Größen, Formeln, Koeffizienten, Zeichnungen etc. aus eurem bisherigen Physikunterricht (alle Klassenstufen) beim Beantworten der Frage nach der Reibung bzw. dem Temperaturanstieg auf der Notrutsche helfen könnten.
HILFE: ältere Aufschriften in euren Physikhelfen
- 4) *Recherchiert* die Materialien aller an dem Reibungsprozess beteiligten Stoffe und alle dazu gehörigen (Gleit-)Reibungskoeffizienten der sinnvollen Paarungen zweier dieser Stoffe (inkl. Haut).
HILFE: Internet bzw. KI, wenn clever formulierte Frage

Abbildung 43: Aufgaben 3 und 4 des Arbeitsblattes zum Notrutsche

physikalisch durch Experimente und Berechnungen belegbar ist. Auch die Entwicklung einer Entscheidungsfähigkeit der Lernenden auf Grundlage von Fakten soll mit dem Operator „Entwickelt“ trainiert werden (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 12). Dies fällt unter den Kompetenzbereich „Planen, Untersuchen, Auswerten, Interpretieren“ (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 19).

Auch gibt es Differenzierungs- bzw. Individualisierungsmöglichkeiten auf dem Arbeitsblatt. So sorgen die zwei „Hilfe“-Angebote nach Aufgabe 3 und 4 für eine freiwillige Nutzung ihrer selbst, falls die Lernenden bei diesen beiden Aufgaben allein nicht

zurechtkommen (siehe Abbildung 43). Natürlich gibt es während der Bearbeitung der anderen Aufgaben des Arbeitsblattes immer die Möglichkeit, die Lehrkraft bei Bedarf um Unterstützung zu bitten. Nach dem Sammeln von bereits Gelerntem zum Thema Reibung(skräfte) in Aufgabe 3 soll es in Aufgabe 4 um das Recherchieren neuer Informationen gehen. Auch dies ist eine zu fördernde Kompetenz – oft betitelt mit „Arbeiten mit Quellen“ oder „Recherchieren [...] in unterschiedlichen Quellen“ (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 20). Dabei ist es allerdings auch wichtig, die neuen technischen Möglichkeiten nicht außer Acht zu lassen. Die Entwicklung der KI macht es möglich, das Internet und alle dort vorhandenen Informationen nach (Gleit-)Reibungskoeffizienten zwischen verschiedensten Materialien zu durchsuchen.

Dem Lernen und Lehren mit KI werden allgemein ein großes Potenzial zugesprochen (de Witt, Gloerfeld & Wrede, 2023, S. 92). Dabei sei es wichtig, dass die KI keine Akteure (wie die Lehrkraft) ersetzt und auch nicht ersetzen kann, sondern an sinnvollen Stellen im Unterricht unterstützt (de Witt, Gloerfeld & Wrede, 2023, S. 92). Auch eine KI lässt sich als digitales Medium verstehen und kann bzw. sollte daher auch in der Schule benutzt und damit auch kritisch hinterfragt werden (de Witt, Gloerfeld & Wrede, 2023, S. 204). Das passiert in dieser Unterrichtseinheit auf verschiedene Weisen. Erstens sieht die Lehrkraft selbst über die Eingaben der Lernenden in die KI und kann somit steuern, dass sinnvolle Ergebnisse „aus der KI herauskommen“. Zweitens lernen die Lernenden selbst, wie konkret sie Fragen an die KI formulieren müssen, indem die KI keine ausreichenden und damit nicht zufrieden stellende Antworten zurückgibt, falls die Fragestellungen der Lernenden zu ungenau sind. Drittens geben KI-Modelle wie *ChatGPT-4o* mittlerweile auch die Quellen für ihre Rechercheergebnisse aus, sodass die Seriosität der ausgegebenen Informationen überprüft werden kann. Viertens werden die Ausgaben der KI in der Unterrichtseinheit zusammen im Plenum besprochen und damit verglichen. Auch so kann erkannt werden, dass womöglich nicht jede KI bzw. jede Fragestellung die gleiche Informationsausgabe zur Folge hat. Das ist im Sinne der miteinzubeziehenden Unsicherheiten (z.B. Welches Material hat die Notrutsche jetzt genau? Ist die Annahme „Nylon“ als Material anzunehmen ausreichen?) sinnvoll und wichtig. Denn so kann z.B. ein Mittelwert aus allen sinnvollen (Gleit-)Reibungskoeffizienten der einzelnen Arbeitspärchen im Unterricht gebildet werden. Fünftens wird das Scheitern bei der KI-Suche nach entsprechenden Koeffizienten automatisch eine *übliche* Internetrecherche nach sich ziehen.

Nachdem beispielsweise die Materialien der Kleidung als „Baumwolle“ oder „Wolle“ und die Materialien der Notrutsche als „Nylongewebe“ oder „Nylon“ identifiziert werden, kann nach den (Gleit-)Reibungskoeffizienten mittels KI gesucht werden. Eine beispielhafte unkonkretere Fragestellung bzw. eine beispielhafte konkretere Fragestellung und die jeweiligen Antworten der KI können in Abbildung 44 bzw. Abbildung 45 betrachtet werden. Aus beiden

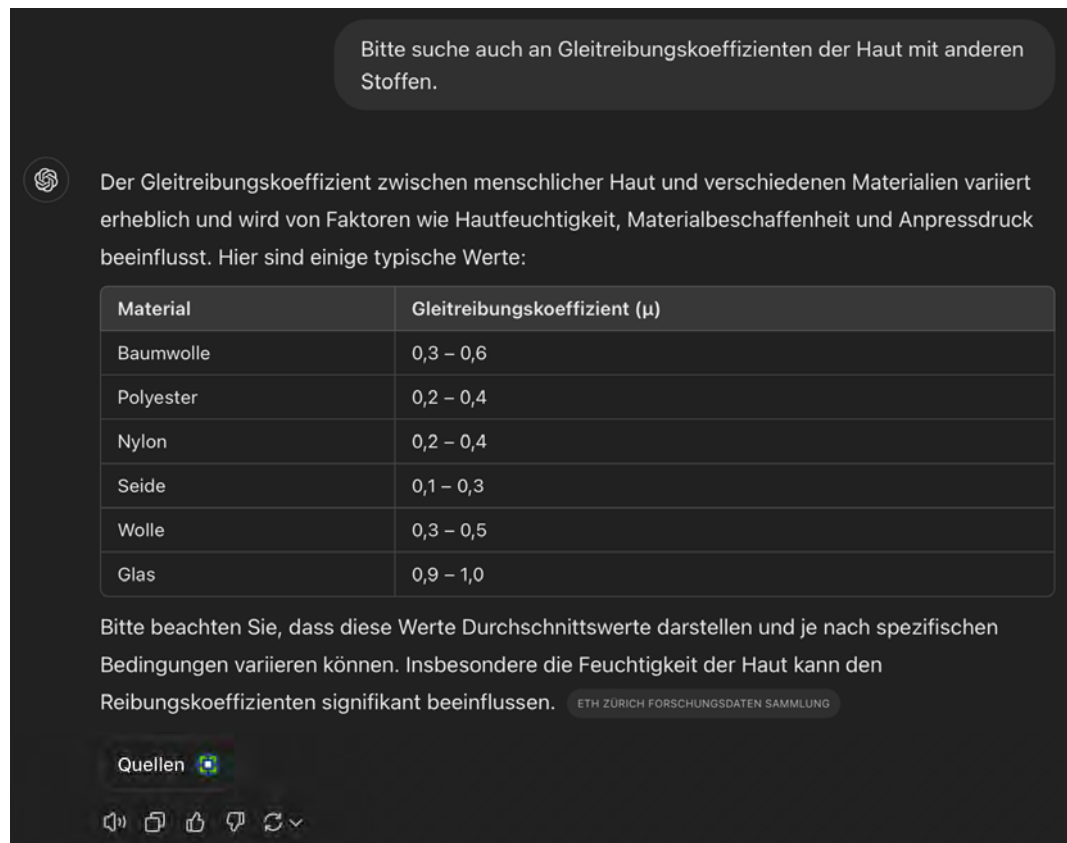


Abbildung 44: Nachfrage an KI (ChatGPT-4o) bzgl. Gleitreibungskoeffizienten zwischen Haut und verschiedenen anderen Materialien

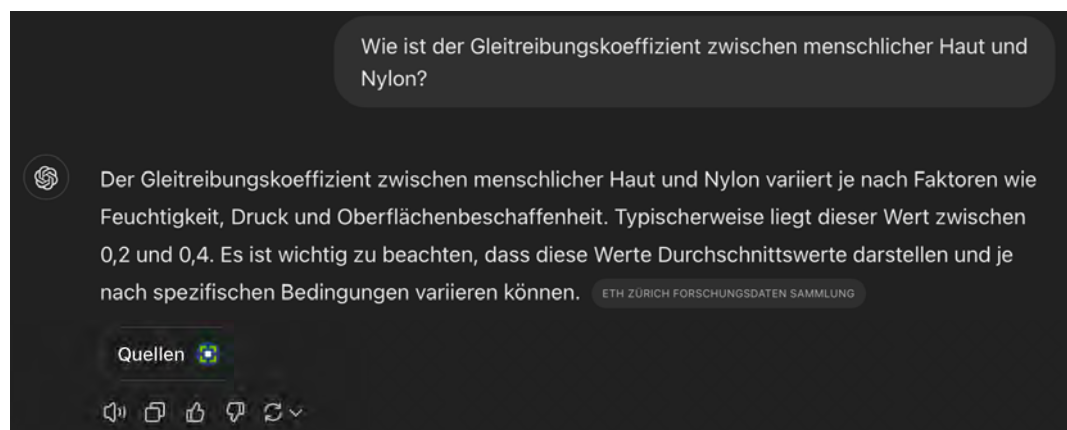


Abbildung 45: Nachfrage an KI (ChatGPT-4o) bzgl. Gleitreibungskoeffizienten zwischen Haut und Nylon

Antworten der KI können (Gleit-)Reibungskoeffizienten zwischen $\mu_{GR} > 0,2$ und $\mu_{GR} < 0,4$ abgelesen werden. So könnte man sich im Plenum beispielsweise auf $\mu_{GR} \approx 0,3$ als Rechengrundlage einigen. Analog lassen sich

Fragestellungen an die KI formulieren, die nach entsprechenden Koeffizienten zwischen Wolle und Nylon fragen. Auch für andere Materialien, die für Kleidung verwendet werden, lassen sich (Gleit-)Reibungskoeffizienten zum Materialpartner Nylon finden. So würde ein Nylonstrumpfhose auf einer Notrutsche aus Nylongewebe einen (Gleit-)Reibungskoeffizient von ca. $\mu_{GR} \approx 0,2$ hervorbringen (Beckhoff Information System, o. J.).

- 5) *Berechnet*, wie stark die (Gleit-)Reibungskraft ist, welche der Bewegung des hinunterrutschenden Menschen – jeweils ohne bzw. mit langer Kleidung – entgegenwirkt. *Berechnet* dann die jeweils verrichtete Reibungsarbeit auf einer 10 m langen Notrutsche.
- 6) *Begründe* zu Hause, warum der Temperaturanstieg beim Rutschen ohne lange Kleidung größer ist als mit langer Kleidung. *Beurteile* die Seriosität des Artikels erneut.

Abbildung 46: Aufgaben 5 und 6 des Arbeitsblattes zum Notrutsche

Zuletzt soll ein Blick auf die Aufgaben 5 und 6 geworfen werden (siehe Abbildung 46). Während Aufgabe 5 eine reine Berechnungsaufgabe ist und somit die bisherigen Erkenntnisse der vorherigen Aufgaben verarbeitet, ist Aufgabe 6 eine die Unterrichtseinheit

abrundende und Verständnis überprüfende Aufgabe. Diese Aufgabe verschiebt sich allerdings in die Hausaufgabe der zweiten Unterrichtsstunde, da sie makroskopisch betrachtet bereits in der zweiten Unterrichtsstunde beantwortet wurde. Neben einer Wiederholung dessen zu Hause soll der Sachverhalt auch nochmals mikroskopisch betrachtet werden, was aufgrund der Vorkenntnisse aus vorherigen Klassenstufen zu Teilchenbewegungen bei Temperaturerhöhungen machbar sein sollte (siehe dazu Unterkapitel 5.2.1). Um darüber hinaus die Kompetenz des kritischen Hinterfragens von Medienbeiträgen abzurunden und den Lernenden zu ermöglichen, ein abschließendes Urteil über die Seriosität des Artikels zu fällen, wird erneut eine Beurteilung verlangt – diesmal aber auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse aus ihren Berechnungen und den durchgeführten Experimenten.

Video

Wie in der vorherigen Unterrichtseinheit zum Sachverhalt des Luftlochs wird der diese Arbeit lesenden Lehrkraft empfohlen, das Video zunächst einmal selbst anzuschauen (siehe Abbildung 47). Dadurch werden viele hier

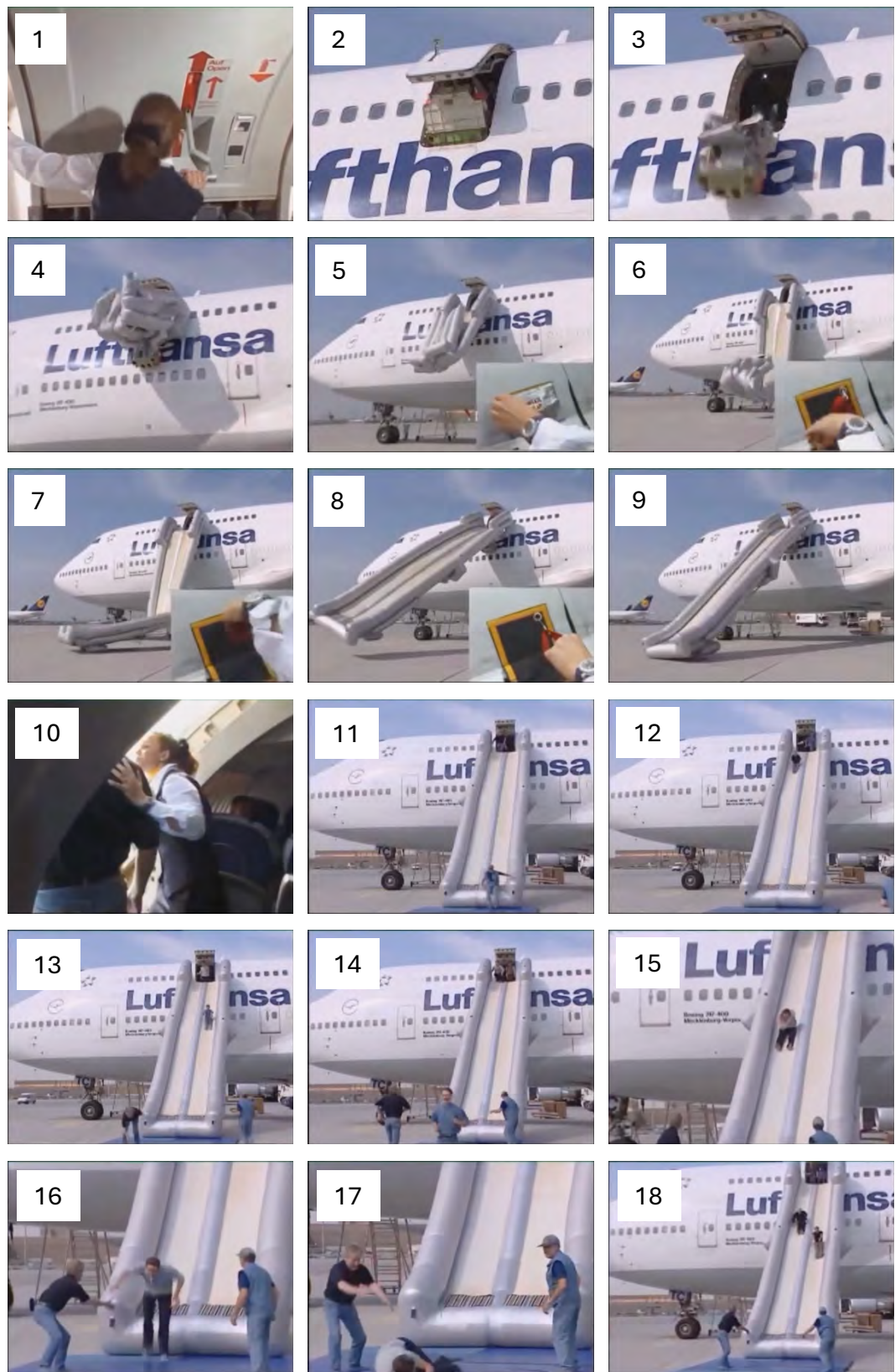


Abbildung 47: Screenshots aus dem Video der Unterrichtseinheit, Perspektive von außen auf das Hinabrutschen einzelner Passagiere auf einer Notrutsche

erläuterten inhaltlichen und didaktischen Erklärungen noch verständlicher und nachvollziehbarer. Das Video dient dem erneuten Setzen des Kontextes der Flugsicherheit und dem Leiten des Unterrichts in eine bestimmte Richtung. Die Lehrkraft will durch das Video unter anderem Erinnerungen an bisherige Kenntnisse zum Themenkomplex der Reibung(skräfte) wecken, aber auch aus den zuvor gesammelten Fragen bzw. Experimentierideen der Lernenden bestimmte auswählen. Somit untermauert die Lehrkraft den gewählten Fokus auf Reibung(skräfte), da im Video auch zu sehen ist, wie einzelne Passagiere ihre Hände während des Rutschens heben oder auf die Oberschenkel bzw. Brust legen. Auch fällt im Video auf, wie steil die Notrutsche tatsächlich ist und dass die Passagiere durch ihre Kleidung und den verhinderten Hautkontakt mit der Notrutsche ziemlich schnell rutschen. Gefahren wie das Verbrennen der Haut oder das Stolpern am Rutschenende können so zum Abschluss der Unterrichtseinheit oder in den Folgestunden nochmals diskutiert werden (siehe Kapitel 5.2.5). Welche allgemeinen Funktionen Videos im Unterricht erfüllen können und welche Überlegungen für diese Unterrichtseinheit erfolgt sind, findet sich in Teilkapitel 5.2.5 wieder.

Tafelbild

Das folgende Tafelbild entsteht in der Unterrichtseinheit in zwei Schritten (siehe Abbildung 48). Zunächst wird die linke Seite des Tafelbildes gemeinsam im Plenum erstellt, nachdem die Lernenden in Partnerarbeit ihre Erinnerungen

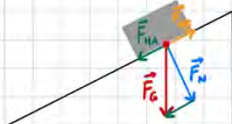
Zusammenfassung zur Reibungskraft	Ergänzung zur Reibungsarbeit
rutschendes Gewicht aus Material B $F_{GR} < F_{HA} \Rightarrow \text{Beschleunigen} \Rightarrow \text{Rutschen}$ $F_{GR} > F_{HA} \Rightarrow \text{Verzögern} \Rightarrow \text{Stillstehen}$  schiefe Ebene aus Material A Es gibt für jedes Material-Pärchen einen (Gleit-)Reibungskoeffizienten μ_{GR}. $\vec{F}_{GR} = \mu_{GR} \cdot \vec{F}_N$	$W = \vec{F} \cdot \vec{s}$ Die Arbeit, die verrichtet werden muss, um eine bestimmte Kraft (Gleitreibungskraft) entlang einer bestimmten Strecke (Notrutschenlänge) aufzuwenden, ist: $W_{\text{Reibung}} = \vec{F}_{GR} \cdot \vec{s}_{\text{Rutsche}}$

Abbildung 48: Tafelbild zur Zusammenfassung des bisherigen Kenntnisstandes zum Thema Reibungskräfte, inkl. Ergänzung zur Reibungsarbeit nach Besprechung im Plenum

und damaligen Aufschriften zum Thema Reibung(skräfte) zusammengetragen haben. Erst zu Beginn der zweiten Stunde und damit nach kurzer Wiederholung der linken Seite des Tafelbildes entsteht wieder gemeinsam im Plenum die rechte Seite des Tafelbildes. Da die Lernenden die physikalische Größe der *Arbeit* und die dazugehörige allgemeingültige Formel $W = \vec{F} \cdot \vec{s}$ bereits aus dem vorherigen Unterricht kennen (siehe Teilkapitel 5.2.1), wird die rechte Seite des Tafelbildes zügig und übereinstimmend ergänzt werden.

5.2.4 Experimente

Der Aufbau des Experiments zum Vergleich der freiwerdenden Wärme bei Reibung zwischen Notrutsche und Haut sowie zwischen Notrutsche und Kleidung lässt sich in Abbildung 49 betrachten.

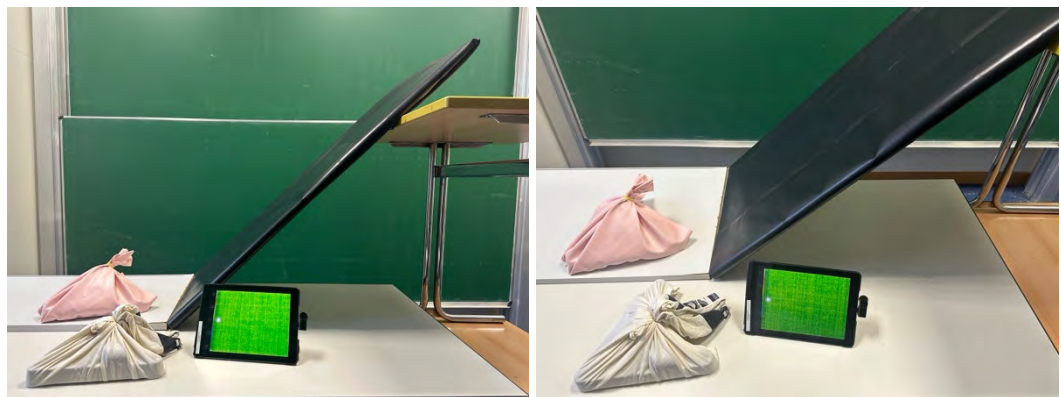


Abbildung 49: Aufbau des Experiments zur Analyse der Temperaturentwicklung zwischen verschiedenen Materialien (rosa: Hautimitat, weiß: Kleidung, schwarz: Notrutsche)

Um eine stabile schiefe Ebene im Sinne einer Notrutsche eines Flugzeuges darzustellen, wird das mit dem entsprechenden Stoff bespannte Brett (hier: schwarz) an ein auf dem Tisch liegendes und am Tischende befestigtes Brett angelehnt (hier: weiß). Die Befestigung des liegenden Brettes am Tischende ist zwar in Abbildung 49 nicht zu sehen, sorgt aber für Sicherheit beim Experimentieren, welche Verletzungen bei der Lehrkraft oder bei Lernenden verhindern soll. Auf der anderen Seite des mit schwarzem Stoff bespannten

Brettes stehen zwei Tische aufeinander, um eine ausreichende Steigung für das Hinabrutschen der Gewichte inkl. verschiedener Beschichtungen (rosa oder weiß) sicherzustellen. Tische sind schwer genug, um ebenfalls während des Experiments nicht wegzurutschen und nehmen auch nicht die Sicht auf die eventuell zeitweise dahinterstehende Lehrkraft weg.

Bei dem bereits mehrfach erwähnten schwarzen Stoff, welcher um das schiefe Brett gespannt ist, handelt es sich um TPU-beschichtetes Nylogewebe, welches für diesen Versuch eigens angeschafft wurde (siehe Abbildung 50). *TPU* steht für *thermoplastisches Polyurethan* und ist eine äußerst widerstandsfähige Oberfläche, welche sowohl hohe als auch niedrige Temperaturen aushalten kann (extremtextil, o. J.). Außerdem ist sie wasserdicht und ziemlich reißfest, was alles für den Gebrauch bei einer Flugzeug-Notrutsche spricht. Dieses TPU-beschichtete Nylogewebe wird in den meisten Flugzeugen für deren Notrutschen benutzt (Safran Electronics & Defense GmbH, o. J.). Dieser Stoff wird um das schiefe Brett gespannt und auf der Rückseite verklebt, um bei den Reibungsexperimenten nicht zu verrutschen (siehe Abbildung 50).



