

The logo for Apex Explorer is centered on a white rounded rectangle. It features a blue arch that starts on the left, peaks in the middle, and ends on the right. The word "Apex" is written in blue, with the 'A' and 'x' overlapping the arch. The word "Explorer" is written in red, with the 'E' overlapping the arch.

# Apex Explorer

Version für die Lehrkräfte

# Bildergalerie



Rakete mit Fallschirm

| Daten der Rakete |                            |
|------------------|----------------------------|
| Länge            | 60cm                       |
| Gewicht          | 200g                       |
| Flughöhe         | 60m<br>(kleiner Treibsatz) |
|                  | 200m<br>(großer Treibsatz) |



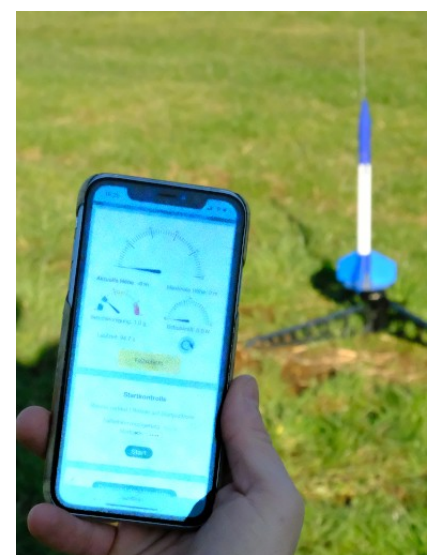
Vorbereiten der Rakete



Verpackung



Verbindung mit dem Laptop



Steuerung über ein Smartphone



Start der Rakete

# Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Bildergalerie.....  | 2  |
| Einleitung.....   | 3  |
| Quick-Reference-Guide.....                                  | 4  |
| Hinweise für die Lehrkraft.....                             | 5  |
| Materialien.....  | 5  |
| Startcode für die Rakete.....                               | 5  |
| Rechtliche Informationen.....                               | 5  |
| Luftfahrtsrecht.....  | 5  |
| Sprengstoffverordnung.....                                  | 6  |
| Gefährdungsbewertung und Zustimmung der Eltern.....         | 6  |
| Anforderungen an die Gruppenarbeit.....                     | 7  |
| JPL- Jet Propulsion Lab.....                                | 7  |
| FC- Flight Control.....                                     | 7  |
| MU- Metrological Unit.....                                  | 8  |
| MC- Mission Control.....                                    | 8  |
| PR- Public Relations.....                                   | 8  |
| Verwendung der Anleitungen.....                             | 9  |
| Checklisten.....  | 9  |
| Anleitung (die kleine).....                                 | 9  |
| Anleitung für die Lehrkräfte.....                           | 9  |
| Physikalisch-Technische Informationen zu den Messungen..... | 10 |
| Höhenmessung.....   | 10 |
| Beschleunigung Vertikal.....                                | 11 |
| Geschwindigkeit – vertikal.....                             | 11 |
| Schubkraft.....   | 11 |
| Beschleunigung – im Bezugssystem der Rakete.....            | 12 |
| Beschleunigung- vektoriell.....                             | 12 |
| Einen geeigneten Startplatz finden.....                     | 13 |
| Ein eigener Fußballplatz.....                               | 13 |
| Im freien Feld.....   | 13 |
| Zeitplanung.....  | 14 |
| Gefährdungsbeurteilung.....                                 | 16 |
| Arbeitsblätter.....   | 18 |
| Übersicht.....  | 18 |
| Kinematik.....  | 19 |
| Beschleunigung.....   | 20 |
| 2. Newton'sches Axiom.....                                  | 21 |
| Impuls.....   | 23 |
| Energie.....  | 25 |
| Formulare.....  | 26 |
| Erlaubnis für Bild- und Videoaufnahmen.....                 | 26 |
| Erlaubnis für minderjährige SchülerInnen.....               | 27 |
| Technische Hinweise.....                                    | 28 |
| Allgemeine Sicherheitshinweise.....                         | 28 |
| Entsorgung und Recycling.....                               | 28 |
| Kontaktdaten.....   | 28 |

## Quick-Reference-Guide

Hier finden Sie eine komprimierte Übersicht über all die wichtigen Informationen in dieser Anleitung, ...