Abbildung 50: TPU-beschichtetes Nylogewebe als Notrutschenoberfläche (links) und dessen Befestigung auf der Rückseite des schiefen Brettes (rechts)

Als Hautimitat wurde ein rosa Kunstleder angeschafft, sodass es während des Experimentes farblich als Hautimitat zu erkennen ist (siehe Abbildung 51). Echtes Leder besteht aus Tierhaut, während Kunstleder versucht, sowohl die

Optik als auch die Haptik von Leder zu imitieren. Natürlich ist Leder kein perfekter Ersatzstoff für die menschliche Haut, kommt dieser bezüglich seiner Oberflächenrauigkeit bei geeigneter Wahl der Lederart aber ziemlich nah. Diese Materialauswahl der Lehrkraft bzw. das daraus folgende und notwendige Hinterfragen der Imitation von menschlicher Haut durch Leder im Unterricht wird im Teilkapitel 5.2.6 nochmals diskutiert. Das Kunstleder wird um ein Gewicht gewickelt und mit Gummibändern oben zugezogen, damit die untere Seite des Gewichts straff bedeckt ist. Als Gewichte bieten sich flache, aber schwere Gewichte an, da diese beim Hinabrutschen nicht umkippen, aber durch ihre hohen Massen dennoch zu hohen Normalkräften $\vec{F}_N$ führen, welche dann wiederum zu hohen (Gleit-)Reibungskräften $\vec{F}_{GR}$ führen. Somit gibt es eine positive Korrelation zwischen der Gewichtskraft $\vec{F}_G$ und der Temperaturentwicklung ΔT an der Reibungsoberfläche (siehe Unterkapitel 4.2). In dem auf den Bildern durchgeführten Experiment wurde ein Stativfuß als Gewicht verwendet (siehe Abbildung 51), da dieser zudem das Zubinden des Leders aufgrund seiner Form begünstigt. Als Kleidungsstück wurde ein altes weißes T-Shirt aus Baumwolle benutzt, welches damit auch im Kontrast zur rosa Haut und zur schwarzen Notrutsche steht (siehe Abbildung 51).



Abbildung 51: Stativfüße als Gewichte; bespannt mit rosa Kunstleder (links), bespannt mit weißer Baumwolle (mittig), unbespannt (rechts)

Bevor auf die Wärmebildkamera und ihre Funktion in diesem Experiment eingegangen wird, soll noch auf einige Missgeschicke und Problemlösungen aufmerksam gemacht werden. Wie in Abbildung 52 zu erkennen ist, rutscht das mit Baumwolle bespannte Gewicht die Notrutschen-Oberfläche hinunter,

während das mit Kunstleder bespannte Gewicht nicht zu rutschen beginnt. Dies liegt daran, dass die Reibung zwischen dem rosa Kunstleder und dem schwarzen mit TPU beschichteten Nylongewebe zu groß ist. Physikalisch bedeutet das, dass die Haftreibungskraft $\vec{F}_{HR}$ größer als die Hangabtriebskraft $\vec{F}_{HA}$ ist und das Gewicht somit nicht die Ebene hinab beschleunigt. Dieses Problem ließ sich aber aus einer Kombination von leichten Änderungen am Versuchsaufbau beheben. Zunächst einmal kann die Steigung der schiefen Ebene erhöht werden, indem weitere Tische, Bücher, Bretter oder ähnliches unter die höher gelegene Seite der schiefen Ebene gelegt werden. Dies vergrößert den parallel zur schiefen Ebene zeigenden Anteil von $\vec{F}_G$, also die Hangabtriebskraft $\vec{F}_{HA}$, während der zur schiefen Ebene senkrechte und damit zur Reibungskraft beitragende Teil, also die also die Normalkraft $\vec{F}_N$, verkleinert wird. Diese Änderung in der Steigung muss für den nachträglichen Vergleich zur Temperaturentwicklung auch beim Experimentierdurchgang für das mit Baumwolle bespannte Gewicht erfolgen. Des Weiteren kann – auch bei beiden Experimentierdurchläufen – etwas Kreidestaub oder etwas Feuchtigkeit in Form von Wasser auf die schiefe Ebene gestreut bzw. gesprüht werden. Dies verringert die Reibung bei beiden Experimentierdurchgängen. Allerdings ist es schwerer, hier möglichst gleiche Bedingungen herzustellen, wodurch sich diese Option weniger für den im Vorhinein geplanten Unterricht eignet. Daher empfiehlt sich eine dritte Lösungsmöglichkeit, welche allerdings im Vorhinein von der Lehrkraft ausprobiert werden muss. Ein anderes Material als



Abbildung 52: rutschendes und mit Baumwolle bespanntes Gewicht (links), stillstehendes und mit Kunstleder bespanntes Gewicht (rechts)

Hautimitat könnte hier Abhilfe schaffen, da Kunstleder eine stärkere „Gummi- Artigkeit“ aufweist, als es die echte menschliche Haut tut. Diese Materialien sind allerdings nicht so leicht zu finden. Für die hier vorgestellten und eigens dafür angeschafften Materialien reichte allerdings eine stärkere Steigung der schiefen Ebene und eine etwas durch absichtliche Reibung auf anderen rauen Oberflächen veränderte Kunstlederoberfläche. Diese fühlte sich dann auch etwas rauer und weniger „gummi-artig“ an, was der menschlichen Haut nochmals näherkam.

Zur Aufnahme des Experiments wurde eine kleine Wärmebildkamera benutzt, welche an ein Tablet (hier: iPad) angesteckt werden kann. Dazu wird eine zur Wärmebildkamera passende App (hier: Seek thermal) benötigt. Die Wärmebildkamera und die Startseite nach dem Öffnen der App werden in Abbildung 53 dargestellt. Neben dem Aufnahme- und Funktionsmodus der Wärmebildkamera zeigt die App eine Mediengalerie aller bisher aufgenommenen Fotos und Videos und bietet die Möglichkeit, Einstellungen zu ändern. Dazu zählt beispielsweise die Farbpalette, welche die Differenz zwischen kälteren und wärmeren Körpern im Sichtfeld der Kamera verdeutlicht. Es müssen keine Fotos oder Videos aufgenommen werden, da die App ca. jede Sekunde ihr Wärmebild der Umwelt aktualisiert und so dauerhaft ein verwertbares Wärmebild der Umwelt zu erkennen ist.

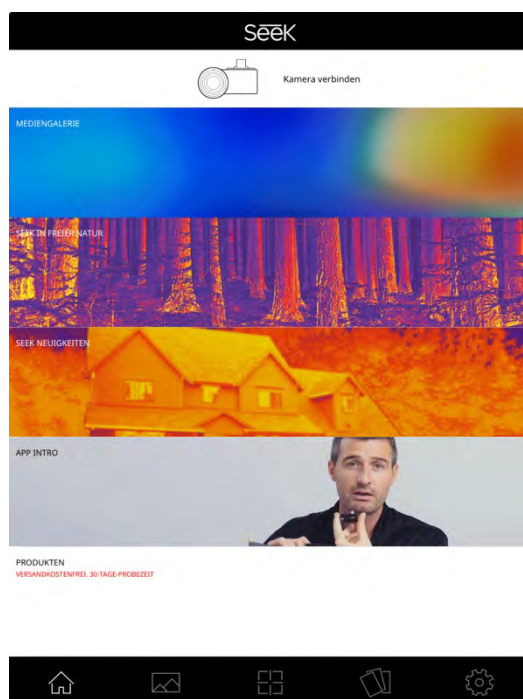


Abbildung 53: Startbildschirm nach dem Öffnen der App (links) und Foto der Wärmebildkamera (rechts)

Wärmebildkameras funktionieren, indem sie kein Bild ihrer Umwelt aus dem sichtbaren Farbspektrum aufnehmen, wie es *normale* Kameras tun, sondern durch die Aufnahme eines Infrarotbildes. Durch die Infrarotlinse und einen flächenauflösenden Sensor kann die Infrarotstrahlung von verschiedenen Raumwinkeln gemessen werden und daraus die Oberflächentemperatur errechnet werden. Das Errechnen geschieht durch das Messen einer Spannung, welche durch das Auftreffen von Infrarotstrahlung auf dem Sensor entsteht. Oft wird neben dem Infrarotbild auch ein *normales* optisches Bild des Raumes mithilfe der *normalen* optischen Kamera des Tablets aufgenommen. Werden diese beiden Bilder dann digital übereinandergelegt, kann ein schärferes Wärme-Gesamtbild entstehen, da die App die unterschiedlich warmen Punkte mit den erkannten realen Körpern abgleicht. Die Temperaturunterschiede werden dann durch ein „Falschfarbenbild“ dargestellt (Lück & Wilhelm, 2023, S. 26-27).

Wärmebildkameras bieten sich vor allem auch zur Untersuchung von Reibungsprozessen und damit zur Untersuchung der Erwärmung von Oberflächen an (Lück & Wilhelm, 2023, S. 27). Wie dies in dem hier durchgeführten Experiment genutzt wird, zeigen die folgenden Abbildungen. Diese Abbildungen nehmen die Perspektive einer beobachtenden Person ein, welche gleichzeitig sowohl auf das Bild der Wärmebildkamera als auch auf den Ablauf des realen Experiments schauen kann.

Abbildung 54 zeigt sowohl das Wärmebild, in welchem noch das mit Kunstleder bespannte Gewicht zu sehen ist, als auch das Wärmebild, in welchem das Gewicht schon aus dem Bildausschnitt der Wärmebildkamera entfernt wurde. Da die Farbskala von blau bis rot bzw. eher von dunkelblau/schwarz bis hellrot/weiß versucht den ganzen Temperaturbereich im Bildausschnitt der Wärmebildkamera abzudecken, kann es zu einer unterschiedlichen Farbgebung desselben Körpers mit derselben Temperatur in verschiedenen Aufnahmen kommen (Molz, Wilhelm, Kuhn, 2022, S. 226). Wenn der Unterschied zwischen höchster und niedrigster Temperatur innerhalb des Bildausschnitts nicht sehr klein ist, können auch nur Farben von dunkelgrün bis orange erscheinen (siehe Abbildung 54, rechts). Da auf das mit

Kunstleder bespannte Gewicht über die gesamte Rutschstrecke hinweg die (Gleit-)Reibungskraft wirkte, während sich die gleiche Temperaturerhöhung bzw. Wärme auf die ganze Rutschstrecke verteilen konnte, leuchtet das mit Kunstleder bespannte Gewicht im Wärmebild am hellsten und der Farbbereich geht von dunkelblau bis weiß (siehe Abbildung 54, links).



Abbildung 54: Wärmebilder der schiefen Ebene nach Hinabrutschen des mit Kunstleder bespannten Gewichts

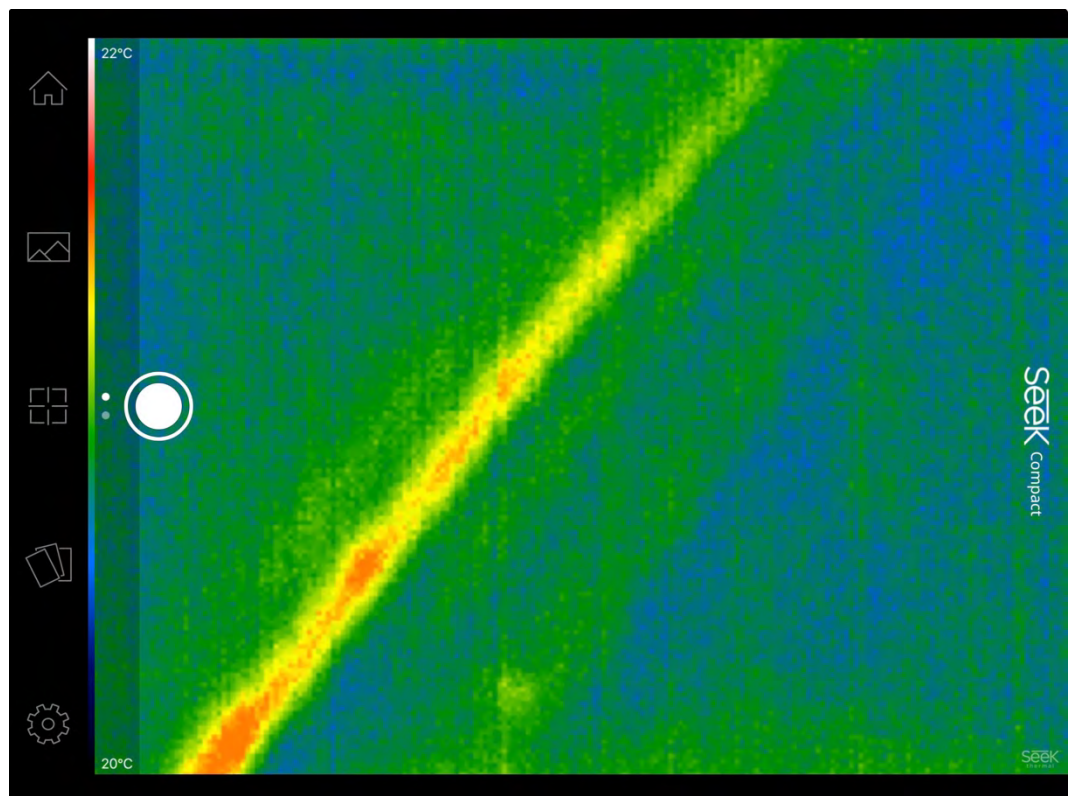


Abbildung 55: Screenshot des Wärmebilds der schiefen Ebene nach dem Hinabrutschen des mit Kunstleder bespannten Gewichts

Ein Screenshot des Wärmebildes der Wärmebildkamera verrät, dass die ungenutzten Flächen der schiefen Ebene eine Temperatur von etwas über 20°C haben, während die benutzte Rutschfläche eine Temperatur von bis zu 22°C aufweist (siehe Abbildung 55). Dieser Unterschied ist nicht gravierend, allerdings muss bedacht werden, dass Menschen viel mehr Masse mit ihrem Körper tragen als ein Stativfuß bzw. Experimentiergewicht und eine Notrutsche darüber hinaus auch viel länger ist als der hier benutzte ungefähre Meter.

Auch beim Experimentierdurchgang des mit Baumwolle bespannten Gewichts lässt sich eine Spur des hinabgerutschten Gewichts auf dem Wärmebild erkennen. Da aber die Reibungskräfte zwischen dem rosa Hautimitat und der schwarzen Notrutschen-Oberfläche größer sind als zwischen weißer Baumwolle und schwarzer Notrutschen-Oberfläche, kommt es im Falle der Baumwolle zu einer weniger starken Temperaturentwicklung. Dies lässt sich nicht nur am Wärmebild ohne das im Bildausschnitt liegende Gewicht sehen (siehe Abbildung 56, rechts), sondern auch im Wärmebild, in welchem das zuvor hinabgerutschte Gewicht noch am unteren Ende der schiefen Ebene liegt (siehe Abbildung 56, links). In beiden Wärmebildern gibt es nämlich weder bläuliche noch tief rötliche Farbtöne. Das bedeutet, dass die Temperaturen des Gewichts und dessen Rutschspur nicht so weit entfernt von der Temperatur der übrigen schiefen Ebene sind. Einzig und allein das mit Baumwolle bespannte Gewicht selbst leuchtet etwas orange. Die Begründung dafür ist dieselbe wie im Falle des mit Kunstleder bespannten Gewichts zuvor.



Abbildung 56: Wärmebilder der schiefen Ebene nach Hinabrutschen des mit Baumwolle bespannten Gewichts

Der folgende Screenshot des Wärmebildes nach dem Hinabrutschen des mit Baumwolle bespannten Gewichts zeigt nochmal deutlicher, dass es zu einer geringeren Temperaturentwicklung zwischen Baumwolle und mit TPU beschichtetem Nylongewebe kommt. Die angezeigte Farbskala zwischen dunkelblau/schwarz und hellrot/weiß verläuft laut App nur im Rundungsbereich von etwa 20°C (siehe Abbildung 57). Dennoch lässt sich ein Temperaturunterschied erkennen, da die Spur des hinabgerutschten Gewichts gelblich, während die restliche schiefe Ebene grünlich erscheint.

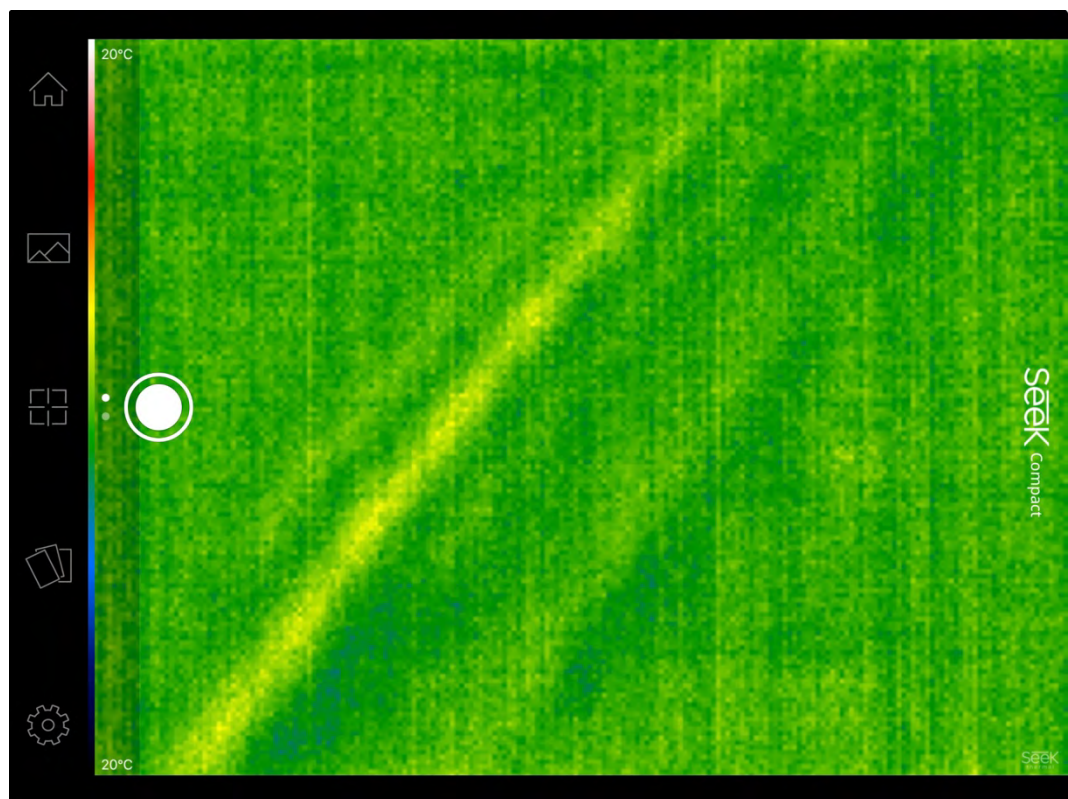


Abbildung 57: Screenshot des Wärmebilds der schiefen Ebene nach dem Hinabrutschen des mit Baumwolle bespannten Gewichts

Es kann vorkommen, dass das Gewicht zu leicht gewählt ist und es daher zu keiner ausreichenden Temperaturentwicklung kommt. Dies macht sich dadurch bemerkbar, dass im Wärmebild kaum ein farblicher Unterschied zwischen der benutzten Rutschfläche und der übrigen ungenutzten Fläche der schiefen Ebene zu erkennen ist. Hier bieten sich folgende Lösungen an. Entweder sollte das Gewicht eine höhere Masse tragen, um so die Normalkraft

$\vec{F}_N$ bzw. die daraus zu berechnende Gleitreibungskraft $\vec{F}_{GR}$ zu erhöhen, oder beide Experimentierdurchgänge werden mehrfach – aber gleich oft – wiederholt und anschließend die aufsummierte Temperaturerhöhung der jeweiligen Rutschstrecken verglichen. Dies ist auch realistisch, da im Falle einer Evakuierung des Flugzeugs über die Notrutschen dutzende Menschen über die Notrutsche fliehen.

Gleichzeitig sorgt ein schwereres Gewicht für mehr Verschleiß an den Versuchsutensilien. Vor allem der einfache Stoffrest bzw. das alte nicht mehr gebrauchte weiße T-Shirt reißt nach mehreren Wiederholungsdurchgängen leicht ein (siehe Abbildung 58, links). Dies lässt sich aber kurzfristig lösen, indem der oben am Gewicht überhängende Stoffrest über die vordere Spitze des Gewichts gezogen wird (siehe Abbildung 58, rechts). Es sollte dennoch klar sein, dass für dieses Experiment eher alte und nicht mehr gebrauchte Stoffreste oder Kleidungsstücke verwendet werden sollten.



Abbildung 58: ingerissenes T-Shirt (links), übergezogener Stoffrest (rechts)

Allgemein bietet sich der Hinweis an, dass größere Wärmebildkameras ziemlich teuer sind und selbst einfache – an das Tablet ansteckbare – Wärmebildkameras immerhin mehrere hundert Euro kosten können (Lück & Wilhelm, 2023, S. 26). Daher sollte sowohl die Lehrkraft als auch die Lernenden damit vorsichtig umgehen. Dies wird in dieser Unterrichtseinheit dadurch gewährleistet, dass das Experiment als Demonstrationsexperiment durchgeführt wird, bei dem nur einzelne Lernende unterstützen.

Abschließend sei noch auf das Symbol der App, welche für das hier durchgeführte Experiment mit der Wärmebildkamera benutzt wurde, verwiesen (siehe Abbildung 59).



Abbildung 59: Appsymbol von der zur Wärmebildkamera gehörenden App Seek thermal (Screenshot von für Experiment benutztem Tablet)

5.2.5 Didaktische & Methodische Begründung

Da die Doppelstunde durchgehend vom Arbeitsblatt und zumindest in der zweiten Hälfte auch vom Experiment begleitet wird, wurden bereits viele Entscheidungen, die das Arbeitsblatt oder das Experiment betreffen, didaktisch und methodisch begründet. Folglich werden in diesem Unterkapitel vor allem die Chronologie und die einzelnen Unterrichtsphasen analysiert. Entscheidungen, die das Arbeitsblatt oder das Experiment betreffen, werden vereinzelt nur nochmals kurz erwähnt.

Das anfängliche Zeigen des Artikels bzw. dessen großgeschriebener Überschrift dient zum einen der inhaltlichen Kontextsetzung für diese Unterrichtseinheit, indem die Frage nach der Gefahr der Benutzung der Notrutschen im Falle einer Notlandung eines Flugzeugs aufgeworfen wird. Zum anderen soll dieser Einstieg aber auch den kompetenzorientierten Fahrplan dieser Unterrichtseinheit aufzeigen, indem das kritische Hinterfragen von Medienbeiträgen trainiert wird (siehe Unterkapitel 5.2.3). Die Lernenden sollen sich zu diesem Zeitpunkt fast schon voreingenommen und unreflektiert äußern, was sich daran erkennen lässt, da die Frage danach die

erste in der ganzen Unterrichtseinheit ist. Die Lernenden können noch keine valide und auf Fakten beruhende Position dazu einnehmen. Dies ist aber im Sinne der Idee der Unterrichtseinheit wichtig, da es so zum Ende der Unterrichtseinheit zu einem größeren Moment der Überraschung bzw. der Meinungsänderung kommen könnte und somit klarer wird, dass es wirklich sinnvoll ist, Medienbeiträge kritisch zu hinterfragen – auch, wenn der Inhalt des Artikels am Ende bestätigt wird.

Die zweite Phase der Einarbeitung bzw. des Problemverstehens beruht auf der Tatsache, dass die Lernenden ihre vorläufige Einstellung zum Artikel schriftlich festhalten, um sie nachher besser damit vergleichen zu können, was sie auf Grundlage ihrer Recherche, des Experiments und ihrer Berechnungen denken. Außerdem wird in dieser Phase das Entwickeln von Fragestellungen und Experiment-Ideen verlangt, was ebenfalls ein wichtiger Bestandteil der Curricula ist (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 19), da es zum naturwissenschaftlichen Arbeiten dazugehört und einen essenziellen Schritt beschreibt, welcher vor dem Experiment passieren sollte (Hopf, Schecker, Höttecke & Wiesner, 2022, S. 107). Diese Erarbeitungsphase geschieht wie alle anderen Arbeitsphasen, welche nicht im Plenum stattfinden, in Partnerarbeit. Dies dient nicht nur der allgemeingültigen Aneignung von sozialen Kompetenzen in Partner- bzw. Gruppenarbeiten, wie solidarisches Handeln oder Kommunikationskompetenzen (Kirchner, Girwidz & Fischer, 2020, S. 244-245), sondern auch dazu, zu einem Konsens zu kommen, welcher schwerer wiegt als die Meinung eines Einzelnen (Hopf, Schecker, Höttecke & Wiesner, 2022, S. 102). Gerade für das Beurteilen von Dingen – wie hier Zeitungsartikeln – ist es sinnvoll, mehrere Perspektiven zu bekommen, bevor sich das Paar bzw. die Gruppe äußert. In dieser Unterrichtseinheit ist allerdings keine Gruppenarbeit vorgesehen, da dann wiederum zu einheitliche Meinungen über den Zeitungsartikel im anschließenden Gruppenvergleich zu befürchten wären und des Weiteren in späteren Unterrichtsphasen nicht so detailliert auf verschiedene Schülervorstellungen eingegangen werden kann.

Die folgende erste Zwischenbesprechung im Plenum dient vor allem dazu, die Fragen und Experiment-Ideen der Lernenden zu sammeln bzw.

zusammenzufassen. Hier kommt der Lehrkraft eine entscheidende Rolle zu, da sie filtern sollte, welche Wortmeldungen der Lernenden sie wie zusammenfasst. Das Ziel der Lehrkraft sollte hier also sein, möglichst nur Experiment-Ideen und passende Fragen zur im Artikel diskutierten Reibung mit der Notrutsche an die digitale Tafel zu schreiben. Dies sollte allerdings nicht allzu schwer werden, da es keine anderen physikalischen Aussagen bzw. Thesen des Autors im Artikel zu finden gibt. Somit ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass sich die Lernenden vor allem Experimente überlegen werden, welche testen, ob es mit langer oder kurzer Kleidung zu mehr „Reibung“ bzw. Temperaturerhöhung kommen wird. Nachdem die Ideen ausgetauscht wurden und vielleicht auch schon indirekt ein wenig im Plenum bewertet wurden, setzt die Lehrkraft erneut den Kontext der Flugsicherheit und zeigt erstmals ein Video, welches das Aufblasen einer Notrutsche, die Größe und Steile einer Notrutsche, das tatsächliche Runterrutschen von Passagieren und deren Körperhaltung zeigt. Dies ist wichtig, um zum Ende der Unterrichtseinheit diese Faktoren bei der Frage nach dem möglichst „korrekten Rutschen“ zu diskutieren. Eventuell haben einige Lernende bis zu diesem Zeitpunkt noch nie eine Notrutsche gesehen, wodurch spätestens zu diesem Zeitpunkt das Video gezeigt werden sollte. Allerdings bietet sich das Video nicht zu einem früheren Zeitpunkt an, da die Aufgabe der Entwicklung von Experiment-Ideen sonst zu einfach wäre und auch die dafür notwendigen Fragestellungen bereits an einigen Stellen im Video beantwortet wären. Dass es an dieser Stelle allgemein sinnvoll erscheint, ein Video zu verwenden, ergibt sich aus der gerade getätigten Erklärung bzw. dem Grund der Veranschaulichung (Kirchner, Girwidz & Fischer, 2020, S. 328-329). Dass das Video aus ehemaligen Schulungen der Lufthansa für die Ausbildung zur Flugbegleitung dient (davidicusb, o. J.) und deshalb einige interessante zu hinterfragende Details im Video genannt werden, kann später zum Ende der zweiten Stunde nochmals im Plenum diskutiert werden.

Auch für die folgende Unterrichtsphase des Sammelns von Informationen zum physikalischen Sachverhalt der Reibung(skraft), welcher den Lernenden bekannt ist, bietet sich vorher die Betrachtung des Videos an, da auf diese Weise Erinnerungen an schiefe Ebenen und darauf hinunterrutschenden

Objekten geweckt wird. Dass die Lernenden dann als Hilfe auch in ihren (Regel-)Heften nachschlagen dürfen, ist je nach zeitlicher Entfernung des Themas im Unterricht nur fair. Regel-Hefte sind Hefte, die über die Jahre entstehen und wie eine Art Zusammenfassung aller Themen in der Physik als Lehrbuch fungieren. Damit lässt sich ein Sachverhalt schnell wiederfinden, da in den Regel-Heften nur die wichtigen Merksätze, sowie Formeln und Zeichnungen zu finden sind. Dass ein zwischenzeitliches Wiederholen von Lerninhalten zur Wissenssicherung bzw. Festigung empfohlen ist, gilt sogar Unterrichtsart-übergreifend (Kirchner, Girwidz & Fischer, 2020, S. 136 & 232).

Das die erste Stunde abschließende Zusammentragen aller gefundenen Informationen im Plenum sorgt dafür, dass alle Lernenden für die nächste Stunde auf dem gleichen Kenntnisstand sind. Dazu sollen die Lernenden die Teile des Tafelbildes, welche ihnen als Pärchen fehlen, bei sich im Heft ergänzen (siehe Abbildung 48, links). Kirchner, Girwidz & Fischer stellen ebenfalls dar, dass das Wiederholen und das Zusammentragen von Lerninhalten meistens am Ende einer Stunde passiert bzw. passieren soll (2020, S. 136 & 232).

Damit dieses Wissen eben nicht zu tragem, schnell vergessenem und damit nicht anwendbarem Wissen wird, ist eine Vernetzung bzw. Verflechtung mit anderen Themen der Physik notwendig. Dabei wird das Wissen zur Reibungskraft als „modulares“ Wissen betrachtet, welches als „Verständniseinheit“ auf neue Situationen angewandt werden kann (Hopf, Schecker, Höttecke & Wiesner, 2022, S. 69). Dies geschieht in der zweiten Stunde der Unterrichtseinheit zunächst einmal dadurch, dass das zuvor erstellte Tafelbild zur Reibungskraft nochmals gezeigt wird und inhaltlich mit dem auch bekannten Gebiet der Reibungsarbeit bzw. Arbeit allgemein verbunden wird. Diese methodische Entscheidung ist auch physikdidaktisch wichtig und sinnvoll, da so nochmal besprochen wird, dass für die Bestimmung der Arbeit nur der Weg entlang der wirkenden und betrachteten Kraft relevant ist. Für die Betrachtung der Reibungsarbeit bzw. Reibungskraft wird dies spätestens an dieser Stelle in Plenum angesprochen und besprochen.

Die folgende Recherche- und Erarbeitungsphase ist zentral für das Verständnis des darauffolgenden Experimentes, da sie auf die verschiedenen Materialien fokussiert und die Anfangsfrage der Unterrichtseinheit beantworten lässt: *Warum soll das Tragen von kurzen T-Shirts auf Notrutschen gefährlicher sein als das Tragen langer Pullover?* Bei der Recherche der verschiedenen Materialien von Kleidung, Notrutsche und Haut geht es nicht nur um die Kompetenz des Suchens und Findens von Informationen (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 20), sondern auch um das realistische Aussortieren und Ersetzen von Materialien, was unter das Auswerten und Interpretieren fällt, (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 19), welche womöglich für das schulische Experiment nicht zu beschaffen sind. Diese Recherche sollte mittels Internetsuche/-eingabe problemlöse möglich sein. Das Recherchieren von (Gleit-)Reibungskoeffizienten zwischen den zuvor gefundenen bzw. ausgewählten Materialien wird hingegen schwieriger. Wie im Unterkapitel 5.2.3 zu lesen ist, lässt sich dafür beispielsweise Nylon(gewebe) für die Notrutsche oder ein Gummi-ähnlicher Stoff für die Haut verwenden. Diese Auswahl muss allerdings in der Besprechung am Ende der zweiten Stunde als mögliche Fehlerquelle diskutiert werden. Für die Recherche der (Gleit-)Reibungskoeffizienten bietet sich auch eine KI an. Dass die Lehrkraft dazu auf konkrete und sinnvolle Fragestellungen der Lernenden für die KI achten sollte, ergibt sich aus der sinnvollen und reflektierten Nutzung von KI in der Schule (siehe dazu Unterkapitel 5.2.3). Nach den beiden Recherchen sollen die Lernenden die Reibungskräfte und Reibungsarbeiten berechnen, um in der folgenden Unterrichtsphase begründet Stellung zur Frage der Kleidungslänge auf Notrutschen beziehen zu können.

Die anschließende Ergebnisbesprechung im Plenum dient wieder dazu, den möglichst gleichen inhaltlichen Kenntnisstand bei allen Lernenden zu gewährleisten, sowie deren Kompetenzen bzgl. der Recherche und des Rechnens zu überprüfen (Hopf, Schecker, Höttecke & Wiesner, 2022, S. 126). Außerdem sollen einzelne Lernende ihre Recherche- und Rechenergebnisse vorne an der digitalen Tafel vortragen, was der Förderung der

Kommunikationskompetenz bzw. genauer dem Üben des Präsentierens dient (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 13).

Das erneute Zeigen der Fragestellungen und Experiment-Ideen der Lernenden aus der ersten Stunde und das Erläutern der vorbereiteten Utensilien zum kommenden Reibungsexperiment von Seiten der Lehrkraft verdeutlichen den Lernenden, dass ihre bisherigen Arbeitsergebnisse wiederverwendet werden und damit nicht unnötig waren. Das ist für das Erleben von Selbstwirksamkeitserfahrung wichtig, da die Lernenden ihre Arbeitsergebnisse in den Ergebnissen oder Experimenten der ganzen Klasse wiederfinden können (Kirchner, Girwidz & Fischer, 2020, S. 509). Das Gleiche gilt dafür, dass die Lernenden beim Demonstrationsexperiment mitmachen bzw. helfen können. Die dortige Arbeitsaufteilung unterstreicht, dass die Lehrkraft Hilfe braucht und die Lernenden damit im Klassenverbund wichtig sind. Welchen didaktischen oder methodischen Hintergrund einzelne Geräte oder Momente während des Experiments haben, wurde bereits im Unterkapitel 5.2.4 erläutert.

In der letzten Phase der Unterrichtseinheit geht es um die Interpretation des Experiments und die erneute Berufung auf den inhaltlichen Kontext der Flugsicherheit. Das erstmalige Vergleichen der beiden maximalen Temperaturwerte nach dem Rutschen eines Gewichts mit Baumwoll-Bezug und eines Gewichts mit Kunstleder-Bezug weisen darauf hin, dass die Temperaturerhöhung aufgrund der Reibung zwischen Haut und Notrutsche größer ist als aufgrund der Reibung zwischen Baumwolle und Notrutsche. Dieses Mehr an Temperaturerhöhung lässt sich äquivalent auf die verrichtete Reibungsarbeit im Vergleich beider Experimentierdurchgänge übertragen. Das ist zumindest makroskopisch durch das Experiment mit Wärmebildkamera in Verbindung mit den vorherigen Berechnungen aufgrund verschiedener (Gleit-) Reibungskoeffizienten ersichtlich. Warum bzw. wie dies auch mikroskopisch zu erklären ist, wird die Hausaufgabe zur nächsten Stunde sein, damit die Lernenden sich zu Hause nochmals mit dem gefundenen Zusammenhang beschäftigen und diesen auch inhaltlich vertiefen. Wenn Hausaufgaben diesen Sinn haben, sind sie auch nochmals effektiver (Effektstärken von ca.

0,4 bis 0,5) als die in der Hattie-Studie durchschnittlich angegebene Effektstärke von ca. 0,3, welche bereits zeigt, dass sie einen Zusammenhang mit Lernerfolg haben (Hattie, 2023, S. 421-422). Diese Hausaufgabe ist nach dieser Unterrichtseinheit und aufgrund des bereits behandelten Zusammenhangs zwischen Teilchenbewegungen und Temperatur eines Stoffes (siehe Unterkapitel 5.2.1) – aber auch gerne mit zusätzlicher Internetrecherche – durchaus machbar. Ein weiterer Teil der Hausaufgabe wird es sein, einen Abschluss für die Frage nach der Seriosität des Artikels vom Beginn der Doppelstunde zu finden. Damit schließt sich ein Kreis und das kritische Hinterfragen von Medienbeiträgen kommt zu einem Ergebnis. In dieser letzten Unterrichtsphase bietet es sich auch an, wie geplant über kontextorientierte Fragen zu reden. So heben beispielsweise die Passagiere im Video während des Rutschens auf der Notrutsche ihre Hände nach vorne, sodass sie nicht die Rutsche berühren. Verhalten wie dieses lässt sich nun mit Leichtigkeit beantworten und verankert die neuen Erkenntnisse mit weitergehenden Anwendungsbeispielen.

5.2.6 Folgender Unterricht & Kritischer Rückblick

Wie im vorherigen Kapitel zum Sachverhalt des Luftlochs soll auch in diesem Kapitel zum Sachverhalt der Notrutsche ein kritischer bzw. ergänzender Blick auf die erstellte Unterrichtseinheit geworfen werden. Dazu sei zunächst wieder einmal generell gesagt, dass es auch hier dazu kommen kann, dass die Zeit von zwei Stunden Unterricht nicht ausreichen könnte, um den dargestellten Unterrichtsverlaufsplan komplett zu durchlaufen. In dem Fall könnte die Lehrkraft natürlich an einer geeigneten Stelle einen inhaltlichen Schnitt zum Ende der zweiten Stunde machen und in einer etwaigen dritten Stunde dort wieder anschließen.

Um nun näher ins Detail zu gehen, sei zunächst ein Blick auf das Experiment geworfen. Es kann dazu kommen, dass die Lernenden nicht die in der Realität verwendeten Materialien, z.B. für eine Notrutsche, eindeutig recherchieren können oder dass sie keine geeigneten Ersatzmaterialien finden, welche in einem Schulexperiment, z.B. anstelle der realen menschlichen Haut,

verwendet werden können. In diesem Fall muss die Lehrkraft früher oder später die vor ihr selbst ausgewählten Materialien vorstellen und ihre Wahl begründen. Weiterhin kann kritisiert werden, dass das Experiment nicht derart funktionieren könnte, wie es im Unterkapitel 5.2.4 vorgestellt wurde, da die Ersatzmaterialien die realen Reibungsverhältnisse nicht ausreichend genau darstellen. Auch wenn dies für die Lehrkraft im ersten Moment unangenehm sein kann, bietet sich hier eine genaue Fehlerbetrachtung innerhalb der zu unterrichtenden Klasse an.

An dieser Stelle sollte dann auch in einer folgenden Stunde nochmals angesetzt werden. Falls es im Zuge der Experiment-Interpretation und damit der letzten Unterrichtsphase der zweiten Stunde nicht mehr möglich sein sollte, über die Vergleichbarkeit von realer Situation (Mensch auf Notrutsche) und Experiment bzw. Modellierung (Gewicht auf schiefer Ebene) zu reden, sollte dies in der folgenden und damit dritten Stunde der Unterrichtseinheit passieren. Dies ist im Zuge des Modellierens von Realität und des Verstehens von Fehlerquellen wichtig (Hessisches Kultusministerium, 2011, S. 20). In der vorgestellten Unterrichtseinheit wurde bewusst der didaktische wie auch der inhaltliche Fokus nicht auf das Modellieren gelegt, auch wenn dies teilweise durch das Demonstrationsexperiment angeschnitten wurde. Bereits in der ersten vorgestellten Unterrichtseinheit zum Luftloch wurde modelliert und zudem ist es weder möglich noch das didaktische Ziel, alle Kompetenzen (z.B. Modellieren oder Kritischer Umgang mit Medien) gleichzeitig in einer Stunde bzw. Unterrichtseinheit zu tangieren.

Der genaue Unterschied zwischen der Haftreibungskraft und der Gleitreibungskraft bzw. den jeweiligen Koeffizienten sollte den Lernenden bereits aus dem vorherigen Unterricht bekannt sein. Daher wird in dieser Unterrichtseinheit nicht mehr derartig detailliert darauf eingegangen. Es kann aber durchaus sinnvoll sein, diese Unterscheidung nochmals zu thematisieren. Dazu bietet sich die wiederholende Phase am Ende der ersten Stunde zu den – den Lernenden bereits bekannten – Reibungskräften an, da dort auch das gemeinsame Tafelbild inkl. Zeichnung erstellt wird. Nichtsdestotrotz ist dies ein Kritikpunkt an der Unterrichtseinheit, da den

Lernenden klar und deutlich werden muss, dass nur die Gleitreibungskraft für die Reibungsarbeit relevant ist, weil nur diese bei einer Bewegung über eine zu messende Strecke hinweg wirkt. Diese Notwendigkeit wurde im Unterrichtsentwurf und dessen Analyse auch angesprochen, könnte einigen Lernenden aber zu kurz kommen.

Auch kann kritisiert werden, dass zu viele verschiedene Themen bzw. physikalische Sachverhalte in diesem Unterrichtsentwurf verarbeitet wurden. So könnte es für einige Lernende schwierig werden, Reibungskräfte, Reibungsarbeit, Temperaturentwicklung, mikroskopische Teilchenbewegungen und das Entwickeln eines Verständnisses für verschiedene Oberflächenmaterialien kognitiv miteinander zu verknüpfen. Da diese Unterrichtseinheit aber auf vorherigen Unterrichtserkenntnissen zu vielen dieser Themen bzw. physikalischen Sachverhalte beruht und diese verbinden soll, lässt sich diese Schwierigkeit im Kontext des vorgestellten Experiments womöglich nicht vollständig verhindern.

Alternativ könnte der Anteil, den die Reibungskräfte in der Unterrichtseinheit einnehmen, verringert werden und mehr Fokus auf die Energien (potenzielle und kinetische Energie) und dessen Umwandlung in thermische Energie gelegt werden, wenn Reibung vorliegt. In diesem Fall könnte aber dann kein mikroskopisches Verständnis für die Temperaturerhöhung bei Reibung erreicht werden. Außerdem wäre der Fokus auf die Abhängigkeit der Temperaturentwicklung von den Materialien in Reibungsfällen verloren. Auch dafür kann sich die Lehrkraft aber entscheiden und das hier vorgestellte Experiment unterrichtlich in einen Energieumwandlungskontext setzen.

Des Weiteren beinhaltet das Arbeitsblatt bereits alle Aufgaben für beide Stunden aus der Unterrichtseinheit, wodurch Lernende beim Bearbeiten früherer Aufgaben bei späteren nach Lösungsideen schauen können. Diese Entscheidungen (z.B. ein oder zwei Arbeitsblätter, mehr oder weniger Papier, Einfachheit in der Unterrichtsgestaltung oder sehr detaillierte Planung) muss die Lehrkraft dann individuell abwägen.

Im folgenden Unterricht bietet es sich inhaltlich-thematisch wie didaktisch an, auf weitere Arten bzw. Beispiele von physikalischer Arbeit einzugehen und

die dazu gehörende Betrachtung der jeweils wirkenden Kraft durchzuführen. Dies könnte z.B. die zu verrichtende Arbeit bzw. benötigte Energie beim Fliegen selbst sein, welche auch aufgrund der Reibung(skraft) mit der Luft ausschlaggebend ist. In diesem Zuge können Lernende dann auch in ihrer oft berechtigten Wahrnehmung, dass die Betrachtung der Physik in der Schule ohne Reibung nicht realitätsnah ist, vom Gegenteil überzeugt werden. Die Betrachtung von Reibung ist in diesem Sinne wichtig, um physikalisch falsche Schülervorstellungen zu vermeiden, z.B. dass gewisse physikalische Gesetze nur im *idealen* Physikraum gelten und nicht in der von den Lernenden wahrgenommenen Realität (Hopf, Schecker, Höttecke & Wiesner, 2022, S. 37).

5.3 Kabinendruck

In diesem Kapitel 5.3 werden zwei Experimente vorgestellt, welche auf den passenden und damit zum Überleben der Passagiere notwendigen Kabinendruck – mittels zweiseitig annäherndem Ausschlussverfahren – schließen lassen. Dazu werden diesmal keine vollständigen Unterrichtsentwürfe erstellt, sondern nur die Experimente mit Bildern, Auswertungen und Tipps zur Durchführung dargestellt. Außerdem wird zuvor eine kleine Einleitung darin gegeben, welche Inhalte und Schritte vor der Durchführung der Experimente sinnvoll oder sogar notwendig erscheinen. Zum Abschluss soll auch der auf die Experimente folgende Unterricht kurz skizziert werden und ein kritischer Rückblick auf die Experimente geworfen werden, um teilweise auch Alternativen aufzuzeigen. Dieses dann insgesamt kürzere Kapitel soll den lesenden Lehrkräften mehr Freiheit in der konkreten Unterrichtsgestaltung um die beiden Experimente herum geben. Auch das später folgende Kapitel 5.4 zu den Flugzeugfenstern folgt diesem schematischen Kapitelaufbau.

5.3.1 Bisheriger Unterricht

Vor der Durchführung der beiden kommenden Experimente müssen gar nicht allzu viele inhaltliche Voraussetzungen auf Seiten der Lernenden vorliegen.

Allerdings sollte den Lernenden die physikalische Größe des Drucks bereits bekannt sein. Dazu gehören auch die verschiedenen Einheiten und deren Umrechnung ineinander. Dies wird bei der Analyse der Experimente wichtig sein, um sich nicht lange mit Formalien wie den Einheiten auseinandersetzen zu müssen, sondern die Ergebnisse der Experimente physikalisch und technisch interpretieren zu können. Des Weiteren sollten die Zusammenhänge des idealen Gasgesetzes zwischen Luftdruck, Volumen, Teilchenmenge und Temperatur klar sein, damit die Funktion einer evakuierenden Luftpumpe und das zweite darauf folgende Experiment besser verstanden werden können. Dafür sollten zumindest die Teile der idealen Gasgleichung behandelt worden sein, welche sich mit dem Zusammenhang zwischen Teilchenmenge und Luftdruck bei gleichbleibendem Volumen (und Temperatur) beschäftigen. Da die beiden im folgenden vorgestellten Experimente außerdem in einem eher detailreichen Kontext der Flugsicherheit analysiert werden und bereits Auswirkungen von *Druckunterschieden* behandeln, eignen sich diese Experimente nicht als Einführungs- bzw. Anfangsstunde zur Thematik des Drucks. Viel mehr bieten diese Experimente und der dazugehörige Kontext der Druckverhältnisse innerhalb und außerhalb von Flugzeugen die Möglichkeit den physikalischen Sachverhalt des Drucks inhaltlich zu vertiefen. Daher wird diese dazu gehörende Unterrichtseinheit eher in der Mitte oder am Ende einer möglichen Unterrichtsreihe zum inhaltlichen Setting des Drucks durchzuführen sein. In diesem Sinne bietet sich für die folgenden Experimente auch ein genetischer Physikunterricht an, welcher die historischen oder erkenntnistheoretischen Schritte hin zum „perfekten“ Luftdruck in Flugzeugen auf Reiseflughöhe darstellt (Kirchner, Girwidz & Fischer, 2020, S. 224-225). Diese Chronologie bildet auch die immer neu hinzukommenden Sicherheitsvorkehrungen und -regeln in der Fliegerei ab, welche oft erst durch Unfälle und den Tod von vielen Menschen eingeführt worden sind (International Air Transportation Association, 2024, S. 6).