- ... an die man sich nicht mehr ganz genau erinnert, aber weiß, dass sie wichtig waren.
- ... die gerne übersehen/überlesen werden.
- ... sonst keinen guten Ort gefunden haben um pointiert genannt zu werden.

|   |   |
|---|---|
| <b>Startcode</b>                                  | Der Startcode ist <b>1957</b>   |
| <b>Verbindung mit der Rakete</b>                  | Das WLAN der Rakete hat denselben Namen wie die Rakete (mit Unterstrichen statt Leerzeichen).<br>Die Webseite zur Steuerung der Rakete lautet:<br><b>Name_der_Rakete.local</b>  |
| <b>Materialien</b>                                | Alle Materialien, die in dieser Anleitung erwähnt sind, finden Sie unter:<br><b><a href="https://raketenwerkstatt.de/materialien/">https://raketenwerkstatt.de/materialien/</a></b>   |
| <b>Arbeitsblätter</b>                             | Auch wenn Ihre Rakete noch nie geflogen ist befinden sich schon Daten eines Beispielfluges im Speicher. Aus diesen kann ein Beispielarbeitsblatt erzeugt werden.  |
| <b>Vorführversuch</b>                             | Wenn Sie die Rakete ohne Beteiligung der Schüler starten wollen können Sie den <b>Quick-Start-Guide</b> (S.9) verwenden. Davor sollten Sie aber die Schüleranleitung durchgelesen haben.  |
| <b>Anzahl der Gruppen</b>                         | Für einen Start durch die SchülerInnen reichen die Gruppen JPL und FC aus. Die anderen Gruppen sind nicht zwingend notwendige Unterstützung dieser Gruppen.   |
| <b>Raketenflug filmen</b>                         | Eine Person sollte auf jeden Fall den Flug der Rakete vom Start bis zur Landung filmen. Möglichst von einem weiter entfernten Standpunkt aus. Vor dem Bearbeiten der Arbeitsblätter können so die Details Ihres Fluges in Erinnerung geholt werden.   |
| <b>Vorsicht bei Entfernen der Sicherungskappe</b> | Überprüfen Sie vor dem Entfernen der Sicherungskappe des Fallschirms (siehe rechts), dass die Klappe der Fallschirmbucht auch wirklich verschlossen ist. Sie erkennen dies auf der Webseite daran, dass der Button "Fallschirm" <b>gelb</b> ist.<br>Sinnvoll ist es zusätzlich die Klappe mit den Händen festzuhalten und langsam mit Gefühl loszulassen. |



# Hinweise für die Lehrkraft

## Materialien

Sie finden alle Materialien des ApexExplorers (auch) auf der Homepage unter:

**<https://raketenwerkstatt.de/materialien/>**

## Startcode für die Rakete

Damit Sie sichergehen können, dass niemand die Rakete ohne Freigabe (durch Sie) startet wird ein vierstelliger Startcode benötigt. Dieser ist das Jahr, in dem Sputnik gestartet wurde: **1957**

## Rechtliche Informationen

Der Raketenversuch berührt zwei Rechtsgebiete, mit denen man im Schulalltag nur wenig in Berührung kommt: Die Sprengstoffverordnung und das Luftfahrtsrecht.

### Luftfahrtsrecht

Durch die zunehmende Verwendung von Drohnen wurde das Luftfahrtsrecht 2021 um die [EU-Drohnenverordnung](#) erweitert. Da dieses Gesetz aber Behörden grundsätzlich von den Einschränkungen ausnimmt, treffen die Einschränkungen aus der Drohnenverordnung nicht auf Sie zu, wenn Sie die Rakete im schulischen Kontext starten.

Eingeschränkt werden Sie daher nur noch durch die deutsche Luftverkehrs-Ordnung. Hier regelt besonders der § 21h<sup>1</sup> unter welchen Bedingungen unbemannte Fluggeräte den Luftraum nutzen dürfen. Folgende Bedingungen werden dabei aufgestellt:

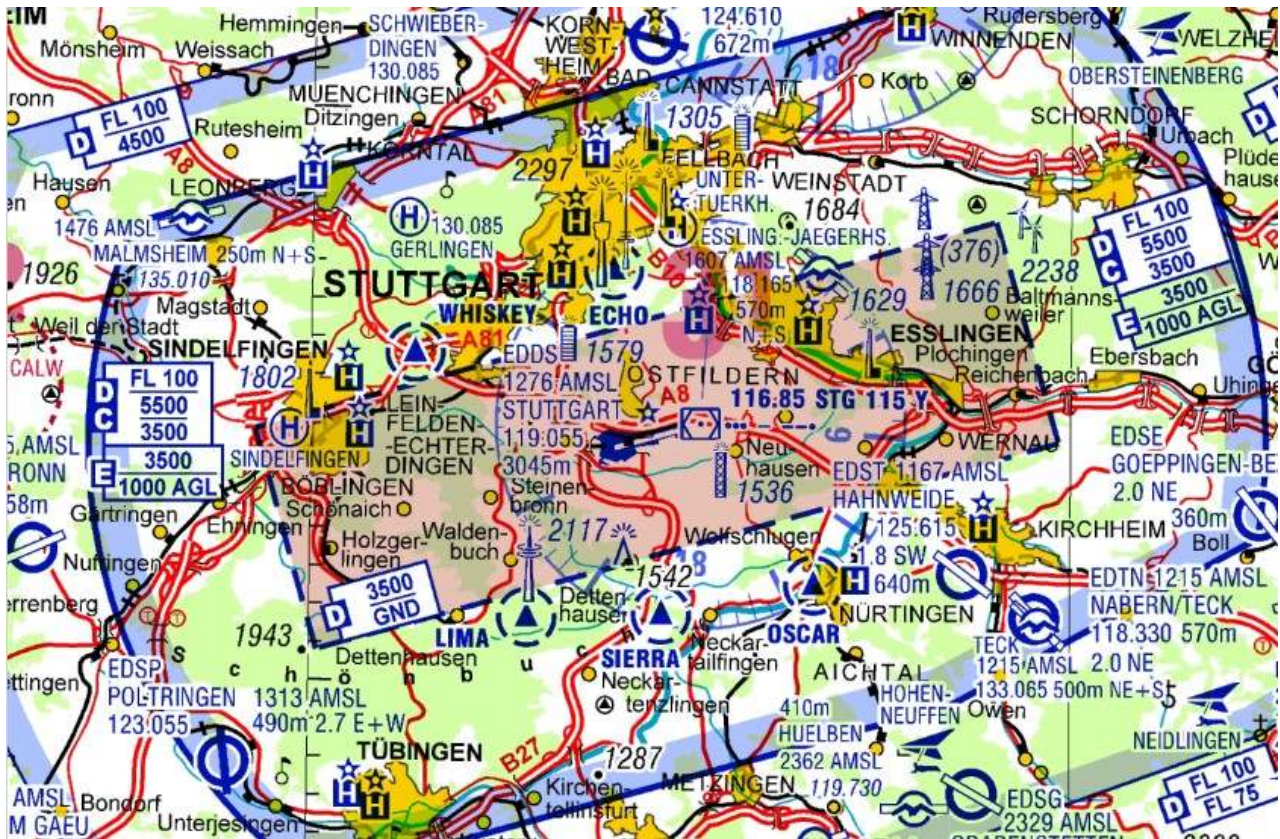
- 1500 m Abstand zu Flugplätzen, 5 km von Flughäfen
- 100 m Abstand zu Industrieanlagen, Gefängnissen, Anlagen der Energieerzeugung und Energieverteilung
- 100 m Abstand zu Grundstücken der Verfassungsorgane und von diplomatischen Organisationen (Botschaften, UN, Konsulate)
- 100 m Abstand zu Bundesfernstraßen, Bundeswasserstraßen und zu Bahnanlagen

Verboten ist das Verwenden der Rakete in Naturschutzgebieten und über Flächen mit Menschenansammlungen.

Zusätzlich darf Ihre Rakete nicht in den kontrollierten Luftraum eindringen. Dieser kontrollierte Luftraum ist im Prinzip der Bereich, in dem die Flugsicherung (der "Tower") die Organisation der Flugbewegungen übernimmt. Im ganz überwiegenden Teil beginnt dieser Flugraum bei deutlich über 1000 m. In der Nähe von Flugplätzen und Militäranlagen kann der kontrollierte Luftraum aber auch bis zum Boden reichen. Auf Anfrage schicke ich Ihnen gerne eine Karte des Luftraums in Ihrer Umgebung zu, auf dem Sie sehen können, ob es in ihrer Nähe Bereiche mit kontrolliertem Luftraum bis zu Boden gibt (siehe Abbildung).

Da Sie aber die Rakete überall dort fliegen lassen dürfen, wo auch Drohnen fliegen dürfen, bietet Ihnen dieser Link einen schnellen Überblick über die Situation um die größten deutschen Flughäfen: <https://www.dfs.de/homepage/de/drohnenflug/karten-flughaefen/>

1 [https://www.gesetze-im-internet.de/luftvo\\_2015/\\_\\_21h.html](https://www.gesetze-im-internet.de/luftvo_2015/__21h.html)



Beispielhaft sehen Sie hier den kontrollierten Luftraum um den Flughafen Stuttgart. Nur im roten Rechteck geht der kontrollierte Luftraum bis auf den Boden (GND).

## Sprengstoffverordnung

Die Treibsätze der Rakete sind in der freiverkäuflichen Kategorie P1. Das bedeutet, dass Sie nur von Erwachsenen gekauft werden dürfen. Ein Zünden durch Jugendliche ab 14 Jahren ist nur unter Aufsicht eines Erwachsenen erlaubt. Kinder unter 14 Jahren dürfen die Treibsätze nicht verwenden. Eine Erlaubnis der Eltern ist bei Minderjährigen notwendig. Da nur die Mitglieder des Teams JPL mit den Treibsätzen hantieren benötigen nur minderjährige Mitglieder dieses Teams eine Erlaubnis. Dies ist auf dem Elternerlaubnisformular für das Raketenprojekt bereits berücksichtigt.

Zusätzlich verbietet das Sprengstoffgesetz pyrotechnische Gegenstände, in diesem Fall die Raketentreibsätze, „in unmittelbarer Nähe von Kirchen, Krankenhäusern, Kinder- und Altersheimen sowie Reet- und Fachwerkhäusern“ abzubrennen<sup>2</sup>. Unmittelbare Nähe ist nicht näher definiert. Der normale Sicherheitsabstand den Sie sowieso einhalten genügt.

Das Sprengstoffgesetz schränkt Sie praktisch also nur ein, falls Sie SchülerInnen unter 14 Jahren in Ihrer Klassen haben. Dann dürfen diese nicht im Team JPL sein.

## Gefährdungsbewertung und Zustimmung der Eltern.

Auf Seite 16 finden Sie eine auf das Raketenprojekt abgestimmte Gefährdungsbeurteilung.

In den digitalen Daten finden Sie Kopiervorlagen für die elterliche Erlaubnis minderjähriger TeilnehmerInnen. Weil die Teams unterschiedlichen Risiken ausgesetzt sind wird auf der Erlaubnis zwischen den verschiedenen Teams unterschieden. Eine Abbildung dieser Elternerlaubnis ist in dieser Anleitung auf Seite 32 abgebildet.

## Anforderungen an die Gruppenarbeit

Wenn Sie den ApexExplorer ohne aktive Beteiligung von SchülerInnen durchführen wollen verwenden Sie am besten den **Quick-Start-Guide** (S.9). Um das Raketenprojekt von SchülerInnen selbst erfolgreich durchführen zu lassen werden eigentlich nur zwei Gruppen- JPL und FC- benötigt. Die anderen Gruppen sind sinnvolle, aber nicht notwendige Ergänzungen dieser Teams.

### JPL- Jet Propulsion Lab

Das Jet Propulsion Laboratory (JPL; englisch für Strahlantriebslabor) baut und steuert Satelliten und Raumsonden für die NASA. Daher ist dieses Team für die Technik der Rakete verantwortlich.

Die Aufgabe dieses Teams ist es eine funktionsfähige Rakete zur Verfügung zu stellen. Dazu gehört insbesondere:

- Die Funktionsweise der Rakete verstehen.
- Die Rakete zusammen und auseinander bauen.
- Den Fallschirm einwickeln und in die Rakete einsetzen.
- Die Treibsätze ein- und ausbauen.

Darüber hinaus kann das Team die optimale Verzögerungszeit für den Fallschirm auch selber bestimmen. (Empfohlene Werte: 6,5s für den C6-Treibsatz). Wenn das Team diese Zeit selber bestimmen will oder soll, so erfordert dies folgende zusätzliche Schritte:

- Die Flugbahn mit einem Computerprogramm simulieren.
- Verschiedene Auslösezeiten simulieren.
- Ein Optimum zwischen langer Freiflugphase und sicherem Abstand vom Boden bestimmen.
- Simulierte Höhenprofile zur späteren Analyse speichern/ausdrucken.

Nach dem Flug kann das Team das tatsächlich geflogene Höhenprofil mit den simulierten Höhenprofil vergleichen.

Die Gruppenmitglieder sollten handwerklich geschickt sein und die Schritte in der Anleitung gewissenhaft ausführen können. Diese Gruppe macht den gefährlichsten Job und sie können bei grober Fahrlässigkeit auch andere gefährden. SchülerInnen mit wirklichem Interesse an Raumfahrt sind in dieser Gruppe am glücklichsten.

**Die Farbe des Teams JPL ist **Gelb**.**

### FC - Flight Control

Das Team FC ist für die Durchführung und Aufzeichnung des Experimentalflugs zuständig. Dazu gehören das Starten und die Bergung der Rakete sowie die Aufnahme der Flugbahn und das Sichern der Flugdaten. Das Team muss die Rakete kontrollieren und ansteuern können. Dazu gehören:

- Verbindung zwischen Tablet und Rakete herstellen
- Fallschirm auslösen und verschließen
- Verzögerungszeit einstellen
- Funktionsfähigkeit der Sensoren kontrollieren
- Flugdaten anzeigen
- Arbeitsblätter herunterladen
- Starten der Rakete

Die Gruppenmitglieder sollten möglichst erfahren im Umgang mit Computern sein. Wenn diese Gruppe nicht zuverlässig arbeitet könnte es sein, dass am Ende des Raketenflugs das Arbeitsblatt nicht erzeugt wurde.

**Die Farbe des Teams FC ist **Grün**.**

## MU- Metrological Unit

Dieses Team ist dafür zuständig, dass um die Rakete herum alles sicher ist. Zu diesem drumherum gehört vor allem das Wetter und der Ort an dem der Raketenflug stattfinden soll.