5.3.2 Experimente & Begründung

Da in der Unterrichtseinheit erläutert werden soll, warum der Kabinendruck in einem Flugzeug bei seiner maximalen Flughöhe weder dem sehr niedrigen Außendruck auf dieser Flughöhe noch dem für den Menschen am angenehmsten erscheinenden und vergleichsweise hohen Druck auf Meereshöhe entspricht, werden zwei Experimente benötigt. Das eine soll neben einer relevanten Information zu den menschlichen Lungenfähigkeiten zeigen, warum der Kabinendruck nicht *einfach* dem äußeren Druck auf jeder Flughöhe angepasst wird, während das andere Experiment erklären soll, warum der Kabinendruck nicht unabhängig von der Flughöhe auf dem Niveau der Meereshöhe gehalten wird. Dementsprechend ist hier die Reihenfolge der Experimente wichtig. Wie im folgenden Teilkapitel 5.3.3 erläutert wird, lässt sich aber auch eine umgekehrte Reihenfolge der Experimente realisieren.

Dazu bietet es sich im Plenum an, zunächst einmal grundsätzlich die Frage nach dem Kabinendruck in einem Flugzeug auf unterschiedlichen Flughöhen zu stellen. Vielleicht werden hier schon erste Ideen und Bedenken bzgl. technischer sowie menschlicher Leistungsgrenzen thematisiert. Früher oder später wird der Punkt erreicht, bei dem die Frage aufkommt, warum der Kabinendruck nicht *einfach* dem Außendruck auf jeder Flughöhe angepasst wird. An dieser Stelle sollte dann das erste Experiment folgen.

Dieses Experiment sollte die Frage klären, wie sich denn überhaupt der Druck bei zunehmender Höhe verhält. Vielleicht gibt es auch hier schon erste Vermutungen der Lernenden. Nichtsdestotrotz sollten die Lernenden für dieses Experiment ihre Smartphones dabei haben und Apps zum Messen von verschiedenen physikalischen Größen installiert haben (hier vor allem: Barometer). Dies kann auch erst gemeinsam im Plenum installiert werden. Dazu bietet sich z.B. eine App wie *phyphox* an, welche auch für die folgenden Aufnahmen, Daten und Graphiken verwendet wurde (siehe Abbildung 60).

Mit *phyphox* wird der Luftdruck bestimmt, indem die Funktion „Luftdruck“ ausgewählt wird (siehe Abbildung 61). Dort ist auch zu lesen, dass das Smartphone dazu die Rohdaten des eingebauten Barometers verwendet. Es kann sein, dass nicht alle Smartphones der Lernenden ein Barometer verbaut

haben. Sollte es der Fall sein, dass einzelne Lernende kein benutzbares Smartphone und damit Luftdruck-Messgerät haben, können sich diese Lernenden an andere Lernende mit dazu fähigem Smartphone anschließen.



Abbildung 60: Appsymbol von der zur Messung des Luftdrucks gehörenden App phyphox (Screenshot von für Experiment benutztem Smartphone)



Abbildung 61: Teil der Startseite von phyphox zur Auswahl der Sensoren bzw. Messungen (Screenshot von für Experiment benutztem Smartphone)

Nun begeben sich die Lernenden in die unterste Etage des Treppenhauses der Schule und starten die Messung des Luftdrucks. Langsam steigen sie die Treppenstufen hoch, bis sie in der obersten Etage der Schule angekommen sind. Erst nach Erreichen der obersten Stufe stoppen sie die Messung. *Phyphox* gibt während der Messung nicht nur Live-Werte in Form einer digitalen Ziffernanzeige an (siehe Abbildung 62), sondern erstellt automatisch auch ein Diagramm über den gesamten Messzeitraum (siehe Abbildung 62).

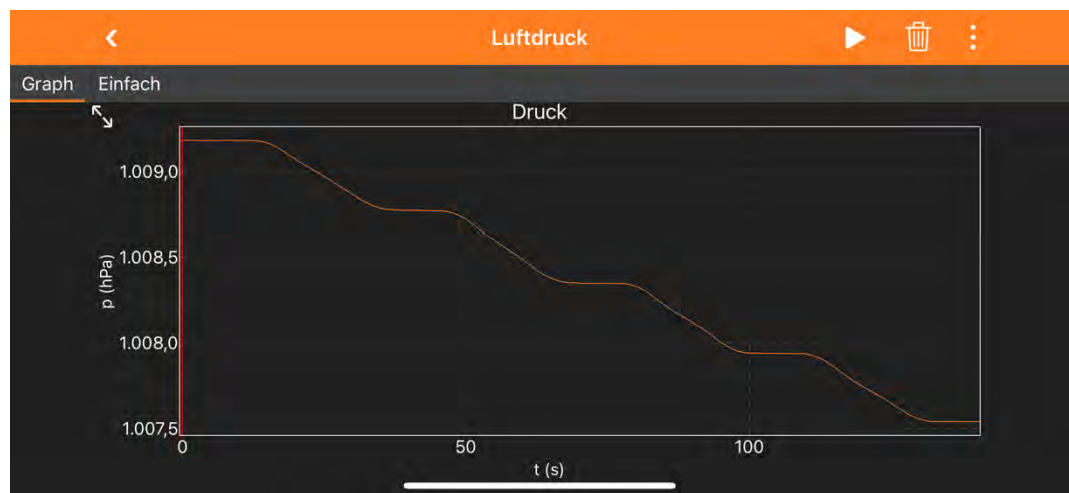
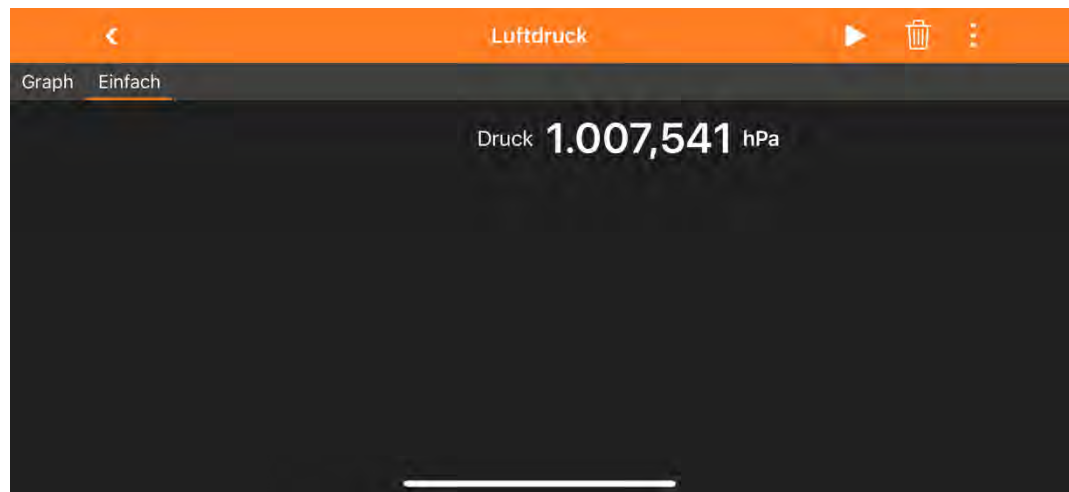


Abbildung 62: einfache, digitale Anzeige des aktuellen Drucks (oben), graphische Anzeige des Druckverlaufs über den gesamten Messzeitraum (unten)

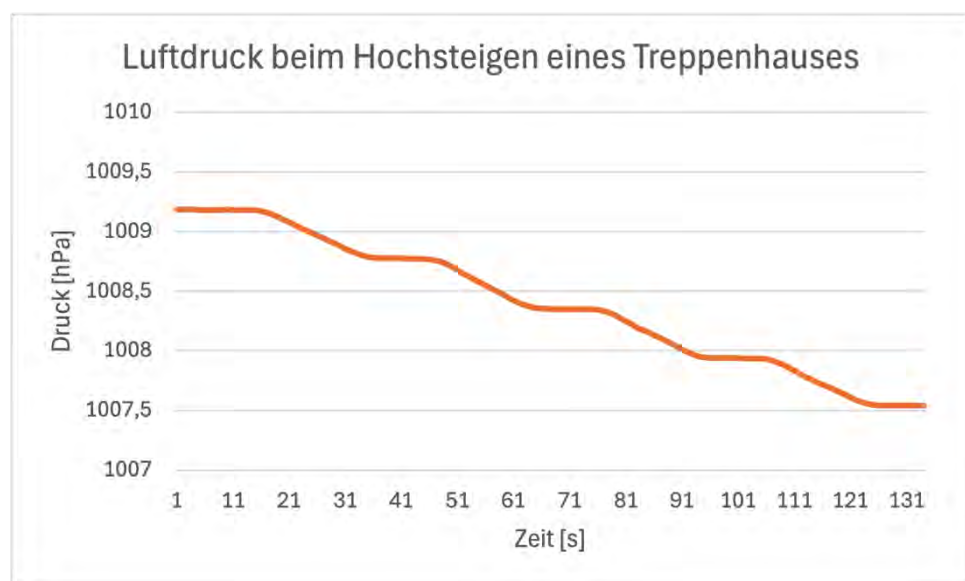


Abbildung 63: selbsterstellte, graphische Anzeige des Druckverlaufs über den gesamten Messzeitraum

Außerdem lassen sich mit *phyphox* die gemessenen Werte als Excel-Daten oder CSV-Datei exportieren. Wird dies gemacht, lässt sich auch selbstständig ein Graph erstellen, der den gesamten Druckverlauf während des Messzeitraums zeigt (siehe Abbildung 63).

In dem Diagramm lässt sich erkennen, dass der Luftdruck mit zunehmendem Ablauf des Experimentes abnimmt. Dies muss allerdings im Plenum interpretiert werden. Denn es ist nicht die vergangene Zeit, die entscheidend für den abnehmenden Luftdruck ist, sondern die Höhe des Treppenhauses, welche bis zum jeweiligen Zeitpunkt bestiegen wurde. Dies lässt sich auch an den Phasen im Experiment bzw. den waagerechten Ausschnitten des Graphen erkennen. Denn zu diesen Zeiträumen befand sich das Messgerät bzw. das Smartphone gerade auf einer Etage und ist die Treppe nicht weiter hochgestiegen. Diese Phasen sind bei der hier durchgeführten Messung absichtlich so lange gehalten wurden, um im Nachhinein die einzelnen Etagen in Höhenmeter umzuwandeln und einen genaueren, quantitativen Zusammenhang zwischen Höhenmetern und Luftdruck zu finden. Dazu wurde ebenfalls das Treppenhaus vermessen. Dies können die Lernenden mit Zollstöcken oder Maßbändern machen. So wurde pro Etage eine Höhe von ca. $3,40\text{ m}$ gemessen (siehe Abbildung 64), was sich bei vier Etagen auf eine Höhe von ca. $13,60\text{ m}$ addiert (siehe Abbildung 64). Vor Durchführung des Experiments sei also mit den Lernenden noch zu besprechen, wie schnell sie die Treppen hochsteigen und ob sie auf einzelnen Etagen pausieren, um später eine einfachere Auswertung zu ermöglichen.

Außerdem lässt sich aus dem Diagramm bei Annahme eines linearen Luftdruckanstiegs bzgl. der Höhe eine Druckdifferenz von $0,4\text{ hPa}$ pro Etage entnehmen. Das würde vereinfacht eine Luftdruckreduktion von ca. $0,118\text{ hPa/m}$ bedeuten. Es ist im Sinne eines Erfolgserlebnisses sinnvoll zu zeigen, dass selbst der Deutsche Wetterdienst eine Abnahme des Luftdrucks „in den untersten Höhenmetern“ (DWD1, o. J.) von ca. 1 hPa pro 8 m angibt. Das würde eine Luftdruckreduktion von ca. $0,125\text{ hPa/m}$ bedeuten und wäre damit sehr nah an dem zuvor selbst gemessenen Wert. An dieser Stelle sollte



Abbildung 64: Höhenvermessung des Treppenhauses insgesamt (oben links) und pro Etage (oben rechts & unten)

den Lernenden durch verlässliche Quellen gezeigt werden, dass der Luftdruck zwar mit zunehmender Höhe sinkt, allerdings nicht linear, sondern viel eher exponentiell (Demtröder, 2021, S. 204). Auf die dazu zu verwendende

Barometrische Höhenformel (siehe Kapitel 4.3) muss nicht explizit in dieser Unterrichtseinheit eingegangen werden, da hierfür bereits Exponentialfunktionen mathematisch bekannt sein sollten. Dennoch lässt sich aus diesem ersten Experiment die Schlussfolgerung ziehen, dass der Luftdruck mit zunehmender Höhe sinkt. Dadurch wird klar, dass der innere Kabinendruck im Falle eines nicht abgedichteten Flugzeugs mit steigender Flughöhe ebenfalls absinkt – und zwar gleichmäßig mit dem äußeren Druck. Für diese Abnahme des Luftdrucks bietet es sich an, eine Graphik zu zeigen, die den tatsächlichen Verlauf des Drucks in Abhängigkeit der Höhe darstellt (siehe Abbildung 65).

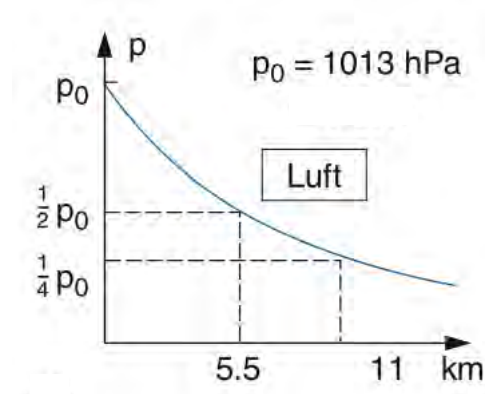


Abbildung 65: Vergleich des Druckverlaufs mit steigender Höhe in der Erdatmosphäre (Demtröder, 2021, S. 204, bearbeitet)

Natürlich gibt noch detailliertere Graphiken mit einer ausführlicheren Achsenbeschriftung. Allerdings bietet sich diese Graphik im Zusammenhang mit dem Fliegen an, da Flugzeuge meistens auf einer Höhe von ca. 11 km fliegen (Arad, 2024). Zu sehen ist also, dass der Druck in Reiseflughöhe auf ca. 20% bis 25% des Normaldrucks auf Meereshöhe fällt. Dies deckt sich auch mit entsprechenden Literaturwerten des Deutschen Wetterdienst von ca. 226.32 hPa (DWD2, o. J.).

Danach stellt sich im Plenum sicherlich die Frage, warum nicht *einfach* der Außendruck auch als innerer Kabinendruck zugelassen werden kann. Dazu sollte in irgendeiner Form die Information an die Lernenden getragen werden,

dass der menschliche Körper bzw. die menschliche Lunge einen gewissen Umgebungsdruck benötigt, um zu atmen. Auch hier bietet sich der Deutsche Wetterdienst als Quelle an (DWD3, 2015):

Erst ab etwa 2500 m über dem Meeresniveau wirkt sich der Sauerstoffmangel spürbar auf den menschlichen Körper aus. Bereits in dieser Höhe kann vor allem bei nicht genügend akklimatisierten Personen die sogenannte akute Höhenkrankheit auftreten. Diese äußert sich beispielsweise durch Kopfweh, Übelkeit und/oder Schwindelgefühle. Oberhalb von etwa 3500 m (ü. NN.) kann es dann richtig gefährlich werden. Die Wahrscheinlichkeit an der Höhenkrankheit zu erkranken, steigt rapide an. Auch die Bildung von Ödemen in Lunge oder Gehirn sind möglich, was im schlimmsten Fall tödlich ausgehen kann. [...] Doch oberhalb von etwa 7000 m (ü. NN.) würde selbst die beste Akklimatisation nichts mehr bringen, denn ab dieser Höhe kann der Körper den eigenen Sauerstoffbedarf kaum mehr decken, sodass er unweigerlich abbaut, was letztendlich für die meisten Menschen den sicheren Tod zur Folge hätte. Man spricht deshalb in diesen Höhen auch von der sogenannten Todeszone.

Um also bequem und sicher fliegen zu können, sollte der innere Kabinendruck maximal auf den Druck sinken, der in ca. 2500 m Höhe herrscht. Um noch sicherer zu gehen, wird der Kabinendruck meistens nur auf einen Druck reduziert, der einem Höhenäquivalent von ca. 1800 m bis 2000 m entspricht (Professional Aviation Academy, o. J.). Dies sind dann ca. 75 % bis 80 % des ursprünglichen Luftdrucks auf Meereshöhe. Nun sollte den Lernenden also klar sein, dass der äußere Druck mit der zunehmenden Höhe des Flugzeugs sinkt, während der Kabinendruck aber am besten – im Sinne des Menschen – beim Normaldruck auf Meereshöhe bleiben sollte. Es ist jetzt aber immer noch nicht klar, warum der Kabinendruck überhaupt (auf ca. 75 % bis 80 % des Normaldrucks) abgesenkt wird. Dazu folgt nun das zweite Experiment, welches neben den bisher betonten menschlichen Bedürfnissen eine technische Komponente hervorhebt.

Dieses zweite Experiment soll also zeigen, warum der innere Kabinendruck nicht bei dem für den Menschen am angenehmsten Normaldruck bleibt. Dazu soll veranschaulicht werden, dass ein zu hoher Druckunterschied zwischen Kabine und Außenwelt zur Zerstörung von Flugzeugteilen bzw. Rissen und Löchern im Rumpf des Flugzeugs führen kann. Natürlich können die

Druckverhältnisse in 11 km Höhe natürlich nicht exakt im Physikraum nachgestellt werden. Daher werden modellhaft eine noch verschlossene Chipstüte (als abgedichtetes Flugzeug) und eine Vakuum-Glocke (als Niederdruck-Umgebung) verwendet. Die Vakuum-Glocke wird mittels einer Pumpe allmählich leer gesaugt, sodass die Luftteilchen in der Vakuum-Glocke immer weniger werden und der Druck sinkt.



Abbildung 66: Aufbau des Experiments zum Modellieren einer Hochdruck-Flugzeugkabine und einer Niederdruck-Umgebung

Auf die Details der Pumpe, des Netzanschlusses und des Schlauchs wird in dieser Arbeit nicht eingegangen, da hierauf nicht der Fokus liegt. Dennoch werden einige Fotos zum Aufbau des Experiments gezeigt, um eine Vorstellung für den Aufwand des Experiments zu bekommen (siehe Abbildung 66).



Abbildung 67: Ablauf des Experiments zum Modellieren einer Hochdruck-Flugzeugkabine und einer Niederdruck-Umgebung (Frontperspektive)

Nun wird eine noch geschlossene und damit abgedichtete, kleine Chipstüte in die Vakuum-Glocke gelegt. Die Pumpe wird angeschaltet und die Chipstüte beobachtet. Dieses Experiment soll vergleichbar mit einem abgedichteten

Flugzeug sein, das bzgl. seiner Flughöhe steigt und irgendwann die Reiseflughöhe erreicht. Die Chipstüte kann ihren Innendruck aber nicht beliebig anpassen, sodass bereits nach kurzer Zeit der Druckunterschied zwischen Innendruck in der Chipstüte und Umgebungsdruck in der Vakuum-Glocke so groß wird, dass die Chipstüte reißt und ein Loch aufweist. Dieser Prozess ist in mehreren Screenshots aus zwei Slow-Motion-Videos mit geänderter Perspektive zu sehen (siehe Abbildung 67 und Abbildung 68).



Abbildung 68: Ablauf des Experiments zum Modellieren einer Hochdruck-Flugzeugkabine und einer Niedrigdruck-Umgebung (Vogelperspektive)

Dieses Modell lässt sich nur bedingt auf die Realität eines Flugzeugs übertragen. Das ist ein natürlicher Nachteil eines Modells. Genau dies kann und sollte an geeigneter Stelle auch im Unterricht diskutiert werden. So kann beispielsweise der Unterschied in der Materialstabilität und -robustheit zwischen einer Chipstüte aus dünnem Plastik und einem aus verschiedenen Metallen bestehenden Flugzeug benannt werden. Dennoch zeigt dieses Experiment, dass jedes Material seine Belastungsgrenzen hat und der Druckunterschied zwischen innerem Kabinendruck und äußerem Umgebungsdruck ab einer gewissen Höhe zu groß wird. Damit ist den Lernenden nun klar, dass der innere Kabinendruck auf Reiseflughöhe dem in ca. 1.800 m bis 2.000 m Höhe entspricht und dies einen Kompromiss zwischen menschlichen Leistungsgrenzen und technischen Materialgrenzen darstellt.

Sollte ein kleines, mobiles Barometer zur Verfügung stehen, das neben der Chipstüte auch noch in die Vakuum-Glocke passt, kann bei diesem Experiment sogar quantitativ gearbeitet werden und ein Diagramm des Druckverlaufs während des Herauspumpens der Luft erstellt werden. So kann der genaue Druck abgelesen werden, bei welchem die Chipstüte platzt.

5.3.3 Folgender Unterricht & Kritischer Rückblick

Nach der Durchführung und Interpretation der beiden vorgestellten Experimente bietet sich ein kritischer Rückblick auch im Klassenverbund an. Dazu sollte sich zuerst an Modellkritik geübt werden (Hopf, Schecker, Höttecke & Wiesner, 2022, S. 12). Es lassen sich in diesem Sinne Fragen stellen wie: *Inwiefern entspricht eine abgedichtete Chipstüte einem abgedichteten Flugzeug? Welche Eigenschaften lassen sich vom Modell auf die Realität übertragen und welche nicht? Ändern diese Überlegungen nun die Interpretation unserer experimentellen Ergebnisse?* Im Zuge dessen könnte auf die unterschiedliche Stabilität von Chipstüte aus Plastik und Flugzeugrumpf aus Aluminium eingegangen werden. Außerdem könnte auf die absoluten, aber auch relativen, Werte der Drücke in der Vakuum-Glocke aber auch in ca. 11 km Höhe eingegangen werden.

Außerdem stellen sich weitere inhaltliche Fragen, welche in den anschließenden Unterrichtsstunden bearbeitet werden können. Zum einen kann die Frage aufgegriffen werden, warum Flugzeuge nicht einfach niedriger fliegen als in ca. 11 *km* Höhe? Dies würde angesichts eines niedrigeren Druckunterschieds zwischen innerem Kabinendruck und äußerem Umgebungsdruck Sinn machen. Zumal der Mensch auf niedrigeren Höhen – wie bereits beschrieben – besser atmen kann. Auf die Antworten zu solchen Fragen soll in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden. Eine andere Frage könnte sein, welche anderen gesundheitlichen Gefahren drohen, wenn der Mensch sich in Höhen begibt, die einen bedrohlich niedrigeren Luftdruck haben. Das Phänomen von „Druck auf den Ohren“ kann durchaus auch im schlimmeren Fall als stechender Schmerz wahrgenommen werden (Trappe, 2024). Auch dies sollte gesagt sein, sodass der Physikunterricht fächerübergreifend z.B. mit dem Biologieunterricht verbunden werden kann. Dies sollte für zeitgemäßen Physikunterricht auch gelten (Kirchner, Girwidz & Fischer, 2020, S. 14).