In der Vorbereitungsphase besorgt sich die MU die benötigten Informationen, um eine möglichst solide Wettervorhersage für den Flugtag zu erstellen. Augenmerk liegt dabei vor allem auf den zu erwartenden Windgeschwindigkeiten. Die MU gibt im Vorfeld das GO, ob ein Start am anvisierten Flugtag möglich ist und findet einen möglichen Ersatztermin. Die MU wählt das Flugfeld aus und entscheidet welche Gebiete des Flugfelds sicher sind und welche zum Gefahrengebiet gehören.

Für diese Gruppe sind SchülerInnen gefragt, die zuverlässig selbstständig Aufgaben abarbeiten können.

Diese Gruppe ist gut für SchülerInnen geeignet, deren Leidenschaft nicht unbedingt die Physik ist, sich aber trotzdem Die Farbe des Teams MU ist **Blau**.

## MC- Mission Control

Die Aufgabe der Mission Control ist die Gesamtkoordination des Projekts. Die Teammitglieder müssen darauf achten, dass die anderen Teams sich sinnvoll absprechen und ihre Aufgaben rechtzeitig erledigen. Das Team MC entscheidet, wann welches Team an der Rakete arbeitet.

MC überprüft ob eine Phase abgeschlossen ist und gibt das GO für die nächste Phase.

... und ganz zum Schluss zählt Mission Control den Countdown runter.

Die Mitglieder dieses Teams müssen aktiv auf die Mitglieder der anderen Teams zugehen und Fragen stellen. Daher sollten die Mitglieder dieses Teams nicht zu schüchtern sein und bestenfalls sogar etwas soziales Durchsetzungsvermögen mitbringen ... schließlich sind sie so etwas wie das Management des Raketenprojekts. Die Mitglieder des Teams benötigen nahezu kein Verständnis der technischen und physikalischen Zusammenhänge innerhalb des Raketenprojekts.

Die Farbe des Teams MC ist **Rot**.

## PR - Public Relations

Die Aufgabe des Teams PR ist das Raketenprojekt zu dokumentieren um Außenstehenden einen kurzen Überblick darüber zu geben, was gemacht wurde. Gute Teams schaffen es das Raketenprojekt als spannende Geschichte zu präsentieren.

Ursprünglich war diese Gruppe als "Sammelbecken" für SchülerInnen mit Physikphobie gedacht. Es hat sich aber herausgestellt, dass die Arbeit dieser Gruppe im Nachklang des Raketenprojekts sehr wichtig werden kann. Wenn die Gruppe ein sauberes Video vom Flug der Rakete aufgezeichnet hat bietet dies die Möglichkeit die SchülerInnen vor der Bearbeitung der einzelnen Arbeitsblätter mit Hilfe dieses Videos die Details des Raketenfluges wieder in Erinnerung zu rufen.

**Tipp:** Auch wenn Sie sich entscheiden diese Gruppe nicht zu verwenden lohnt es sich eine Person damit zu beauftragen den Flug der Rakete zu filmen.

Je nach Rahmen in dem das Raketenprojekt stattfindet können Sie die Anforderungen an diese Gruppe auch erweitern und anpassen. Denkbar sind:

- Bericht (Text, Bild, Video) für die Homepage der Schule
- Ein Poster für den Schulflur erstellen
- Artikel in der lokalen Zeitung platzieren

Die Mitglieder dieses Teams sollten sich für Bild und Text begeistern können und selbstständig arbeiten können.

Die Farbe des Teams PR ist **Lila**.

## Verwendung der Anleitungen

Den ApexExplorer zu starten ist eigentlich recht einfach und kann von einer Person innerhalb von wenigen Minuten durchgeführt werden. Wenn es Ihnen nur um den Raketenflug an sich geht, können Sie auf die Gruppenarbeit Ihrer SchülerInnen verzichten und selbst oder mit einigen ausgewählten SchülerInnen einen Schnellstart der Rakete durchführen. Der **Quick-Start-Guide** (QSG) soll Sie bei einem solchen Schnellstart unterstützen. Der QSG ersetzt aber nicht die Lektüre der Anleitungen.

### Quick Start Guide

|   |   |
|---|---|
| <b>Fallschirm</b>                                 | Fallschirm falten und einsetzen<br>Mit Fallschirmsicherung verschließen   |
| <b>Rakete zusammenbauen</b>                       | Finnen anbringen<br><b>Treibsatz einsetzen (Standart: C6-P)</b><br>Zünder einsetzen- Stecker NICHT einstecken                           |
| <b>Startplattform</b>                             | Zusammenbauen & Aufstellen  |
| <b>Rakete aufstellen</b>                          | Rakete auf Führungsstab stecken<br>Rakete einschalten   |
| <b>Verbindung herstellen</b>                      | Mit WLAN <b>Raketen_Name</b> verbinden.<br>Webseite <b>Raketen_Name.local</b> aufrufen  |
| <b>Systemcheck</b>                                | Stabile Verbindung? Reagieren die Sensoren?<br>Fallschirmklappe verschließen (Gelb)   |
| <b>Gefahrenbereich räumen bis auf eine Person</b> |   |
| <b>Scharf machen</b>                              | <b>Sicherungskappe entfernen</b><br>Zünderstecker einstecken  |
| <b>Gefahrenbereich räumen- Alle!</b>              |   |
| <b>Start</b>                                      | <b>Verzögerungszeit einstellen</b> (Standard: 6s)<br>Sicherungscode eingeben<br>Achtungssignal<br>Countdown-> Start                     |
| <b>Rakete und Daten sichern</b>                   | Rakete bergen<br><b>Messdaten herunterladen</b><br>Auf Webseite <b>Flugdiagramme</b> gehen<br><b>Landezeit kontrollieren/einstellen</b> |

raketenwerkstatt.de

## Checklisten

Damit die Rakete sicher von mehreren Menschen, die in verschiedenen Gruppen arbeiten, gestartet werden kann wird der Start über Checklisten organisiert. Jede Gruppe hat ihre eigenen Checklisten.

Die Arbeitsschritte sind dabei sehr kleinschrittig gewählt. Auf den Checklisten steht zu jedem Arbeitsschritt meistens nur ein Stichwort. Welche Tätigkeiten sich hinter diesen Stichworten verbergen wird ausführlich in der Anleitung beschrieben. Sicherheitsrelevante Schritte sind **rot** hinterlegt, missionskritische<sup>3</sup> Schritte sind **blau** hinterlegt.

Die Checklisten sind laminiert, damit sie mit Folienstiften wiederverwendet werden können.

## Anleitung (die kleine)

In dieser Anleitung wird die Rakete detailliert beschrieben. Neben der Technik der Rakete werden auch die Grundlagen des Raketenflugs beschrieben.

Den größten Teil dieser Anleitung nimmt die ausführliche Beschreibung der einzelnen Schritte auf den Checklisten.

## Anleitung für die Lehrkräfte

Die Anleitung die Sie gerade lesen deckt alle Dinge ab, die für Sie als Lehrkraft um den eigentlichen Raketenflug herum interessieren könnte. Neben den rechtlichen Rahmenbedingungen werden die didaktischen Überlegungen hinter den Arbeitsblättern dargelegt.

<sup>3</sup> Missionskritisch: Es besteht die Gefahr, dass die Mission ein Fehlschlag wird, ohne dass die Rakete Schaden nimmt.

# Physikalisch-Technische Informationen zu den Messungen

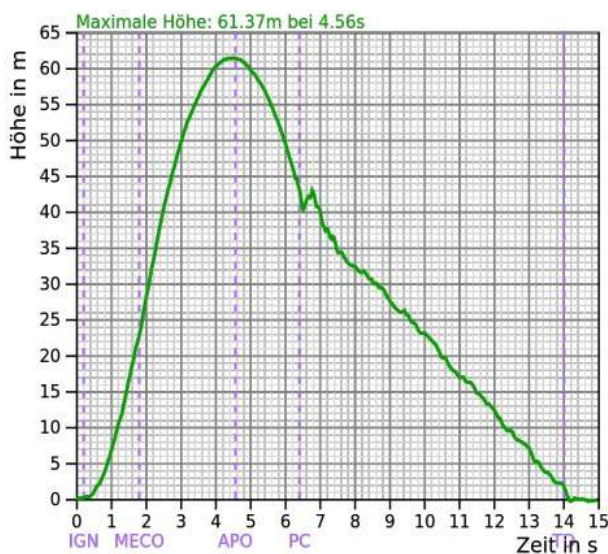
Im folgenden Abschnitt finden Sie Hinweise, wie genau die Diagramme im ApexExplorer erzeugt werden.

In den Graphen sind einige besondere Zeitpunkte lila markiert:

- **IGN (Ignition)**: Der Zeitpunkt der Zündung. Durch die pyrotechnische Zündung gibt es zwischen dem Zündsignal des Mikroprozessors und dem Zeitpunkt an dem das Schwarzpulver des Treibsatzes wirklich gezündet hat einen kurzen Zeitverzug. Der Zeitpunkt wurde in Versuchen empirisch ermittelt und weicht unter Umständen von Ihrem konkreten Versuch etwas ab.
- **MECO (Main Engine Cut Off)**: Der Zeitpunkt an dem der Triebatz ausgebrannt ist und keinen Schub mehr liefert. Ebenfalls empirisch ermittelt. Je nach Treibsatzcharge kann es zu Abweichungen kommen.
- **APO (Apogee)**: Der Zeitpunkt an dem die maximale Höhe erreicht wurde. Dieser Zeitpunkt wird direkt aus den aktuellen Messdaten bestimmt und sollte sehr gut mit ihrem Raketenflug übereinstimmen.
- **PC (Parachute)**: Der Zeitpunkt an dem sich der Fallschirm entfaltet hat. Dies ist ca. 0,5 s nach dem Signal zum Auslösen des Fallschirms der Fall. Je nach aerodynamischer Situation kann der Fallschirm sich allerdings etwas früher oder später voll entfalten.
- **TD (Touch Down)**: Der Zeitpunkt an dem die Rakete wieder auf dem Boden gelandet ist. Dieser Zeitpunkt wird aus den aktuellen Messdaten extrapoliert, da je nach Gelände der Boden am Landepunkt nicht die gleiche Höhe wie die Startplattform hat. Hier sind größere Abweichungen möglich, falls die Rakete deutlich höher oder tiefer landet als sie gestartet ist.