Im kritischen Rückblick lässt sich im Zuge dieses verkürzten Kapitels 5.3 nur auf die Experimente eingehen, da kein zugehöriger detaillierter Unterricht konzipiert wurde. Daher lässt sich in der Organisation der Experimente eine Alternative beschreiben. Die beiden Experimente können auch in der umgekehrten Reihenfolge im Unterricht durchgeführt werden. Das bedeutet konkret, dass sich zunächst die Frage ergibt, warum im Flugzeug auf Reiseflughöhe nicht *einfach* der Normaldruck vom Meeresniveau beibehalten wird. Dafür ist die Information, dass dies für den Menschen teilweise überlebenswichtig ist, zuvor nicht mal notwendig. Denn es würde bei einem abgedichteten Flugzeugrumpf ohnehin dazu kommen, dass der Kabinendruck konstant bleibt – unabhängig von der Flughöhe. Dennoch kann die Information dieser menschlichen Belastungsgrenzen bestätigend genannt werden. An dieser Stelle sei bereits gesagt, dass der Unterricht und speziell auch die Reihenfolge der Experimente von den Fragestellungen abhängt, die die Lernenden als erstes ins Feld führen. Dementsprechend ist der Unterricht um die Experimente auch eher als schülerorientiert zu verstehen, da das Finden von Fragestellungen und Thesen als Prozessziel von Unterricht verstanden

werden kann und dies schülerorientierten Unterricht charakterisiert (Kirchner, Girwidz & Fischer, 2020, S. 93-94). Ist nun die Idee eines immer konstant bleibenden inneren Kabinendrucks vorliegend, kann das Experiment mit der Chipstüte in der Vakuum-Glocke durchgeführt werden. Danach ist klar, dass der Kabinendruck reduziert werden muss, sobald das Flugzeug steigt. Dabei sollte bereits bekannt sein, dass die Luft in hohen Lagen dünner wird. Ist dies nicht der Fall – nicht einmal als ungenaues Allgemeinwissen – muss idealerweise vorher das andere Experiment mit dem Messen des Drucks in unterschiedlichen Höhen des Treppenhauses durchgeführt werden, um dann auf den abnehmenden Luftdruck bei steigender Höhe schließen zu können. Dazu sollte auch hier eine Graphik mit dem tatsächlich nicht linearen Luftdruckabfall mit steigender Höhe gezeigt werden. Sollte dieses Wissen bereits vorhanden sein, bietet sich die Frage an, warum der innere Kabinendruck nicht *einfach* dem äußeren niedrigeren Druck angepasst wird. Spätestens hier kommt dann die Information über die menschlichen Belastungsgrenzen zum Tragen. Diese vielen „Wenn“ und „Aber“ zeigen, dass es auf das Vorwissen der Lernenden ankommt und die Experimente teilweise ausgelassen oder in einer anderen Reihenfolge durchgeführt werden können. Dass das Vorwissen der Lernenden relevant ist und auch zu Fehlvorstellungen oder falschen Interpretationen von bzw. Beobachtungen aus Experimenten führen kann, ist hinlänglich bekannt (Hopf, Schecker, Höttecke & Wiesner, 2022, S. 32).

5.4 Fensterform

Auch in diesem Kapitel 5.4 werden hauptsächlich nur *Experimente* vorgestellt, die dann Rückschlüsse auf mehr oder weniger geeignete Fensterformen für Flugzeuge zulassen. Dementsprechend werden keine umfangreichen Unterrichtsentwürfe erstellt, sondern nur die Experimente mit Bildern, Auswertungen und Tipps zur Durchführung dargestellt. Zuvor wird wieder eine Einordnung darin gegeben, welche Inhalte und Schritte vor der Durchführung der Experimente sinnvoll oder notwendig sind. Anschließend sollen auch Ideen für den auf die Experimente folgenden Unterricht gegeben werden sowie

ein kritischer Rückblick auf die Experimente geworfen werden. So können Alternativen diskutiert werden. Dieses damit im Vergleich wieder kürzere Kapitel soll der lesenden Lehrkraft mehr Freiheit in der konkreten Unterrichtsgestaltung um die Experimente herum geben.

5.4.1 Bisheriger Unterricht

Die im Folgenden vorgestellten Experimente können beispielsweise in Zusammenhang mit dem physikalischen Druck unterrichtet werden. Dazu ist es sinnvoll und notwendig, dass die Lernenden bereits wissen, was Kräfte sind und worin der Unterschied zum Druck besteht – gerade in Bezug auf Feststoffe. Dies ist wichtig, damit die Lernenden verstehen, dass es durch verschiedene Druckauflageflächen zu einer unterschiedlichen Farbgebung im Plexiglas kommen kann, obwohl mit gleicher Kraft auf das Plexiglas eingewirkt wurde. Dabei ist also auch die Form des Plexiglases entscheidend. Ebenfalls ist es sinnvoll dieses Experiment nicht zu Beginn einer möglichen Unterrichtsreihe zum Druck durchzuführen, sondern wenn bereits klar ist, dass hohe Druckunterschiede zu Materialermüdung bzw. zu Materialschäden führen können (siehe Kapitel 5.3).

Im Zuge der Optik sollten diese Experimente nur verwendet werden, wenn den Lernenden bereits elektromagnetische Wellen samt ihrer E -, B - und Ausbreitungsrichtungs-Komponenten bekannt sind. Dies ist die Grundlage dafür, Polarisierung und ihre verschiedenen Arten bzw. Richtungen verstehen zu können. Eventuell ist es bereits vor den Experimenten rätlich, zu wissen, dass Materie die Polarisierung von Licht ändern kann. Dies kann allerdings auch als ein Lerneffekt aus den hier vorgestellten Experimenten gezogen werden.

Wird nun auch noch die inhaltliche Komponente der Festkörperphysik mit eingeplant, sollten die Lernenden bereits wissen, welche verschiedenen Teilchen-Größenebenen es gibt (z.B. Moleküle oder Atome). Dann ist es sinnvoll, Gitterstrukturen aber eben auch amorphe Strukturen zu kennen. Sowohl in Verbindung zur Optik als auch in Verbindung zur Festkörperphysik ist es notwendig, Farben und ihren Zusammenhang zu verschiedenen

Wellenlängen zu kennen. Optische Phänomene, welche in Interaktion mit Materie funktionieren, bieten eine fachliche und kompetenzorientierte Grundlage für die Lernenden, bevor sich mit den hier vorgestellten Experimenten beschäftigt wird. Dazu zählt z.B. die Bragg-Reflexion, welche einen Zusammenhang zwischen Wellenlänge, Licht-Farbe, Gitterstruktur und Atomen bzw. Molekülen bietet. Diese inhaltlichen und rechnerischen Erfahrungen dienen den Lernenden hier als Grundgerüst, um auch die Interaktion des polarisierten Lichts mit Plexiglas ausreichend zu verstehen.

5.4.2 Experimente & Begründung

Den Unterrichtseinheiten, welche im Rahmen der hier vorgestellten Experimenten durchgeführt werden, sollte das didaktische Zentrum zu Grunde liegen, durch die Sichtbarmachung möglicher Bruchstellen mittels Polarisationsfolien und durchscheinendem Licht unterschiedliche Fenster- bzw. Fensterrahmenformen bezüglich ihrer Stabilität bei starken Krafteinwirkungen bzw. Druckunterschieden bewerten zu können. Dazu dürfen auch verschiedene Formen gebrochen werden und damit (geplant) kaputt gehen, um tatsächlich zu zeigen, dass runde Fenster bzw. Fensterrahmen stabiler gegenüber Verzerrungen und Biegungen sind. Dies ist im Rahmen der im folgenden gezeigten Aufnahmen des Experiments auch passiert und unterstützt damit die Behauptung. Außerdem erzeugt dies nachhaltige und erinnerungswürdige Eindrücke bei den Lernenden (Kirchner, Girwidz & Fischer, 2020, S. 270).

Wie bereits in Kapitel 4.4 beschrieben, werden zum Sichtbarmachen derjenigen Stellen im Material, die besonders bruchanfällig sind, zwei Polarisationsfolien benötigt, die für möglichst optimale und damit sichtbare Ergebnisse sorgen, wenn sie bezüglich ihrer Gitterstäbe um 90° zueinander gedreht sind (siehe Abbildung 69). Dafür gibt es allerdings verschiedene Aufbauten. So gibt es beispielsweise Sets zum Zusammenstecken (siehe Abbildung 69, links) oder vorgefertigte und bereits zusammengebaute Klappen mit Schraubpresse (siehe Abbildung 69, rechts).



Abbildung 69: Aufbau der zwei Polarisationsfolien inkl. Bereich zum Einklemmen von Untersuchungsmaterialien dazwischen, Set zum Zusammenstecken (links), bereits fertige Klappe mit Schraubpresse (rechts)

Nun werden für den Zwischenraum zwischen den beiden Polarisationsfolien noch verschieden geformte und durchsichtige Plexigläser oder Hartgummis benötigt. Dabei ist die Materialwahl entscheidend, da es ein durchsichtiges Material sein sollte, um Licht bei seinem Weg durch das Material anders polarisieren zu können als es zuvor der Fall war. Nur dann lassen sich verschiedene Verfärbungen erkennen und Rückschlüsse auf die Stabilität ziehen. Außerdem sollte das Material ausreichend hart sein, um bei unterschiedlich starkem Druck in der Schraubpresse nicht zu schnell nachzugeben. Gleichzeitig lässt sich beispielsweise das im folgenden verwendete Plexiglas bei Belastung nur mittels der „Farben“ schwarz und weiß in seiner Stabilität unterscheiden (siehe Abbildung 70, rechts), während das im folgenden verwendete Hartgummi alle möglichen Farben des Farbspektrums bei Belastung zeigt (siehe Abbildung 70, links).

Zur Untersuchung stehen nun verschiedene Formen (vor allem) aus Plexiglas bereit, die nach Auftrag eigens für diese Aufnahmen angefertigt wurden. Da der physikalische Sachverhalt sich auf verschiedene Fensterformen bezieht und hinterfragen soll, warum Fenster in Flugzeugen eher rund als eckig sind, werden sowohl runde als auch eckige Formen verwendet. Außerdem werden Formen mit Loch in der Mitte und ausgefüllte Formen verwendet, um auch auf den Unterschied zwischen Fensterrahmen und Fenster eingehen zu können. Zuletzt werden auch unterschiedliche Dicken von Fensterrahmen

ausgetestet. In Abbildung 71 sind die hauptsächlich untersuchten acht Formen dargestellt. Eventuell fällt beim Betrachten der Abbildung bereits auf, dass das dünne rechtwinklige Plexiglas an seiner Ecke gebrochen ist. Das liegt daran, dass diese Aufnahme erst nach der Durchführung der Experimente entstanden ist. Zum Brechen speziell dieser Ecke folgt noch eine Erläuterung.

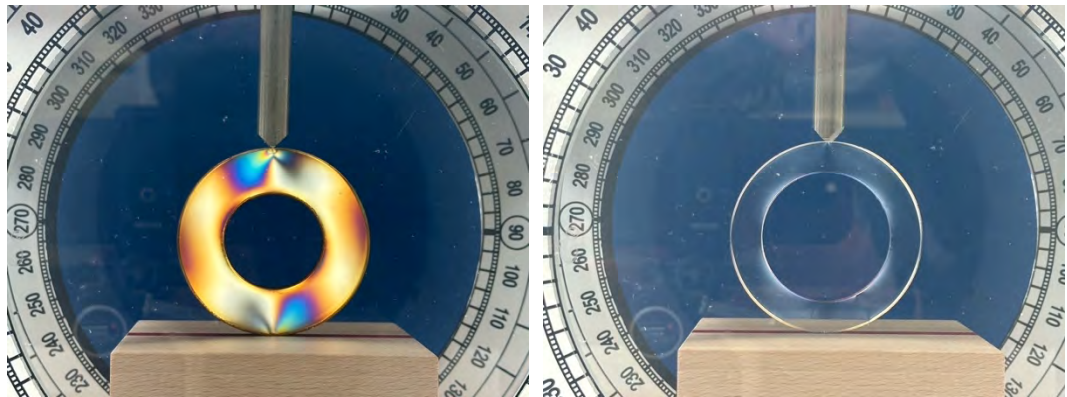


Abbildung 70: rundes Hartgummi mit Loch in der Mitte unter punktueller Krafteinwirkung (links), rundes Plexiglas mit Loch in der Mitte unter punktueller Krafteinwirkung (rechts)

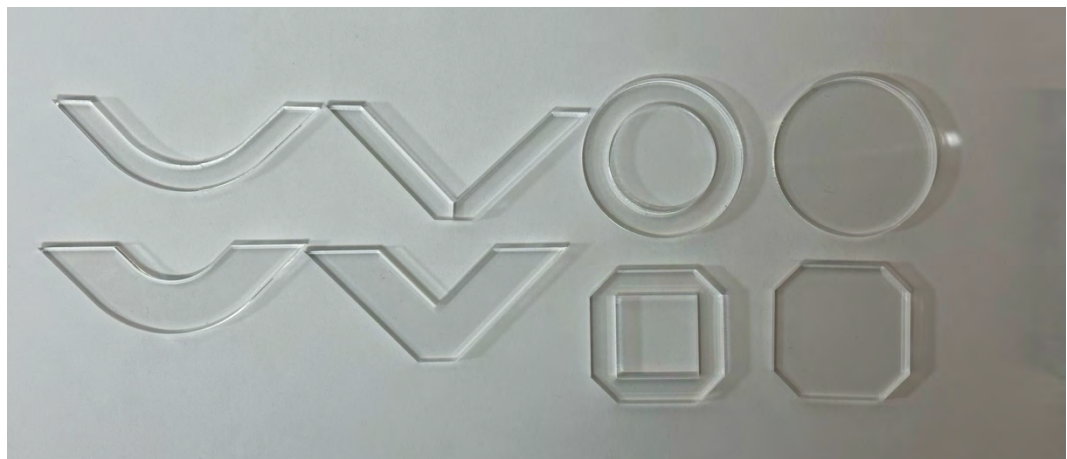


Abbildung 71: acht unterschiedliche Formen aus Plexiglas für die Stabilitätsuntersuchung

Während im Set zum Zusammenstecken nur eine punktuelle und individuell ausgeführte Belastung möglich ist (siehe Abbildung 72), ist in der Klappe mit Schraubpresse eine gleichmäßigere und kontrollierte Belastung auf das zu untersuchende Stück möglich (siehe Abbildung 72).

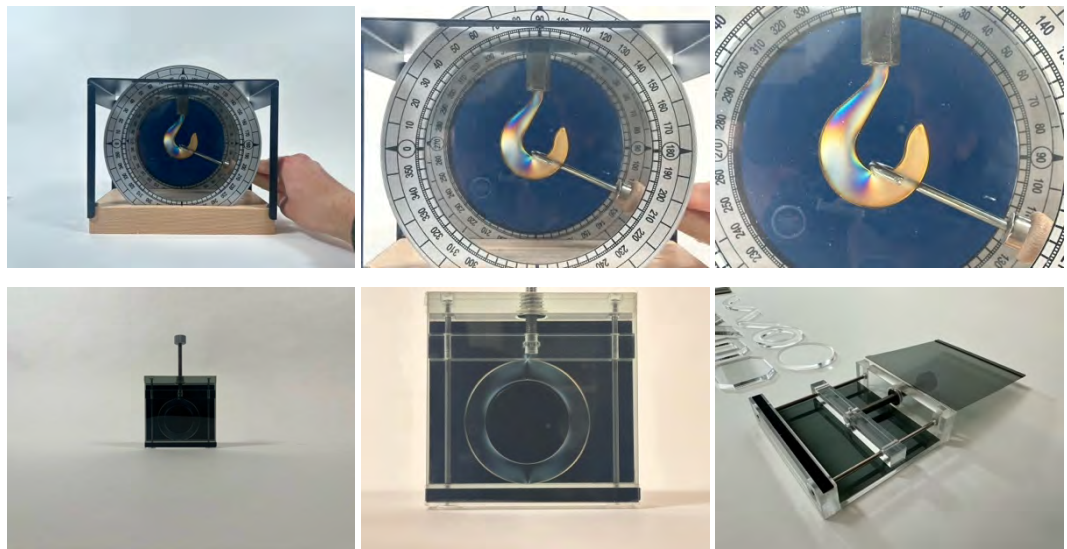


Abbildung 72: individuellere Belastungsmöglichkeiten im Set (oben), kontrolliertere Belastungsmöglichkeiten in der Klappe (unten)

Um den Unterschied zwischen unbelastetem und belastetem Hartgummi zu verdeutlichen, wird der Hartgummi-Kreis einmal ohne und einmal mit Belastung dargestellt (siehe Abbildung 73). Dadurch ist der in Kapitel 4.4 erläuterte physikalische Hintergrund sichtbar und es werden auch die Stellen besonders deutlich, an denen der Hartgummi-Kreis stärker belastet wird. Dies ist an der Berührungsfläche mit dem von oben eingeführten Stab und an der Berührungsfläche mit dem Holzboden darunter besonders der Fall, da dort die Kräfte auf den Hartgummi-Kreis einwirken. Dort sind auch die meisten Farben auf kleinster Fläche zu sehen, was für eine große Spannung im Material spricht. Deutlich zu erkennen ist auch, wie alle Farben in der Nähe der beiden Berührungsflächen sich zu den Berührungsflächen hin zuspitzen.

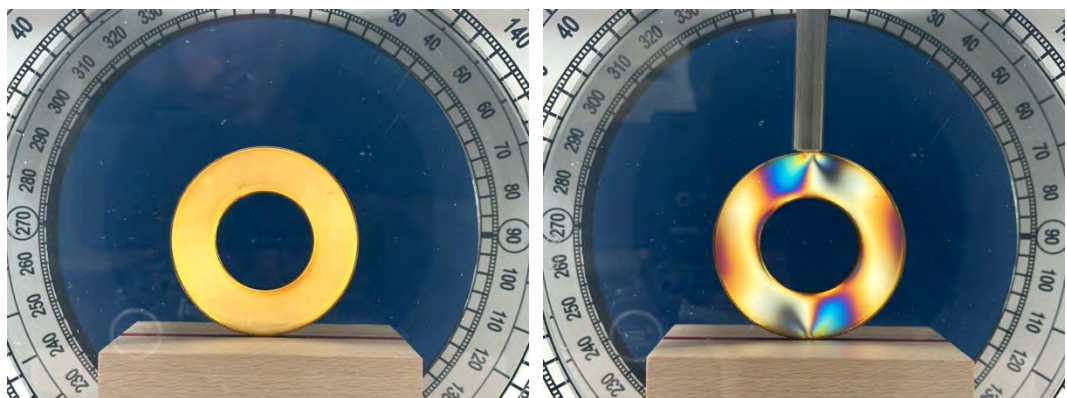


Abbildung 73: Hartgummi-Kreis frei von Belastung (links) und unter Belastung (rechts)

Nun soll ein Vergleich zwischen Hartgummi und Plexiglas verdeutlicht werden (siehe Abbildung 74). Während beim Hartgummi Farben zu sehen sind, lässt sich beim Plexiglas eine an einigen Stellen weißliche Färbung erkennen. Ähnlich wie bei den Farben beim Hartgummi sind auch die weißlichen Stellen beim Plexiglas unter Belastung. Auffallend ist, dass bei Auswahl eines anderen und härteren Materials (Plexiglas statt Hartgummi) unter einer ähnlich starken Belastung weniger „Farben“ bzw. Verfärbungen (auch weißliche) zu erkennen sind. Allerdings lässt sich bereits an dieser Stelle feststellen, dass – bis auf die punktuellen Berührungsflächen – eine größtenteils gleichmäßige Verteilung der Belastung entlang der inneren (und äußeren) Kreislinie sichtbar wird. Dieser Unterschied wird im Folgenden beim Vergleich mit anderen Formen noch deutlicher.

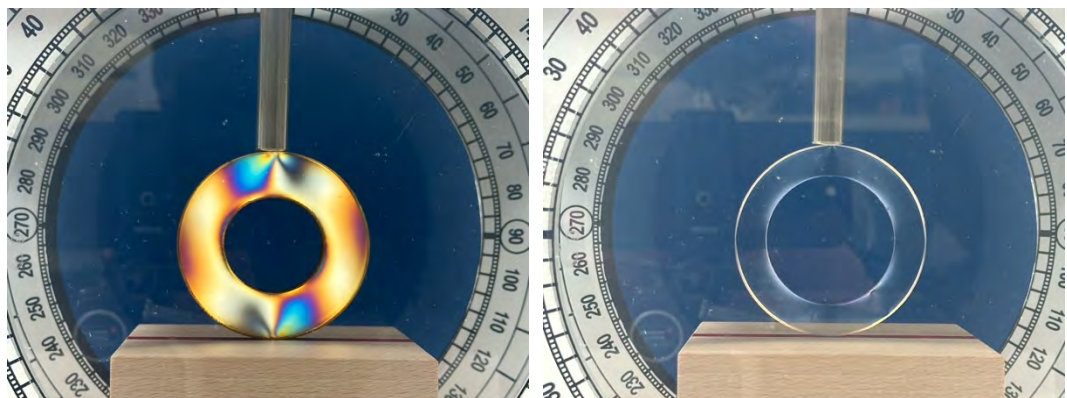


Abbildung 74: Hartgummi-Kreis unter Belastung (links), Plexiglas-Kreis unter Belastung (rechts)

Beim ersten Vergleich zwischen rundem und eckigem Plexiglas (jeweils mit Loch in der Mitte) fällt bei beiden Experimentiermethoden auf, dass besonders die Ecken des quadratischen Rahmens deutlich weiß gefärbt sind und damit anfällig als Bruchstellen sind (siehe Abbildung 75). Weitergehend lässt sich festhalten, dass eine auf eine größere Fläche verteilte Belastung weniger weiße Flächen „produziert“. Dies lässt sich im Sinne des physikalischen Drucks als Kraft auf eine bestimmte Fläche vergegenwärtigen. Damit zeigt sich, dass diese Experimente thematisch vielseitig einsetzbar sind und

dementsprechend in verschiedenen Klassenstufen eingebaut werden können. Wie bereits in dieser Arbeit erwähnt, lassen sich diese Experimente im Zuge des physikalischen Drucks, der Optik oder der Festkörperphysik verwenden – auch wenn sie bisher nicht explizit in den Kerncurricula angesprochen werden (siehe Kapitel 4.4).

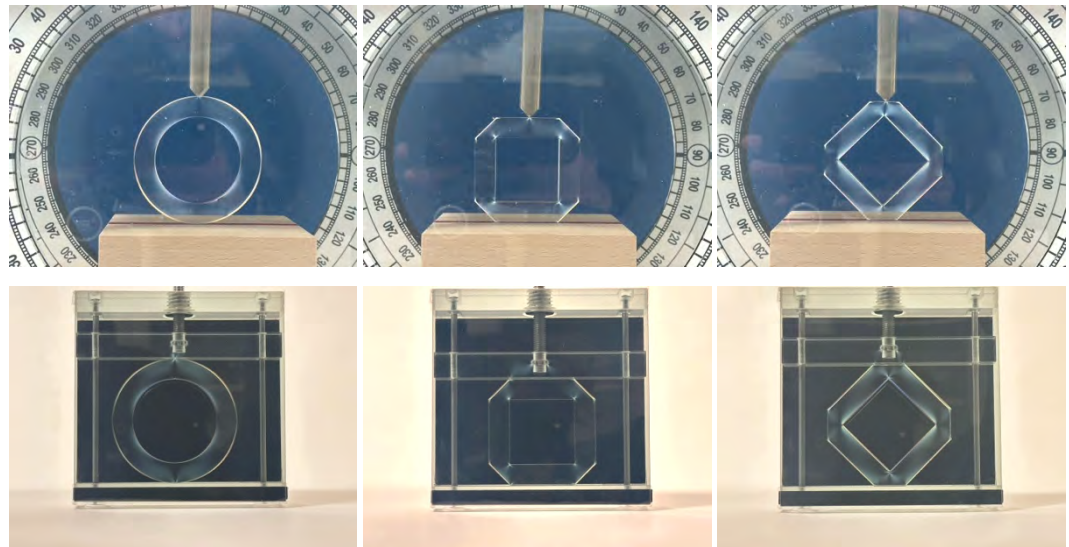


Abbildung 75: Kreis und Quadrat in zwei Positionierungen im Set (oben) und in der Klappe (unten)

Während sich für Fensterrahmen also eher runde Formen eignen und weniger eckige, ist das Interpretieren der Aufnahmen zu den ausgefüllten Kreisen und Quadraten aus Plexiglas schwieriger. Diese könnten als Fensterscheiben interpretiert werden, wobei allerdings gesagt werden muss, dass auf Fensterscheiben nicht nur Kräfte entlang der Scheibenfläche wirken – wie hier experimentell überprüft – sondern vor allem senkrecht zur Scheibenfläche, da ein hoher Druckunterschied ausgehalten werden muss (siehe Kapitel 4.3 und 5.3). Dementsprechend lassen sich aus den Aufnahmen aus Abbildung 76 nicht allzu viele Schlüsse ziehen. Allerdings sind runde Fensterscheiben als Folge von runden Fensterrahmen nur logisch.

Die Untersuchung der Experimentierreihe, welche – wie bereits erwähnt – zu dem gebrochenen Eckstück führte, zeigt, dass bei in etwa gleich starker Krafteinwirkung auf einen eckigen Fensterrahmen dieser schneller bricht als

ein runder Fensterrahmen. Abbildung 77 stellt dies dar. Die beiden Aufnahmen links und mittig entsprechen den beiden in Auftrag gegebenen Plexigläsern aus Abbildung 71. Die dritte Aufnahme rechts beinhaltet ein Eckstück, welches bereits aus vorherigen Untersuchungen anderer Studierender stammt. Somit ist in dieser Arbeit auch ein dokumentierter Vergleich zwischen eckigem und rundem Rahmen möglich. Dabei fällt auf, dass die weißlichen Stellen im runden Rahmen viel gleichmäßiger über das Plexiglas verteilt sind, während sich ein zugespitzter weißlicher Verlauf auf die Ecke des eckigen Rahmens hin deutlich macht. Die Ecke ist demnach viel mehr belastet. Auch diese beiden Untersuchungen der Experimentierreihe unterstreichen den Gebrauch von runden Fensterrahmen in Flugzeugen. Es müssen nicht beide Untersuchungsreihen aus Abbildung 75 und 77 im Unterricht durchgeführt werden, da sie zu dem gleichen Ergebnis kommen. Außerdem liegen womöglich nicht alle Materialien und Formen vor. Es empfiehlt sich aber solche Formen einmal für die schuleigene Sammlung zu beschaffen.

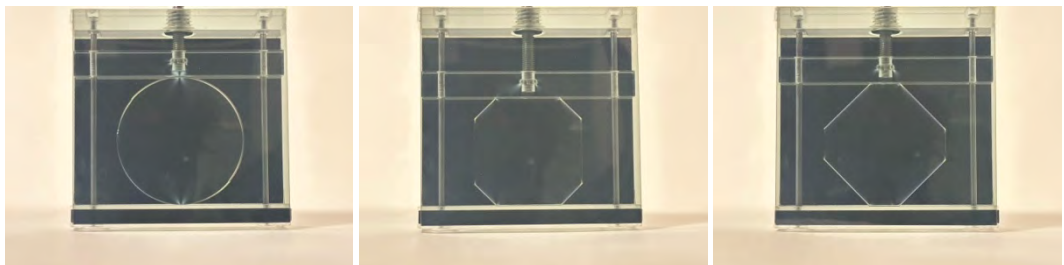


Abbildung 76: Kreis und Quadrat in zwei Positionierungen in der Klappe

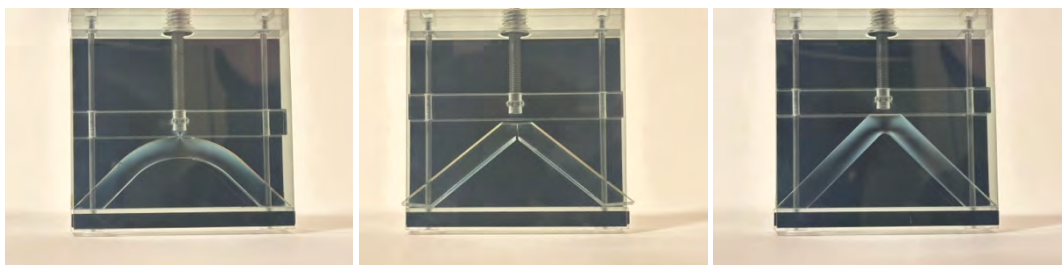


Abbildung 77: dünne Rahmen in der Klappe: rund (links), eckig (mittig), eckig mit runder Unterstützung (rechts)

Beim Vergleich der Abbildung 77 mit Abbildung 78 werden auch nochmals die Vorteile von dickeren Fensterrahmen klar. Es finden sich bei ähnlich starker Belastung auf die dickeren eckigen und runden Rahmen weniger weiße Stellen als bei Belastung auf die jeweiligen dünneren Rahmen. Bei den dickeren Rahmen lassen sich wieder punktuelle weiße Stellen erahnen. Diese sind z.B. beim eckigen Rahmen die innere Ecke selbst und beim runden Rahmen die Berührungsfläche mit der Schraubpresse. Hier bietet es sich an, auch andere Aspekte der Flugzeugfertigung bzw. allgemein Produktentwicklung zu berücksichtigen. So könnte im Unterricht angesprochen werden, dass Unternehmen auch wirtschaftlich handeln wollen und somit Material (z.B. Fensterrahmen) sparen wollen oder ein leichteres und damit sparsameres und umweltfreundlicheres Flugzeug herstellen wollen. Dies könnte also eine unternehmerische Beschränkung sein, warum nicht breitere Fensterrahmen verwendet werden. Diese verschiedenen und teilweise interdisziplinären Erklärungsglieder fügen sich dann zu einem nachvollziehbaren Erklärungsmuster zusammen (Kirchner, Girwidz & Fischer, 2020, S. 159-160).

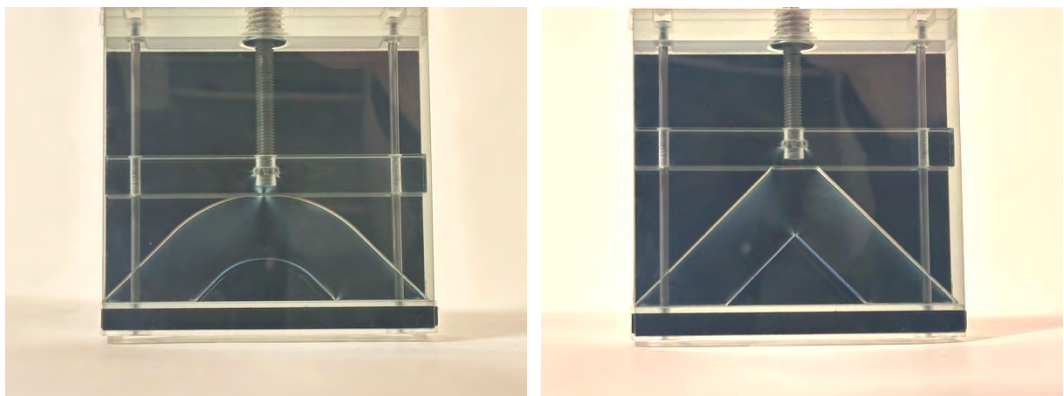


Abbildung 78: dickere Rahmen in der Klappe: rund (links), eckig (rechts)

Die Durchführung dieser Experimentierreihe kann nur wenige Minuten dauern, während sehr viele verschiedene physikalische Themen dahinterstecken. Das macht das Experiment zu einem zwar vielseitig einsetzbaren, aber auch zu einem, um welches die Unterrichtsplanung drum herum viel entscheidender ist. So bietet sich dieses Experiment zunächst einmal nur als

Demonstrationsexperiment an, weil es vermutlich nicht ausreichend Materialien für alle Lernenden gibt. Also kommt den Lernenden eine beobachtende Rolle zu (Kirchner, Girwidz & Fischer, 2020, S. 271). Das Experiment bietet sich außerdem nicht als Einführungsexperiment in ein größeres neues Thema an, aber als Erarbeitungsversuch in einer einzelnen Unterrichtsstunde bzw. -einheit, in der durchdachte Theorie und experimentelle Praxis zusammengebracht werden sollen (Kirchner, Girwidz & Fischer, 2020, S. 272), z.B. zur Frage der Auswirkungen großer Druckunterschiede und wie die Fliegerei daraus gelernt hat.

Da die in diesem Kapitel erläuterte Experimentierreihe derartig vielseitig einsetzbar ist und gleichzeitig so einfach durchzuführen ist, lassen sich kaum weitere Tipps und didaktische Überlegungen an dieser Stelle formulieren.

5.4.3 Folgender Unterricht & Kritischer Rückblick

Je nach gewähltem physikalischem Sachzusammenhang lassen sich unterschiedliche Folgestunden entwerfen.

Sollte das Experiment im Zusammenhang mit dem physikalischen Druck durchgeführt worden sein, kann sich z.B. mit dem Zusammenhang zwischen weißlichen Stellen im Plexiglas unter Belastung und der Größe der Berührungsfläche zwischen Plexiglas und Schraubpresse auseinandergesetzt werden. Alternativ können weitere Experimentierreihen durchgeführt werden, welche Krafteinwirkungen senkrecht zur Plexiglasfläche untersuchen, um auch diesen Faktor bei Flugzeugfenstern zu berücksichtigen.

Fiel die inhaltliche Wahl zum Experiment auf die Optik, sollte sich umfassend mit den Polarisationsfolien und ihrer Funktionsweise auseinandergesetzt werden. Wie bereits in Kapitel 4.4 gesehen, kann dies sowohl qualitativ (z.B. Zeichnungen zu E - und B -Vektor einer elektromagnetischen Welle) als auch quantitativ (z.B. genauere Berechnung der Richtung des E -Vektors mittels trigonometrischer Funktionen) geschehen. Dieser inhaltliche (optische) Anteil des Experiments ist im Vergleich zum Thema des Drucks umfangreicher,

wodurch dieses Experiment nur einen kleinen Teil einer möglichen und komplexeren Unterrichtseinheit/-reihe darstellt.

Sollte sich im Zuge des vorgestellten Experiments für den inhaltlichen Mantel der Festkörperphysik entschieden worden sein, wird der folgende bzw. umliegende Unterricht ebenfalls umfangreicher, da die Struktur von Kristallen oder amorphen Strukturen wie Plexiglas verstanden werden muss. Dazu muss Wissen zu Molekülen und Gittern erlangt werden. Außerdem wird erst in Zusammenhang mit den optischen Komponenten (z.B. Polarisierung, Brechung und unterschiedliche Wellenlängen) klar, warum tatsächlich verschiedene Farben bzw. schwarz/weiß Töne bei Belastung des Hartgummis bzw. Plexiglasses zu sehen sind. In diesem Fall ist es sinnvoll sich mit den benannten Interaktionen zwischen Licht und Materie weiter zu befassen.

Auffällig in Kapitel 4.4 und 5.4 ist, dass zum Verständnis bzw. zur Interpretation der Ergebnisse der Experimentierreihe keine quantitativen Erfassungen während des Experiments notwendig sind. Genauso werden keine quantitativen Berechnungen in der Auswertung des Experiments benötigt. Dies kann ein Vorteil sein, um fehlende mathematische Kenntnisse der Lernenden (z.B. zu trigonometrischen Funktionen) zu umgehen. Es kann aber auch als Nachteil dieser hier vorgestellten Experimentierreihe gesehen werden, da es keine genauen wissenschaftlichen Arbeitsweisen lehrt, zu denen das mathematische Beschreiben hinzugehört (Hopf, Schecker, Höttecke & Wiesner, 2022, S. 18).

Außerdem werden durch die hier vorgestellten Demonstrationsexperimente, welche in ihrer Spezialität bzgl. der benötigten Materialien und Geräte auch wenig Planung durch die Lernenden zulassen, nicht viele experimentelle Fähigkeiten trainiert. Dies lässt sich auch daran erkennen, dass hier auch keine Fragestellungen allein von Seiten der Lernenden entwickelt oder Versuche funktionsfähig aufgebaut werden müssen (Hopf, Schecker, Höttecke & Wiesner, 2022, S. 113).

Auch ist es nicht einfach, für jede Plexiglas-Form die gleiche (Dreh-)Stellung der Schraubpresse einzustellen, da es keine praktisch-sinnvolle Kraftanzeige gibt, wie stark die Schraubpresse gegen das Plexiglas drückt. Hier wäre ein

Drehmomentschlüssel vonnöten, welcher mit dem *Drehmoment* aber eine weitere physikalisch-inhaltliche Ebene in das Experiment bringt, es damit komplizierter macht und auch eine bisher nicht benötigte, quantitative Komponente hineinbringt. Der lesenden Lehrkraft ist es dennoch überlassen, den Aufbau dieses Experiments beliebig zu erweitern.

Zuletzt stellt sich auch die Frage nach den Ungenauigkeiten in der Modellannahme, Plexiglas-Formen in Apparaturen einzuspannen, die nur Kräfte in Längsrichtung des Plexiglases ausüben. In der Realität sind die wirkenden Kräfte variabel in ihrem Betrag und ihrer Richtung. Die Materialien eines Flugzeugs müssen bei Start, im Flug und bei Landung Einiges aushalten, was mit der hiesigen Experimentierreihe nicht modellierbar ist. Dies kann im Anschluss an die Experimente bzw. die dazu zu entwerfende Unterrichtseinheit geschehen.

6 Fazit & Reflexion

Ziel dieser Arbeit war es, mehrere und damit verschiedene Unterrichtsentwürfe bzw. Ideen für Experimente im Rahmen des inhaltlichen Kontextes der Flugsicherheit zu entwickeln. Dabei müssen nicht alle Entwürfe bzw. Experimente innerhalb eines physikalischen Themenkomplexes oder einer schulischen Jahrgangsstufe stattfinden. Vielmehr bietet diese Arbeit, Vorschläge für kontextorientierten Physikunterricht und Anreize, wie dieser Unterricht umgesetzt werden kann.

Zunächst wurde deutlich, dass Fragen der Flugsicherheit viele unterschiedliche physikalische Sachverhalte tangieren. Für diese Arbeit ausgewählt wurden neben zwei klassischen Fragestellungen zur Mechanik eine Fragestellung zum Druck sowie eine zur technisch-verwendbaren Kombination aus Optik und Materialzusammensetzung. So wurde eine dreistündige Unterrichtseinheit zu den Newton'schen Axiomen erstellt, welche den Sinn und Zweck von Sicherheitsgurten und Anschnallregeln hinterfragt. Dann wurde eine zweistündige Unterrichtseinheit zu Reibungsarbeit und damit einhergehender Temperaturentwicklung kreiert,

welche die Regeln und Gefahren beim Rutschen auf einer Flugzeugnotrutsche bespricht. In diesem Kontext wurden erstmals auch Materialfragen aufgeworfen und der Physikunterricht technischer orientiert. Außerdem wurde im Rahmen einer dritten Unterrichtsidee, welche hauptsächlich aus noch unterrichtlich einzuordnenden Experimenten besteht, die Frage nach dem Kabinendruck und dessen Differenz zum Außendruck gestellt. Dabei wurden auch mögliche Folgen für Mensch und Maschine diskutiert. Als vierte Unterrichtsidee wurden Experimente vorgestellt, welche sich die Frage vorgenommen haben, warum Flugzeugfenster oder der Flugzeugrumpf rund sind. Hier wurden Stabilitätsuntersuchungen bzgl. verschiedener Formen mittels des optischen Phänomens der Lichtpolarisation durchgeführt. Natürlich gibt es weitere Sachverhalte aus der Fliegerei bzw. der Flugsicherheit, zu denen Physikunterricht entworfen werden könnte. Das Fliegen selbst, welches zwar nicht in erster Linie etwas mit Sicherheit zu tun hat, aber inhaltlich die Themen Kräftebilanzen, Strömungen und Luftwiderstand bearbeiten lässt, und die Strahlung in der Atmosphäre, welche eher weniger für die Passagiere, sondern vor allem für das fliegende Personal auf Dauer gefährlich werden kann, sind nur zwei solcher Beispiele, die in dieser Arbeit genannt wurden. Damit wird deutlich, dass die Fliegerei und auch die Flugsicherheit eine Vielzahl an inhaltlichen Möglichkeiten bieten, im Physikunterricht kontextorientiert zu arbeiten. Das Potenzial dieses Kontextes ist also deutlich zu erkennen.

Ob Kontexte im Physikunterricht überhaupt einen Vorteil bringen im Vergleich zu nicht kontextbezogenem Unterricht, ist durch die Forschung noch nicht eindeutig geklärt. Zwischen einzelnen Studienergebnissen, die keinen signifikanten Unterschied in den Leistungen der teilnehmenden Lernenden feststellten (Testgruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe) und der bei vielen Lernenden gestiegenen Motivation durch das sinnvolle Setzen eines interessanten Kontextes gibt es viele Argumente für beide Seiten. Da es für Kontextsetzung aber definitiv keinen gravierenden Nachteil zu geben scheint und je nach Kontextwahl immer andere Lernende angesprochen werden, wurden in dieser Arbeit Unterrichtsentwürfe mit Kontext entworfen. Die Flugsicherheit bietet sich dabei aus mehreren Gründen an. Zum einen ist

Fliegen etwas, das die Menschheit aufgrund der eigenen körperlichen Flugunfähigkeit – bei aber gleichzeitigem Wunsch es zu können – irgendwann durch eine technische Umsetzung (u.a. Flugzeug) möglich gemacht hat. Dies könnte daher auch viele Lernende begeistern. Zum anderen gibt es viele Regeln aus der Fliegerei, die mit Blut geschrieben sind und neben dem genauen Inhalt folgendes lehren sollen: Das Lernen aus Fehlern und das Hinterfragen von Regeln (unabhängig vom Ausgang der Überlegungen).

Damit lassen sich bereits die in dieser Arbeit verwendeten didaktischen Überlegungen zusammenfassen. Es wurde vor allem darauf geachtet, dass die Lernenden nicht nur Frontalunterricht genießen, sondern viel in Gruppen oder als Paar arbeiten. Außerdem wurde probiert, eine große Bandbreite an technischen Mittel und digitalen Werkzeugen zu verwenden (von Videos, über Bewegungsanalyse-Apps, bis hin zu KI-Anfragen). Außerdem wurden kleinschrittige Arbeitsblätter erarbeitet, welche komplexe Sachverhalte nach und nach erarbeiten, um sowohl für leistungsschwächere Lernende angepasste Möglichkeiten zu bieten, als auch den Lernstand aller Lernenden immer wieder systematisch zwischenkontrollieren zu können. Auch bezogen auf die für die Lernenden zu erlernenden Kompetenzen werden viele Möglichkeiten geboten. Graphen werden ausgedruckt und analysiert oder Zeichnungen zu Aufbauten und Kräften selbstständig skizziert. Experimente werden selbstständig durchdacht und geplant, sowie durchgeführt, dokumentiert und ausgewertet. Dabei wird erklärt und berechnet. Modellannahmen werden hinterfragt und es findet mehrfach ein Abgleich mit der Realität statt. Das Kommunizieren über physikalische Inhalte wird in jeder Unterrichtsstunde im Plenum, der Gruppe oder als Paar trainiert. Das Verwenden von Technik (Kameras oder Apps) wird weiter unterstützt und das Hinterfragen von Medien, Artikeln aus dem Internet oder Ausgaben einer KI wird eingeübt. Es werden bereits bekannte Themen und Sachverhalte wiederholt und die Ergebnisse im Sinne der langfristigen Festigung schriftlich festgehalten. Es wird im Klassenraum, aber auch außerhalb des Klassenraums Unterricht erlebt (z.B. im Treppenhaus). Die Nützlichkeit der eigenen Smartphones wird durch die Nutzung der Sensoren verdeutlicht. Das Beobachten bei Experimenten und das Formulieren von Thesen bzw.

Fragestellungen erfolgt mehrfach in den Unterrichts- und Experimentierentwürfen. Darüber hinaus sind viele weitere bereits in dieser Arbeit erwähnte Kompetenzen hier nicht nochmal aufgeführt. Außerdem können bei Einordnung der vorgestellten Experimente in den individuellen Unterricht der lesenden Lehrkraft noch weitere Kompetenzen sowie didaktische und methodische Überlegungen hinzukommen.

Bei Betrachtung der vorgestellten Experimente ergibt sich eine Auswahl an Demonstrations- und von Seiten der Lernenden selbstdurchzuführenden Experimenten. Es wurde darauf geachtet, dass die benötigten Materialien bereits in üblichen Physiksammlungen von Schulen zu finden sind oder sich relativ leicht und günstig besorgen lassen. Manche Experimente sind mehrschrittig, aber einfach im Verständnis, andere sind einfach in der Durchführung, aber komplexer in der Analyse. Ob die lesende Lehrkraft alle hier präsentierten Experimente und Unterrichtsschritte übernimmt oder ob sie sich für einzelne daraus entscheidet, liegt in der Freiheit einer jeden Lehrkraft.

Es ergeben sich also viele Lerneffekte bei den Lernenden und unterrichtliche Möglichkeiten bei der Kontextsetzung „Flugsicherheit“ – sowohl inhaltlich und physikalisch wie auch didaktisch und experimentell. Dennoch gibt es auch einige kritische Punkte bei der Durchführung oder der Planung zu beachten.

Nicht alle hier vorgestellten oder auch nicht vorgestellten Sachverhalte der Flugsicherheit sind am Stück und damit innerhalb einer Jahrgangsstufe zu bearbeiten. Dies ist zwar auch so beabsichtigt, um die vielseitige Einsetzbarkeit zu zeigen, dennoch sollte sich die planende Lehrkraft fragen, ob sie über mehrere Schuljahre hinweg immer wieder zum Thema der Flugsicherheit zurückkommen will. Damit ist diese Arbeit nicht als „einmalige Sache“ zu verstehen, sondern als ideengebend für einzelne Unterrichtseinheiten im Laufe mehrerer Jahre.

Bei einigen Experimenten, wie beispielsweise der Untersuchung von Reibungsarbeit und Temperaturentwicklung, mussten zum Erstellen der Aufnahmen für diese Arbeit einige Anläufe unternommen werden. Es ist nicht einfach, die verschiedenen Oberflächenimitate für menschliche Haut, Kleidung und die Notrutsche korrekt zu spannen und eine ausreichende

Steigung zu gewährleisten. Außerdem ist die temperatur-graduelle Auflösung der Wärmebildkamera manchmal zu unscharf, um einen Temperaturunterschied von weniger als 1°C nach dem Hinabrutschen der Gewichte zu erkennen. Schwierigkeiten, wie diese, können nicht nur in der Planung der Lehrkraft passieren, sondern auch im Unterricht. Auch damit ist dann transparent und lerneffekt-bringend umzugehen. Das sollte der lesenden und planenden Lehrkraft bewusst sein.

Im Verständnis und der Analyse komplizierte Experimente, wie das Spannen der Plexiglas-Formen in eine Schraubpresse und das „Rausfiltern“ von Licht mit einer bestimmten Polarisierung durch Polarisationsfolien, sind schwierig an eine vermeintlich „richtige Stelle“ im Curriculum zu positionieren. Dementsprechend ist es auch schwer zu sagen, zu welchem Themenkomplex dieses Experiment am meisten passt. So kann es beispielsweise in der Wellen-Optik der Oberstufe angebracht sein. Dazu müsste aber dennoch einiges an Vorwissen zu Materialbeschaffenheit und Molekülstrukturen vorliegen. Auch das könnte im Zuge der Experimentvorbereitung, -durchführung und -analyse im Unterricht passieren. Dennoch wird es sicherlich schwierig, mehrere komplexe Themen miteinander zu verbinden.

Ein weiterer Punkt, welcher immer beachtet werden sollte, ist nicht funktionierende Technik. Bei der hohen Abhängigkeit der hier präsentierten Unterrichtsideen von technischen Komponenten sollte auch dies in der Unterrichtsplanung abgewogen werden. So kann die KI falsche oder andere Ergebnisse liefern, als es die Lehrkraft vorgesehen hat, das Ausdrucken der Graphen durch die Bewegungsanalyse-App funktioniert nicht oder das einfache Zeigen von Videos mit Ton wird zur unterrichtlichen Hürde. Wenn bei bereits schwierigen Experimenten zumindest im restlichen Ablauf des Unterrichts auf Nummer sicher gesetzt werden soll, wird empfohlen, auf die ein oder andere technische Finesse dieser Unterrichtsentwürfe zu verzichten.

Abschließend sei gesagt, dass die hier präsentierten Unterrichtsentwürfe nur rahmengebende Ideen darstellen und nicht explizit durchgeführt oder systematisch evaluiert wurden, da dies eine primär Unterricht-entwickelnde Arbeit ist. Zu den Unterrichtsentwürfen bzw. didaktischen Überlegungen

finden sich kritische Betrachtungen und Alternativvorschläge am Ende eines jeden Unterrichtsvorschlags. Auch wurden alle Experimente mehrfach durchgeführt und die etwaigen Schwierigkeiten in dieser Arbeit erwähnt.