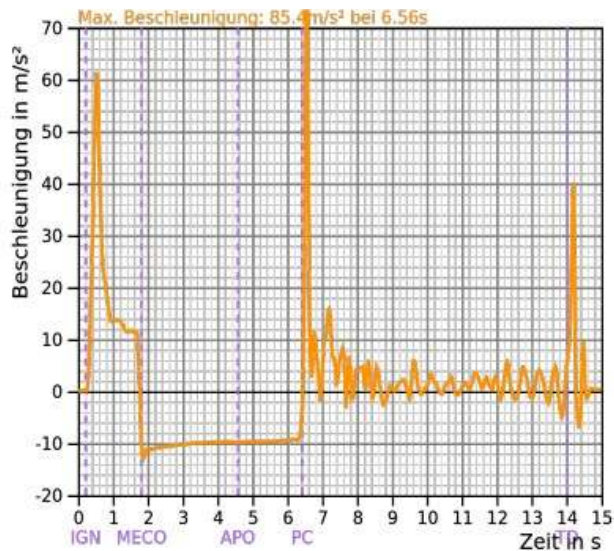
Bei der Erstellung der Graphen wurde versucht einen didaktisch optimalen Mittelweg zwischen direkter Wiedergabe der Messdaten und einer Aufbereitung der Daten für eine bessere Übersichtlichkeit gewählt. Die direkten Messdaten können Sie als csv-Datei von dem ApexExplorer direkt herunterladen und selber auswerten.

## Höhenmessung



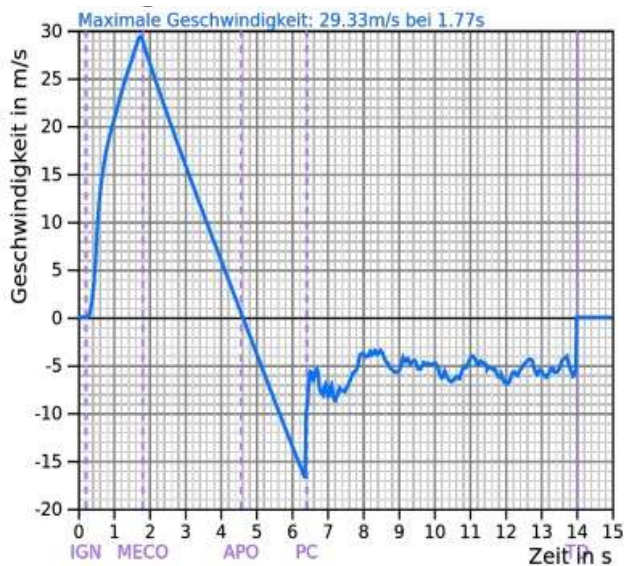
Das Höhendigramm wird durch einen barometrischen Sensor gemessen. Die Bestimmung der Höhe wird dadurch durch die Änderung des Luftdruckes gemessen. Für den relativ kurzen Zeitraum des Raketenfluges ist dies ein gut geeignetes Verfahren, da sich der Umgebungsluftdruck kaum ändert. Der Nachteil ist, dass auch aerodynamische Effekte (Verwirbelungen, Schockwellen, ...) den Luftdruck punktuell ändern und somit Fehler in der Höhe erzeugen. Möglicherweise werden Sie das beim Auslösen des Fallschirms sehen. Dort ändert sich die Aerodynamik innerhalb kürzester Zeit dramatisch. Der Hüpfen in der Höhe kurz nach PC könnte zum Teil daher kommen.