Der in dieser Arbeit aufgeführte theoretische Hintergrund reicht meistens aus, um die ebenfalls vorgestellten Experimente bzw. deren Ergebnisse und Beobachtungen im Schulunterricht zu erklären. Dennoch erscheint es selbstredend, dass die Lehrkraft unter anderem für Rückfragen der Lernenden ein breiteres theoretisches Hintergrundwissen innehaben sollte. So wurde in dieser Arbeit beispielsweise auf eine genauere quantitative Analyse der Polarisierungseffekte bei der Untersuchung der Stabilität verschiedener Fensterformen für Flugzeuge verzichtet.

Es empfiehlt sich für die lesende Lehrkraft, die Experimente und evtl. auch die Unterrichtsentwürfe zunächst einmal selbst zu durchdenken und auszuprobieren. Anschließend können sie gerne im jeweiligen Unterricht durchgeführt werden und nach Belieben abgeändert werden. Dass der Kontext der Sicherheit in der Fliegerei viele Möglichkeiten für einen abwechslungsreichen und modernen Physikunterricht bietet, verdeutlicht diese Arbeit durch verschiedenste Ideen.

Literatur- & Quellenverzeichnis

- Arad, C. (2024). *Wie hoch fliegt ein Flugzeug? Alle Infos zu Modellen*. Zugriff am 05.04.2025 unter <https://onestly.de/blog/reisen/wie-hoch-fliegt-ein-flugzeug/>
- Becker, S., Klein, P., Gößling, A. & Kuhn, J. (2019). Förderung von Konzeptverständnis und Repräsentationskompetenz durch Tablet-PC-gestützte Videoanalyse. Empirische Untersuchung der Lernwirksamkeit eines digitalen Lernwerkzeugs im Mechanikunterricht der Sekundarstufe 2. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 25 (1), 1 – 24.
- Beckhoff Information System (o. J.). *Reibungskoeffizient*. Zugriff am 27.03.2025 unter https://infosys.beckhoff.com/index.php?content=../content/1031/tc_motion_designer/2761712779.html&id=
- Berger, R. (2000). *Moderne bildgebende Verfahren der medizinischen Diagnostik – Ein Weg zu interessanterem Physikunterricht*. Berlin: Logos.
- Bob Bob (2010). *Northampton Saints vs Saracens - GP 16th May 2010: Myler Penalty*. Zugriff am 10.03.2025 unter <https://www.flickr.com/photos/44217191@N05/4613559332>
- Brahaj, A. (2019). *Flug von Prishtina nach Basel gerät in schweren Turbulenzen* 16.06.19. Zugriff am 25.02.2025 unter <https://www.youtube.com/watch?v=pUa3z88W6MQ>
- Breckow, J. & Frank, G. (2014). Strahlung beim Fliegen. *Strahlenschutz Kompakt*, 07/2014 (1), 1 – 2.
- dauidicusb (o. J.). *Lufthansa Boeing 747-400 Upper Deck Doors Training Video*. Zugriff am 20.03.2025 unter <https://www.youtube.com/watch?v=2h2jMcoUJog>
- de Witt, C., Gloerfeld, C. & Wrede S. E. (Hrsg.). (2023). *Künstliche Intelligenz in der Bildung*. Wiesbaden: Springer.

Demtröder, W. (2021). *Experimentalphysik 1. Mechanik und Wärme*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Deußing, G. (o. J.). *90 Jahre Plexiglas*. Zugriff am 23.04.2025 unter [https://www.k-online.de/de/Media_News/News/90_Jahre_Plexiglas_\(Teil_2\)/90_Jahre_Plexiglas](https://www.k-online.de/de/Media_News/News/90_Jahre_Plexiglas_(Teil_2)/90_Jahre_Plexiglas)

Deutscher Wetterdienst [DWD1] (o. J.). *Barometereinstellung*. Zugriff am 05.04.2025 unter [https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=100378&lv2=100310#:~:text=Die%20Abnahme%20des%20Luftdrucks%20mit,%22reduzierte%22\)%20Luftdruck%20eingetragen.](https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=100378&lv2=100310#:~:text=Die%20Abnahme%20des%20Luftdrucks%20mit,%22reduzierte%22)%20Luftdruck%20eingetragen.)

Deutscher Wetterdienst [DWD2] (o. J.). *Standardatmosphäre*. Zugriff am 05.04.2025 unter [https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=102564&lv2=102248#:~:text=In%2011%20km%20Höhe%20\(Luftdruck,dieser%20Schicht%20ist%20die%20Tropopause.](https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=102564&lv2=102248#:~:text=In%2011%20km%20Höhe%20(Luftdruck,dieser%20Schicht%20ist%20die%20Tropopause.)

Deutscher Wetterdienst [DWD3] (2015). *Wenn die Luft zu dünn wird...* Zugriff am 05.04.2025 unter https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2015/5/28.html

Dilling, F. & Kraus, S. F. (2024). Empirische Studie zu Beliefs über Funktionen von Modellen und Modellieren. In F. Dilling, K. Holten & I. Witzke (Hrsg.), *Interdisziplinäres Forschen und Lehren in den MINT-Didaktiken. Mathematik mit Informatik, Naturwissenschaften und Technik in der Bildungsforschung vernetzt denken* (S. 55 – 78). Wiesbaden: Springer.

Duit, R. & Mikelskis-Seifert, S. (2007). Kontextorientierter Unterricht. Wie man es einbettet, so wird es gelernt. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 18 (98), 4 – 8.

extremtextil (o. J.). *Nylon, einseitig TPU-beschichtet, 450g/qm, HF-schweißbar*. Zugriff am 27.03.2025 unter

<https://www.extremtextil.de/nylon-einseitig-tpu-beschichtet-450g-qm-hf-schweissbar.html>

Finkelstein, N. (2005). Learning Physics in Context: A study of student learning about electricity and magnetism. *International Journal of Science Education*, 27 (10), 1187 – 1209.

Flugblatt (o. J.). *Wie entstehen Luftlöcher?* Zugriff am 01.03.2025 unter <https://www.flugblatt-magazin.de/region/wie-entstehen-luftloecher>

GaboAir (2021a). *Video auf Kurznachrichtendienst X (ehemals twitter)*. Zugriff am 23.02.2025 unter https://x.com/GaboAir/status/1401678513657159681?ref_src=twsrc%5Etfw%7Ctwcamp%5Etweetembed%7Ctwterm%5E1401679977301618688%7Ctwgr%5E7181a13f979c27335102a9af1e9a53e54b1bb0ec%7Ctwcon%5Es2_&ref_url=https%3A%2F%2Fsimpleflying.com%2Famerican-airlines-737-max-bird-strikes%2F

GaboAir (2021b). *Video auf Kurznachrichtendienst X (ehemals twitter)*. Zugriff am 23.02.2025 unter https://x.com/GaboAir/status/1401679977301618688?ref_src=twsrc%5Etfw%7Ctwcamp%5Etweetembed%7Ctwterm%5E1401679977301618688%7Ctwgr%5E7181a13f979c27335102a9af1e9a53e54b1bb0ec%7Ctwcon%5Es1_&ref_url=https%3A%2F%2Fsimpleflying.com%2Famerican-airlines-737-max-bird-strikes%2F

Göbel, M. (2024). *Unglücksflug der Singapore Airlines. Wie Turbulenzen bei klarer Sicht entstehen*. Zugriff am 18.02.2025 unter https://www.spiegel.de/wissenschaft/singapore-airlines-turbulenzen-bei-klarere-sicht-wie-kann-das-sein-a-621ad190-e9c6-409a-a2be-1b9099712d4e?sara_ref=re-so-app-sh

Hattie, J. (2023). *Visible Learning: The Sequel. A synthesis of over 2,100 meta-analyses relating to achievement*. London, New York: Routledge.

Heintze, J. & Bock, P. (Hrsg.). (2017). *Lehrbuch zur Experimentalphysik. Band 4: Wellen und Optik*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Hessisches Kultusministerium (2011). *Bildungsstandards und Inhaltsfelder. Das neue Kerncurriculum für Hessen. Sekundarstufe I – Gymnasium. PHYSIK*. Wiesbaden: HKM.

Hessisches Ministerium für Kultus, Bildung und Chancen (2024). *Kerncurriculum Gymnasiale Oberstufe. Physik. Ausgabe 2024*. Wiesbaden: HMKB.

Hollemann, H. (2019). *Im Flugzeug: Darum sind Fenster immer rund und nicht eckig*. Zugriff am 10.03.2025 unter <https://www.mz.de/leben/reisen/im-flugzeug-darum-sind-fenster-immer-rund-und-nicht-eckig-1577030>

Hopf, M., Schecker, H., Höttecke, D. & Wiesner, H. (Hrsg.). (2022). *Physikdidaktik kompakt*. 1. vollständig neu bearbeitete Auflage. Hannover: Aulis, Klett, Kallmeyer.

International Air Transport Association (2024). *IATA Annual Safety Report Executive Summary and Safety Overview – 60th Edition*. Montreal: IATA.

Jarrett, C. (o. J.). *Why is destruction so satisfying?* Zugriff am 06.03.2025 unter <https://www.sciencefocus.com/the-human-body/why-is-destruction-so-satisfying>

Jasßn (2009). *Belly Flop*. Zugriff am 10.03.2025 unter <https://www.flickr.com/photos/lewishamdreamer/4060480844/in/photolist-7bP2uq-e6jMxm-5KZmVj-wyAxF-6GmXnE-31b7vx-6QkLBJ-K7fJW4-2k9EeKS-2n1KjES-urgEWH-o8TBzw-b3VwXP-PnZFJ-RBGuy-wqjeTm-8nx9pV-6WzoLi-4Pbszz-4HrTyx-8wGnRF-2STR61-4qTX8e-2SBuoS-2sw75C-4eRCto-4qXZvC-8e19ZF-8KcCD-RP2Vnn-BVUPMu-4qTTSD-2BpfTE-4qXXau-4qY4UC-4qTZfP-4qU17g-7bP2Fy-4qTXyT-2fSw7C-4qTSjT-4qTQTe-4qTTfX-4qTYjR-3fNi9-5ocDh4-4qTWn2-q7txZt-6TdZL7-hQsBn/>

Kepler, J. (2017). *Ausgewählte Beispiele eines Kontext-orientierten Physikunterrichts*. Linz: Diplomarbeit, Universität Linz.

Kirchner, E., Girwidz, R. & Fischer, H. E. (Hrsg.). (2020). *Physikdidaktik. Grundlagen*. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.

- Kirchner, E., Girwidz, R. & Häußler, P. (Hrsg.). (2015). *Physikdidaktik. Theorie und Praxis*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Kuhn, J. (2010). *Authentische Aufgaben im theoretischen Rahmen von Instruktions- und Lehr-Lern-Forschung. Optimierung von Ankermedien für eine neue Aufgabenkultur im Physikunterricht*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Lück, S. & Wilhelm, T. (2023). 2.1 Messwerte aufnehmen und verarbeiten. In T. Wilhelm (Hrsg.), *Digital Physik unterrichten: Grundlagen, Impulse und Perspektiven* (S. 14 – 39). Hannover: Klett, Kallmeyer.
- Merzyn, G. (2015). *Guter Physikunterricht. Die Sicht von Schülern, Lehrern, Wissenschaftlern*. Vortrag auf Didaktik der Physik, Frühjahrstagung – Wuppertal 2015, Wuppertal.
- Molz, A., Wilhelm, T. & Kuhn, J. (2022). Das Unsichtbare sichtbar machen: Smartphones als Wärmebildkamera. In T. Wilhelm & J. Kuhn (Hrsg.), *Für alles eine App: Ideen für Physik mit dem Smartphone* (S. 223 – 230). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Müller, R. (2006). Kontextorientierung und Alltagsbezug. In H. F. Mikelskis (Hrsg.), *Physik-Didaktik. Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II* (S. 102 – 119). Berlin: Cornelsen.
- Panorama Air (o. J.). *Luftloch – Turbulenzen in der Luft*. Zugriff am 01.03.2025 unter <https://panorama-air.de/magazin/luftloch-turbulenzen-in-der-luft>
- Parchmann, I. & Kuhn, J. (2018). Lernen im Kontext. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Theorien in der naturwissenschaftlichen didaktischen Forschung* (S. 193 – 208). Berlin: Springer.
- Parchmann, I., Gräsel, C., Baer, A., Nentwig, P., Demuth, R. & Ralle, B. (2006). "Chemie im Kontext": A symbiotic implementation of a context-based teaching and learning approach. *International Journal of Science Education*, 28 (9), 1041 – 1062.

- Petri-Ouani, F. & Löffler, S. N. (2023). Wie wirken sich unterschiedliche Lehr-/ Lernmaterialien auf die studentische Lernmotivation und das Lernergebnis aus? *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 0 (0), 1 – 14.
- Pietsch, M. (2021). Arbeitsblätter und Aufgabenblätter – Funktion und Gestaltung. *GeoGraz*, 68 (1), 30 – 34.
- PlasticExpress (2020). *Was ist Plexi?* Zugriff am 24.04.2025 unter <https://plasticexpress.at/n-174/plexiglas-was-ist-das-und-woher-kommt-es>
- Prenzel, M., Carstensen, C. H., Frey, A., Drechsel, B. & Rönnebeck, S. (2007). PISA 2006 – Eine Einführung in die Studie. In M. Prenzel, C. Artelt & J. Baumert (Hrsg.), *PISA 2006. Die Ergebnisse der dritten internationalen Vergleichsstudie* (S. 31 – 60). Münster, New York, München, Berlin: Waxmann.
- Professional Aviation Academy (o. J.). *Wie funktioniert die Druckbeaufschlagung eines Flugzeugs?* Zugriff am 05.04.2025 unter <https://www.professionalaviation.it/de/2019/12/13/wie-funktioniert-die-druckbeaufschlagung-eines-flugzeugs/>
- Rathje, M. (2024). *Passagiere bluten aus Ohren und Nasen: Boeing 737 muss nach Druckabfall in Kabine in Salt Lake City notlanden.* Zugriff am 18.02.2025 unter <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/passagiere-bluten-aus-ohren-und-nasen-boeing-737-muss-nach-druckabfall-in-kabine-in-salt-lake-city-notlanden-12402740.html>
- Safran Electronics & Defense GmbH (o. J.). *Notrutsche für Flugzeug.* Zugriff am 27.03.2025 unter <https://www.aeroexpo.online/de/prod/safran-aerosystems/product-169069-7746.html>
- San Marcos Daily Record Negatives (2018). *SMDR Photographic Negatives Collection, [1959] [Wrecks - Holland St. Aug 31, 59].* Zugriff am 10.03.2025 unter <https://www.flickr.com/photos/txstate-smdr/45271197341/in/photolist-2bYsHKc-26nMc1x-9TBjnS-Tf4M9h-J6tzb-TrW9t5-rSudeP-24ZP4SL-25smwKg-Qq94TL-5JvffU-bm8fya->

KBFVZu-2382DNG-28EuB7p-26nMcyX-26DHY51-2fAeK9v-27KA2ba-
28EuBTe-27KA3ta-24ZP4PE-26nMbgB-BALFG-26nMc4i-29hLraT-
26DHY3h-MV2B21-26nMa6v-MV2BSQ-27KA1KF-26nMdmP-28X44vf-
MV2SLC-24ZP4GA-LV4Wn8-2fW5dsD-KBFWgG-LV5FRx-24ZP5Fj-2aAFSxf-
26nMcet-LV4XCe-xNskT-MV2Eeo-29Yga9u-D7Ew1P-29hLpJr-MoSGni-
BAKK5

Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M. & Duit, R. (Hrsg.). (2018).
Schülervorstellungen und Physikunterricht. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg:
Springer.

Schlichting, H. J. (1977). Konstruktive Modellfindung im Unterricht. In G.
Schäfer, G. Trommer, & K. Wenk (Hrsg.), *Denken in Modellen* (S. 158 – 173).
Braunschweig: Westermann.

Schrackmann, I. (2022). *Gestaltung von Arbeitsblättern*. Goldau:
Pädagogische Hochschule Schwyz. Zugriff am 03.03.2025 unter
https://www.zebis.ch/sites/default/files/teaching_material/gestaltung_von_arbeitsblaettern.pdf

Schwarzahns, D. & Nordmeier, V. (o. J.). *Viana for iOS*. Zugriff am 06.03.2025
unter <https://www.physik.fu-berlin.de/einrichtungen/ag/ag-nordmeier/forschung/laufende/viana/index.html>

Sobolewski, D. (2024). *Urlaub in Spanien, Griechenland & Co.: Warum du im
Flieger nie ein T-Shirt tragen solltest*. Zugriff am 18.02.2025 unter
<https://www.derwesten.de/panorama/vermisches/urlaub-spanien-griechenland-flugzeug-shirt-meisten-id301124244.html>

tec-science (2019). *Farbwahrnehmung*. Zugriff am 24.04.2025 unter
<https://www.tec-science.com/de/optik/geometrische-optik/farbwahrnehmung/>

Trappe, N. (2024). *So funktioniert der Druckausgleich im Flugzeug*. Zugriff am
07.04.2025 unter <https://www.adac.de/gesundheits/gesund-unterwegs/flugzeug-schiff/druckausgleich/>

- Tsvetoslav Hristov (2020). *Person Firing a Gun*. Zugriff am 10.03.2025 unter <https://www.pexels.com/photo/person-firing-a-gun-5222282/>
- Vorndran, I. (2011). Unfallstatistik – Verkehrsmittel im Risikovergleich. *Wirtschaft und Statistik*, 12/2010 (1), 1083 – 1088.
- Wilhelm, T., Schecker, H. & Hopf, M. (Hrsg.). (2021). *Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Zügge, T. (2021). *Kontexte für den Kontext*. Vortrag auf Didaktik der Physik, Frühjahrstagung – virtuell 2021, Wuppertal.

Anhang

Dies ist das erste Arbeitsblatt des ersten Unterrichtsentwurfs zum „Luftloch“.

Physik

KRÄFTE

06.12.2024

„Startabbruch“ Zusammenhang von Beschleunigung und Kraft



(Hollemann, 2019)



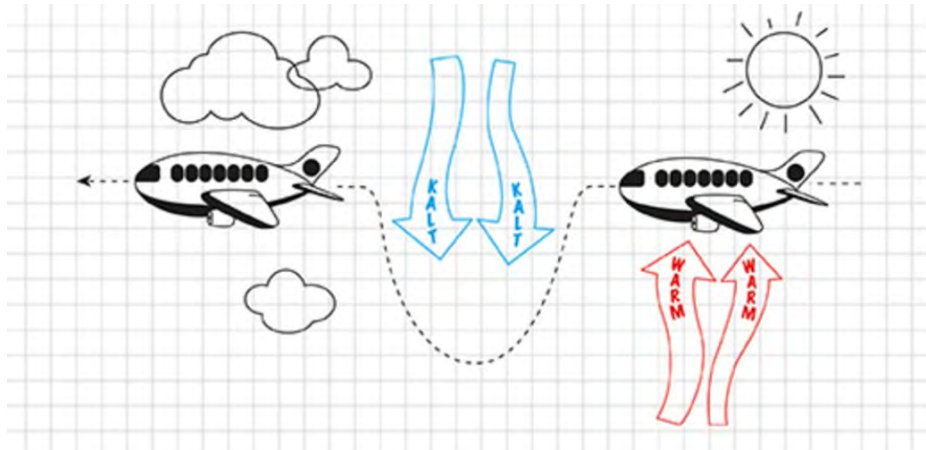
(eigene Fotografie)

- 1) *Stellt* die Situation im Flugzeug mit dem „sich nach vorne bewegendem Passagier bzw. Handy“ experimentell *nach*. Dazu bekommt ihr mehrere Eier, welche die Passagiere darstellen sollen und damit behutsam behandelt werden sollten, und eine durchsichtige Kiste, welche das Flugzeug symbolisieren soll. *Filmt* dieses Experiment mit der Video-Analyse-App und lasst euch ein v-t-Diagramm der Bewegung des Eies *ausgeben*. Dazu sollte die Kamera stillstehen und sich der Kasten, samt Ei darin, im Blickfeld der Kamera bewegen.
 - a) Zunächst eine Aufnahme eures Experiments in Anlehnung an einen nicht angeschnallten Passagier.
 - b) Dann eine Aufnahme eines weiteren Durchgangs des Experiments, in dem ihr darstellt, dass der Passagier angeschnallt ist. (Dazu gibt es am Pult vorne Klebeband, welches einen Anschnallgurt darstellen soll.)

Wenn ihr damit fertig seid, lasst ihr mich kurz mit euch die Diagramme besprechen. Danach könnt ihr sie ausdrucken und habt ihr so gesichert.

- 2) *Bestimmt* die Zeitpunkte in beiden Experimentabläufen, zu denen im v-t-Diagramm eine abrupte Beschleunigung bzw. Verzögerung zu erkennen ist. Dazu schaut ihr eure Videos am besten in Slow-Motion an und habt gleichzeitig einen Blick auf eure v-t-Diagramme. *Beschreibt*, was zu diesen Zeitpunkten im Experiment passiert ist und was damit der Grund für die jeweilige Beschleunigung bzw. Verzögerung ist.
- 3) *Erläutert* den Vorteil den Anschnallgurten im Flugzeug, Auto oder anderen Verkehrsmitteln haben. Nutzt dazu eure Erkenntnisse aus der Bearbeitung von den Aufgaben 1 und 2. Macht euch dabei jeweils klar, was mit dem Ei bzw. dem Passagier in beiden Fällen a) und b) passiert.

„Luftloch“ Anwendung des zweiten Newton'schen Axioms



(Flugblatt, o. J.)

- 1) Liest zunächst die Definition eines „Luftlochs“ und fasst in eigenen Worten *zusammen*, was ein Luftloch ist und warum der Begriff irreführend bzw. eigentlich falsch ist.

WAS IST EIN LUFTLOCH?

Im Prinzip gibt es das Phänomen des Luftlochs nicht. Jedoch steht der Begriff für eine Wetter- und Windkonstellation, die ein Flugzeug binnen Sekunden in Turbulenzen bringen kann. Völlig unvorbereitet gerät die Maschine auf eine Art Achterbahnfahrt und sackt [...] in ein Loch nach unten. Für Passagier:innen stellt sich in diesem Moment ein Gefühl der Schwerelosigkeit ein. Piloten und Pilotinnen sprechen jedoch nicht von einem Luftloch, sondern bezeichnen diese Lage im Fachjargon als Turbulenzen in wolkenfreier Luft, kurz CAT. Aus physikalischer beziehungsweise meteorologischer Sicht handelt es sich um abwärts gerichtete Luftströmungen. Heizt die Sonne die Erdoberfläche auf, steigt warme Luft nach oben. So nutzen beispielsweise Segelflieger diese Aufwinde zu ihrem Vorteil, um mit der Thermik die gewünschte Höhe zu erreichen und zügig aufzusteigen. Manche Bereiche bleiben dagegen vergleichsweise kühl und die Luft sinkt dort wieder rapide nach unten ab. Dadurch entstehende Abwinde lassen ein Flugzeug ohne Vorwarnung einige Meter nach unten absacken. In der Nähe von Gewittern oder Stürmen setzen die Turbulenzen Kräfte frei, die Maschinen tatsächlich zum Absturz bringen können. Die abrupten Bewegungen des Flugzeugs machen vielen Passagier:innen Angst, doch eine große Gefahr geht von einem Luftloch in der Regel nicht aus. Im Cockpit werden CATs kaum mit Sorge betrachtet, lediglich die Einschränkungen der Bewegungsfreiheit im Flugzeug selbst [also das Anschnallen] sollte nach Ansicht von Pilot:innen möglichst ohne Zwischenfälle gewährleistet sein.

(Panorama Air, o. J.)

- 2) Stellt die Situation des „sich durch ein Luftloch spontan nach unten bewegenden Flugzeugs“ experimentell *nach*. Dazu bekommt ihr wieder Eier und eine durchsichtige Kiste. Lasst euch wieder mit dem Video-Analyse-Programm ein v-t-Diagramm der *gefilmten* Bewegung des Experiments *ausgeben*. Die Kamera soll wieder still auf dem Tisch stehen und die ganze Bewegung von Kiste und Ei soll andauernd im Blickfeld der Kamera sein.
 - a) Zunächst eine Aufnahme eures Experiments in Anlehnung an einen nicht angeschnallten Passagier.
 - b) Dann eine Aufnahme eines weiteren Experimentierdurchgangs, in dem ihr darstellt, dass der Passagier angeschnallt ist. (Dazu gibt es vorne am Pult wieder Klebeband.)

Wenn ihr damit fertig seid, lasst uns auch hier die Diagramme zusammen besprechen, bevor ihr sie ausdruckt und für die weiteren Aufgaben verwendet.

- 3) *Berechnet* anhand des v-t-Diagramms die Beschleunigung des Eies bzw. Passagiers nach unten, sobald das Flugzeug absackt. *Erläutert* dann, welche Kraft diese Beschleunigung nach unten „verursacht“. (Kontrolle auf Nachfrage 😊)
- 4) Nun wird das Flugzeug auch die ganze Zeit über durch die gleiche Kraft wie in Aufgabe 3 nach unten gezogen, da diese Kraft bekanntermaßen ständig auf alles wirkt (Flugzeug, Passagiere, Getränkewagen, ...). *Erkläre*, warum es nun trotzdem so wirkt, als ob die Passagiere im Flugzeug während des Flugs durch ein Luftloch nach oben gezogen werden.
- 5) *Beschreibe*, wie die Bewegungen von Flugzeug und Passagier von einer außerhalb des Flugzeugs ruhenden Position aussehen würden und wie die Bewegungen von Flugzeug und Passagier für einen im Flugzeug befindlichen Passagier aussehen würden. *Frage* dich dabei jeweils, was sich scheinbar nach unten oder oben bewegt.
- 6) *Findet* mindestens drei „Momente“ während des Flugs durch ein Luftloch, die sich mit dem zweiten Newton'schen Axiom erklären lassen. *Ordnet* jeweils *zu*, welcher Körper die beschleunigte Masse ist, die ihr in eurem Beispiel betrachtet, und von welchem anderen Körper eine Kraft auf euren betrachteten Körper ausgeübt wird.

„Notrutsche“ Reibungsarbeit und Reibungskraft

- 1) *Liest* zunächst den Artikel der Online-Zeitschrift „Der Westen“ über das Tragen von langer, hautbedeckender Kleidung im Flugzeug und *formuliert* eure begründete Einstellung bezüglich der Seriosität dieses Artikels.
- 2) *Entwickelt* physikalische Fragestellungen und passende Experiment-Ideen bezüglich der im Artikel getroffenen Äußerungen, warum keine T-Shirts in Flugzeugen getragen werden sollten. Diese können wir im Anschluss experimentell oder durch Recherchen beantworten.
- 3) *Sammelt*, welche Themen, physikalische Größen, Formeln, Koeffizienten, Zeichnungen etc. aus eurem bisherigen Physikunterricht (alle Klassenstufen) beim Beantworten der Frage nach der Reibung bzw. dem Temperaturanstieg auf der Notrutsche helfen könnten.
HILFE: ältere Aufschriften in euren Physikhelfen
- 4) *Recherchiert* die Materialien aller an dem Reibungsprozess beteiligten Stoffe und alle dazu gehörigen (Gleit-)Reibungskoeffizienten der sinnvollen Paarungen zweier dieser Stoffe (inkl. Haut).
HILFE: Internet bzw. KI, wenn clever formulierte Frage
- 5) *Berechnet*, wie stark die (Gleit-)Reibungskraft ist, welche der Bewegung des hinunterrutschenden Menschen – jeweils ohne bzw. mit langer Kleidung – entgegenwirkt. *Berechnet* dann die jeweils verrichtete Reibungsarbeit auf einer 10 m langen Notrutsche.
- 6) *Begründe* zu Hause, warum der Temperaturanstieg beim Rutschen ohne lange Kleidung größer ist als mit langer Kleidung. *Beurteile* die Seriosität des Artikels erneut.



DERWESTEN

ESSEN DORTMUND NRW S04 BVB SPORT PANORAMA POLITIK FREIZEIT

VERMISCHTES

Urlaub in Spanien, Griechenland & Co.: Warum du im Flieger nie ein T-Shirt tragen solltest

von Daniel Sobolewski
14.09.2024 - 11:24 Uhr

Vor dem Urlaub in Spanien, Griechenland & Co. solltest du dir genau überlegen, was du im Flugzeug für Kleidung trägst.

Um in den Urlaub in Spanien, Griechenland & Co zu kommen, wählen die meisten Menschen das Flugzeug. Im Gegensatz zum Auto geht das schnell und ist entspannter. Erst recht, wenn man sich gemütliche Klamotten anzieht.

Auf das Tragen eines T-Shirts solltest du bei der Flugreise in den Urlaub nach Spanien, Griechenland & Co aber verzichten. Das zumindest ist die dringende Empfehlung einer erfahrenen Flugbegleiterin.

Urlaub in Spanien, Griechenland & Co.: Niemals im T-Shirt ins Flugzeug steigen

Du denkst nun vermutlich an die Klimaanlage-Luft und eine drohende Erkältung. Das ist aber nicht der Grund, warum man tunlichst auf ein T-Shirt verzichten sollte. Dem britischen Portal „Whowhatwear“ erklärt eine Flugbegleiterin: Im Ernstfall kannst du dich durch das Tragen eines kurzärmeligen Oberteils ernsthaft verletzen.

Andrea Fischbach arbeitet in Maschinen von American Airlines, einer der größten Fluggesellschaften der Welt. Sie kennt sich aus – und kennt auch die Tücken einer falschen Kleiderwahl im Flieger. Mit einem T-Shirt, einem anderen kurzärmeligen Oberteil oder auch einer kurzen Hose beziehungsweise Rock drohen unangenehme, schmerzhafte, wenn nicht gar gefährliche Verletzungen.

Verbrennungen drohen

Nämlich dann, wenn ein Flugzeug nach einer Notlandung über die Notrutsche evakuiert werden muss. Beim Rutschen erreicht man nämlich schnell mal hohe Geschwindigkeit. Und weil das aufblasbare Teil aus Nylongewebe ist, drohen bei nackten Hautstellen Abschürfungen und Verbrennungen. „Notrutschen sind kein Spaß und tun weh – und zwar sehr weh. Und wenn man das Ende der Rutsche erreicht hat, ist die Landung nicht sanft“, erklärt Fischbach.

(Sobolewski, 2024)

Dies ist der Stundenverlaufsplan des ersten Unterrichtsentwurfs zum „Luftloch“.

Phase (Zeit)	Unterrichtsinhalt & Handlungen	Sozialform/ Methode	Materialien/ Medien
1. Stunde			
Einstieg/ Motivation/ Kontextsetzung (5 min)	Lehrkraft zeigt Video¹ von Startabbruch (äußere Perspektive) Lehrkraft fragt nach Beobachtungen Lernende erkennen Startabbruch bzw. beschreiben diesen Lehrkraft zeigt Video² von Startabbruch (innere Perspektive) Lehrkraft fragt nach Beobachtungen bzgl. der Bewegungen, die die Passagiere im Moment des Startabbruches machen Lernende beschreiben erst ein „sich weiter nach vorne Bewegen der Passagiere trotz Bremsen des Flugzeuges“ und dann ein „doch sehr ruckartiges Abbremsen der Passagiere vor dem Vordersitz“	im Plenum / Unterrichtsgespräch bzw. Fragen-entwickelnder Unterricht	- / Beamer, Lautsprecher, Tablet von Lehrkraft
Erarbeitung (25 min)	Lehrkraft weist kurz in folgenden Arbeitsauftrag ein und stellt Arbeitsblätter sowie Materialien zur Verfügung Lernende entwickeln bzw. modellieren die Flugzeug-Passagier-Bewegungen mittels Eiern und durchsichtigen Kisten und nehmen ihre Experimente mittels Bewegungs-Analyse-App auf den Tablets auf	Gruppenarbeit / geführtes Experimentieren bzw. teilweises Modellieren	Arbeitsblatt ³ , Eier, durchsichtige Kisten / Tablets der Lernenden (inkl. Bewegungs-Analyse-App)

Sicherung (10 min)	eine (zufällige) Gruppe stellt ihre Videos, v-t-Diagramme und Überlegungen zu Aufgabe 3 (Sinn von Sicherheitsgurten) des Arbeitsblattes vor Lehrkraft greift ggfs. in Vorstellung ein und korrigiert inhaltlich Lernende ergänzen ggfs. ihre Aufschriften inhaltlich während der Besprechung	im Plenum / Vorstellungen der Arbeitsergebnisse der Gruppen	- / Beamer, Tablets der Lernenden
Aufräumen (5 min)	Lernende hinterlassen ihre Arbeitsplätze sauber und trocken	Gruppenarbeit / Arbeitsteilung und Verantwortungs-übernahme	Eier, durchsichtige Kisten / Tablets der Lernenden (inkl. Bewegungs-Analyse-App)

2. Stunde

Einstieg/ Wiederholung (5 min)	Lernende stellen Wiederholungs-Fragen an die Klasse zu den Erkenntnissen der letzten Stunde Lehrkraft greift evtl. ein und stellt wichtige Fragen, die von den Lernenden nicht gestellt wurden	im Plenum / Lernende befragen sich selbst bzw. gegenseitig	- / -
Einführung/ Erarbeitung (15 min)	Lehrkraft zeigt mehrere Bilder von verschiedenen Kontexten, in denen Körper beschleunigt oder verzögert wurden, und fragt nach der Ursache Lernende antworten wahrscheinlich so etwas wie: „Berührung des Körpers mit einem anderen Körper, welcher den Ursprungskörper drückt oder an ihm zieht (also eine Kraft auswirkt)“ Lehrkraft erstellt Zeichnung ⁵ von Situation mit Ei und Kasten bzw. mit Passagier und Flugzeug und zeichnet mit Hilfe der Beiträge der Lernenden die Kräfte bzw. Beschleunigungen ein	im Plenum / physikalische Gemeinsamkeiten in Bildern finden	- / Beamer, Tablet von Lehrkraft, Fotoreihe ⁴

Sicherung/ Regelformulierung (5 min)	Lehrkraft fragt nach Zusammenhang zwischen Kraft und Beschleunigung erwartete Antwort der Lernenden: „Kraft ist Ursache von Beschleunigung“ Lehrkraft lenkt und formuliert dies in den Worten des zweiten Newton'schen Axioms: „Beschleunigung ist proportional zu einwirkender Kraft (mit Masse als Faktor), Richtungen von Beschleunigung und Kraft sind identisch, $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$“	im Plenum / gemeinsame Erarbeitung bzw. Formulierung einer neuen Regel	- / Beamer, Tablet von Lehrkraft
Spezialisierung (10 min)	Lehrkraft zeigt Arbeitsauftrag⁶ an der Tafel und erläutert ihn kurz Lernende suchen beispielhaft Momente bzw. Zeiträume aus ihren Videos, in denen eine konstante Geschwindigkeit des Eies zu beobachten ist, und erkennen, dass genau dann keine Kraft auf das Ei durch einen anderen Körper wirkte Lernende formulieren Spezialfall von zweitem Newton'schem Axiom	Gruppenarbeit / Analyse der selbstgedrehten Videos durch Finden von Spezialfällen	- / Beamer, Tablet von Lehrkraft, Arbeitsauftrag bzw. Tafelbild, Tablets der Lernenden (inkl. Bewegungs-Analyse-App)
Sicherung/ Regelformulierung (10 min)	Lernende stellen ihre Ergebnisse vor (Zeitraum im Video und spezifizierte Regel) Lehrkraft ergänzt während der Besprechung des Arbeitsauftrages den Namen des Spezialfalls als „erstes Newton'sches Axiom“ Lernenden übernehmen die Formulierung der vorstellenden Gruppe bzw. gleichen diese mit ihrer selbst-gewählten Formulierung ab	im Plenum / Vorstellung der Ergebnisse einer Gruppe und (gemeinsame) Formulierung einer neuen Regel	- / Beamer, Tablets der Lernenden (inkl. Bewegungs-Analyse-App)

3. Stunde

Einstieg/ Motivation/ Kontextsetzung (5 min)	Lehrkraft zeigt Video ⁷ von „im Luftloch absackendem Flugzeug“ und motiviert damit die Stunde	im Plenum / Motivation zur Beschäftigung mit „Alltagsbeispiel“	- / Beamer, Lautsprecher, Tablet von Lehrkraft
---	--	--	--

Erarbeitung (25 min)	Lehrkraft weist kurz in folgenden Arbeitsauftrag ein und stellt Arbeitsblätter sowie Materialien zur Verfügung Lernende entwickeln bzw. modellieren die Flugzeug-Passagier-Bewegungen mittels Eiern und durchsichtigen Kisten und nehmen ihre Experimente mittels Bewegungs-Analyse-App auf den Tablets auf (diesmal inkl. zusätzlicher Beschleunigung nach unten durch vertikalen Windstoß/“Luftloch“)	Gruppenarbeit / geführtes Experimentieren bzw. teilweises Modellieren	Arbeitsblatt ⁸ , Eier, durchsichtige Kisten / Tablets der Lernenden (inkl. Bewegungs-Analyse-App)
Sicherung (15 min)	Besprechung der Ergebnisse des Arbeitsblattes und des Experiments, indem einzelne Lernende ihre Ergebnisse präsentieren Lehrkraft betont an geeigneter Stelle während der Besprechung die Gewichtskraft F_G und die Erdbeschleunigung g (bzw. Lehrkraft fragt danach) Lehrkraft betont an geeigneter Stelle während der Besprechung die unterschiedlichen Bezugssysteme und die unterschiedlichen Beobachtungen daraus (bzw. Lehrkraft fragt danach) nach Besprechung von Aufgabe 5 gemeinsames Formulieren eines Merksatzes über Bezugssysteme bzw. verschiedene Beobachtungen von verschiedenen Standpunkten	im Plenum / Vorstellungen der Arbeitsergebnisse der Gruppen und gemeinsame Formulierung eines Merksatzes	- / Beamer, Tablets der Lernenden, Dokumentenkamera

¹ (GaboAir, 2021a)

² (GaboAir, 2021b)

³ Das Arbeitsblatt bzw. die Erläuterungen dazu folgen im Anhang bzw. im folgenden Unterkapitel 5.1.3.

⁴ Die Fotoreihe zum Zusammenhang von Beschleunigung und Kraft – inkl. kurze Erläuterung – folgt im Unterkapitel 5.1.3.

⁵ Das Tafelbild zum Ablauf des Experiments und dem Zusammenhang von Beschleunigung und Kraft folgt im Unterkapitel 5.1.3.

⁶ Der Arbeitsauftrag zur Spezialisierung des zweiten Newton'schen Axioms folgt im Unterkapitel 5.1.3.

⁷ (Brahaj, 2019)

⁸ Das Arbeitsblatt bzw. die Erläuterungen dazu folgen im Anhang bzw. im folgenden Kapitel 5.1.3.

Dies ist der Stundenverlaufsplan des zweiten Unterrichtsentwurfs zur „Notrutsche“.

Phase (Zeit)	Unterrichtsinhalt & Handlungen	Sozialform/ Methode	Materialien/ Medien
1. Stunde			
Einstieg/ kritisches Hinterfragen/ Kontextsetzung (5 min)	Lehrkraft zeigt Überschrift und Design des Artikels¹ zum Tragen langer Kleidung im Flugzeug und fragt nach spontaner Einstellung der Lernenden zur Seriosität des Artikels Lernende geben ihre Meinung und Empfindung zur Seriosität des Artikels ab und begründen diese kurz	im Plenum / Unterrichtsgespräch bzw. Fragen-entwickelnder Unterricht	- / Beamer, Tablet von Lehrkraft
Einarbeitung / Problem verstehen (10 min)	Lehrkraft weist kurz in folgenden Arbeitsauftrag (Aufgabe 1 & 2) ein und stellt Arbeitsblatt zur Verfügung Lernende formulieren und begründen schriftlich ihre Einstellung bzgl. des Artikels nach Lesen des ganzen Artikels Lernende entwickeln Fragestellungen und Experiment-Ideen bzgl. der gemachten Aussagen im Artikel zur Reibung, welche sich anschließend im Unterricht überprüfen lassen	Partnerarbeit / kritisches Hinterfragen von Medien, Entwickeln von Fragen und Experimenten zur Überprüfung	Arbeitsblatt ² / -

Zwischen- besprechung/ Kontextsetzung (10 min)	Lehrkraft fragt erneut nach Einstellungen zum Artikel nach Lesen des Artikels und nach ersten Fragestellungen bzw. Ideen für Experimente, um diese zu überprüfen Lernende melden sich und äußern sich entsprechend Lehrkraft koordiniert das Sammeln der Vorschläge der Lernenden und schreibt nur einige wenige Fragestellungen und Experiment-Ideen zusammengefasst und kategorisiert an die digitale Tafel (Lenkungsfunktion der Lehrkraft hin zum Thema „Reibung(skräfte/-sarbeit)“ und „Temperaturentwicklung/-erhöhung“ – nur falls nötig) Lehrkraft zeigt beispielhaftes Video³ einer Flugzeug-Evakuierung über die Notrutschen, um erneut Kontext zu setzen und für folgende Aufgabenstellung womöglich Erinnerungen an schiefe Ebenen und Reibung(skräfte) zu wecken	im Plenum / Sammeln von Arbeitsergebnissen	- / Beamer, Lautsprecher, Tablet von Lehrkraft
Recherche von alten Informationen (10 min)	Lehrkraft weist kurz in folgenden Arbeitsauftrag (Aufgabe 3) ein Lernende sammeln aus ihren Erinnerungen und ihren (alten) (Regel-)Heften Informationen zur Reibung, (Gleit-)Reibungskraft, Formeln wie $\vec{F}_{GR} = \mu_{GR} \cdot \vec{F}_N$, Koeffizienten wie den (Gleit-) Reibungskoeffizienten μ_{GR}, Zeichnungen von schiefen Ebenen inkl. der Normalkraft $\vec{F}_N$, etc.	Partnerarbeit / Sammeln und Recherchieren von (alten, bereits gelernten) Informationen	Arbeitsblatt / -
Sicherung/ Erinnerung schaffen (10 min)	Lernende melden sich und tragen jeweils einzelne Erinnerungen/Informationen zum bisher Gelernten bei Lehrkraft notiert diese in geeigneter Form in einem übersichtlichen Tafelbild⁴ Lernende übernehmen die ihnen jeweils fehlenden Informationen in ihr Heft, sodass sie damit in der kommenden Stunde weiterarbeiten können	im Plenum / Sammeln von Arbeitsergebnissen	- / Beamer, Tablet von Lehrkraft

2. Stunde

Einstieg/ Wiederholung (5 min)	Lehrkraft zeigt Tafelbild der letzten Stunde zur Wiederholung des Themas der (Gleit-)Reibungskraft und fragt, wie die Reibungsarbeit nun berechnet werden kann Lernende melden sich vielleicht mit allgemeineren und bekannteren Äußerungen wie $W = \vec{F} \cdot \vec{s}$ Lehrkraft lenkt und fragt, was im Zusammenhang des Hinunterrutschens auf der Notrutsche nun die Strecke $\vec{s}$ und die Kraft $\vec{F}$ ist Lernende benennen die schiefe Rutschenlänge als Strecke $\vec{s}$ und die (Gleit-)Reibungskraft als die entlang der Strecke $\vec{s}$ (entgegen-) wirkende Kraft $\vec{F}$ Lehrkraft bzw. Lernende notieren diese Erkenntnisse zusammen auf der (digitalen) Tafel bzw. in ihren Heften⁴	im Plenum / Unterrichtsgespräch bzw. Fragen-entwickelnder Unterricht	- / Beamer, Tablet von Lehrkraft
Recherche von neuen Informationen/ Erarbeitung (10 min)	Lehrkraft weist kurz in folgenden Arbeitsauftrag (Aufgabe 4 & 5) ein Lernende recherchieren Materialien von Haut, Kleidung sowie Notrutsche und die (Gleit-) Reibungskoeffizienten zwischen sinnvollen Paarungen dieser Materialien Lehrkraft geht durch die Reihen und fordert/fördert ggfs. (sinnvolleres) Formulieren von Fragen für die KI Lernende berechnen die (Gleit-) Reibungskräfte und die daraus folgenden Reibungsarbeiten	Partnerarbeit / Sammeln und Recherchieren von (neuen, fremden) Informationen, Berechnen von physikalischen Größen	Arbeitsblatt / Tablets der Lernenden (inkl. KI-Funktion)

Ergebnis- besprechung/ Sicherung (10 min)	Lernende stellen ihre Recherche- und Rechenergebnisse selbst an der digitalen Tafel vorne vor Lehrkraft und andere Lernende ergänzen oder korrigieren ggfs.	im Plenum / gemeinsame Besprechung der Arbeitsergebnisse	- / Beamer, Tablet von Lehrkraft
Kontextsetzung, Experiment (10 min)	Lehrkraft zeigt zusammengefasste Fragestellungen und Experiment-Ideen der Lernenden aus der letzten Stunde und stellt dazu die mitgebrachten Utensilien vor (wahrscheinlich passend zu den Vorstellungen der Lernenden) Lernende helfen bei von Lehrkraft angeleitetem Demonstrations-Experiment (Wärmebild-Kamera bzw. Tablet halten, schiefe Ebene und Gewicht mit verschiedenen Bezügen beziehen, Experiment durchführen, Beobachtungen der Temperaturerhöhung notieren, ...)	im Plenum / gemeinsames und angeleitetes Experimentieren	schiefe Ebene, Nylon-Oberfläche, Gewicht, Baumwollen-Bezug, Haut-ähnlichen Gummi-Bezug / Beamer, Tablet von Lehrkraft, Wärmebild-Kamera
Interpretation des Experiments/ Kontextsetzung (10 min)	Lernende und Lehrkraft vergleichen zusammen die beiden Temperaturentwicklungen zwischen dem Haut-Notrutsche- und dem Baumwolle-Notrutsche-Durchgang des Experiments Lehrkraft fragt nach Grund für stärkere Temperaturentwicklung bei Haut-Notrutsche-Durchgang Lernende erkennen und benennen Zusammenhang zwischen mehr verrichteter Reibungsarbeit und stärkerer Temperaturentwicklung (makroskopisch) Lehrkraft zeigt erneut Video zur Flugzeug-Evakuierung über die Notrutschen und fragt, warum Passagiere ihre Hände beim Rutschen hochnehmen Lernende beantworten diese Frage sicherlich mit Leichtigkeit	im Plenum / gemeinsame Diskussion über Experimentausgang, Anwenden der gewonnenen Erkenntnisse auf Kontext bzw. Beispiel	- / Beamer, Lautsprecher, Tablet von Lehrkraft

	<i>Lehrkraft gibt Hausaufgabe (Arbeitsblatt, Aufgabe 6) zur wiederholenden – aber auch vertieften – Erklärung des erkannten Zusammenhangs (mikroskopisch) und zur erneuten Beurteilung der Seriosität des Artikels</i>		
--	--	--	--

¹ Der Beginn dieses Artikels, inkl. Betrachtung von Überschrift und Design, folgt im Unterkapitel 5.2.3.

² Das Arbeitsblatt bzw. die Erläuterungen dazu folgen im Anhang bzw. im folgenden Unterkapitel 5.2.3.

³ (davidicusb, o. J.) – Minute 2:14-3:19 ausreichend

⁴ Das Tafelbild zur Zusammenfassung des bisherigen Kenntnisstandes zum Thema Reibungskräfte, inkl. der Ergänzung zur Reibungsarbeit nach Besprechung im Plenum, folgt im Unterkapitel 5.2.3.