## Beschleunigung Vertikal



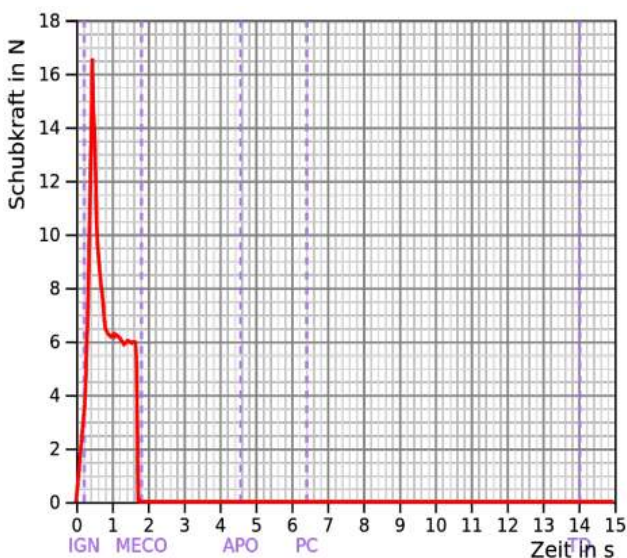
Im ApexExplorer befindet sich ein 3-achsiger Beschleunigungssensor. In dieser Darstellung wurden die Werte der drei Achsen so kombiniert, dass (nahezu) immer die Beschleunigung in die absolute senkrechte Richtung ausgegeben wird. Dies ist also die Beschleunigung im Bezugssystem eines außenstehenden Beobachters, mit positiver Beschleunigung als Beschleunigung nach oben. Zur besseren Anschaulichkeit wird die y-Achse auf 70 m/s<sup>2</sup> beschränkt. Die schlagartige Verzögerung beim Auslösen des Fallschirms (PC) ist (wahrscheinlich) als Maximalwert oben im Diagramm ablesbar.

## Geschwindigkeit – vertikal

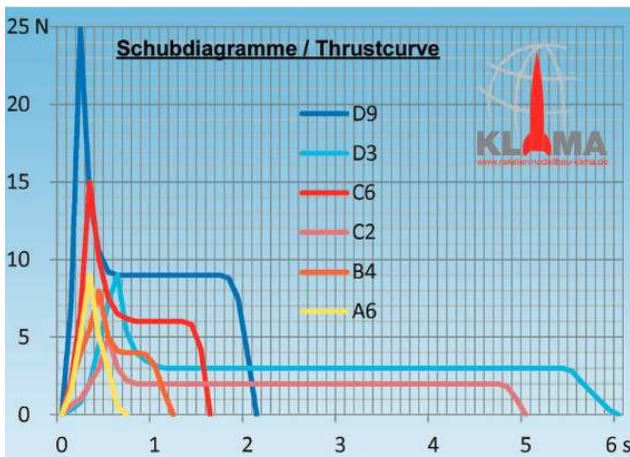


Der ApexExplorer hat keinen direkten Geschwindigkeitssensor. Dieses Diagramm wird daher nicht gemessen, sondern aus dem Höhen- und dem Beschleunigungsdiagramm erzeugt. Für den ersten Teil (bis PC) werden die Werte aus der Beschleunigung (vertikal) numerisch integriert. Zwischen PC und TD wird die Geschwindigkeit aus der numerischen Ableitung des Höhendigramms ermittelt. Ab TD wird die Geschwindigkeit auf 0 m/s gesetzt.

## Schubkraft

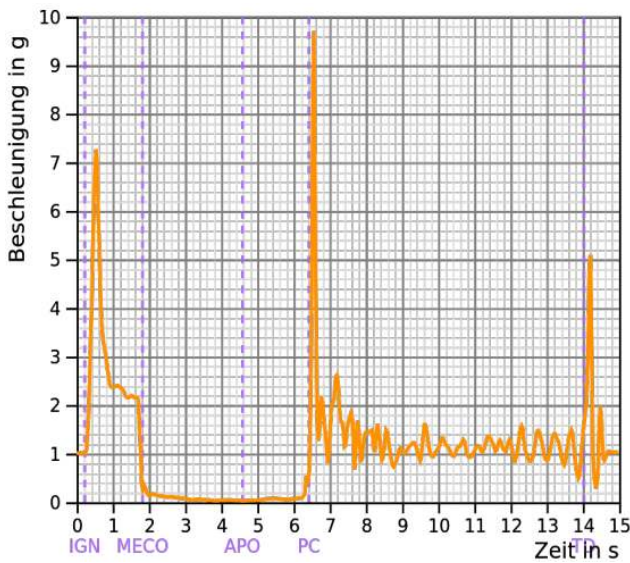


Eine Besonderheit des ApexExplorers ist, dass hier direkt die Schubkraft des Treibsatzes mit einem hochwertigen Kraftsensor gemessen wird. Der Peak zu Beginn ist vom Hersteller des Treibsatzes so gewollt. Dadurch wird die Rakete möglichst früh auf eine hohe Geschwindigkeit gebracht um schneller von der aerodynamischen Stabilisierung zu profitieren. In dieser Darstellung wird die Schubkraft nach MECO automatisch auf 0 N gesetzt. Da der Treibsatz vor allem während der Gleitphase in seiner Halterung herumgeschleudert wird, kommt es zu (fehlerhaften) Ausschlägen in der Kraftmessung, die von der eigentlichen Physik ablenken. Die ungefilterten Messdaten finden Sie in der csv-Datei mit den Flugdaten.



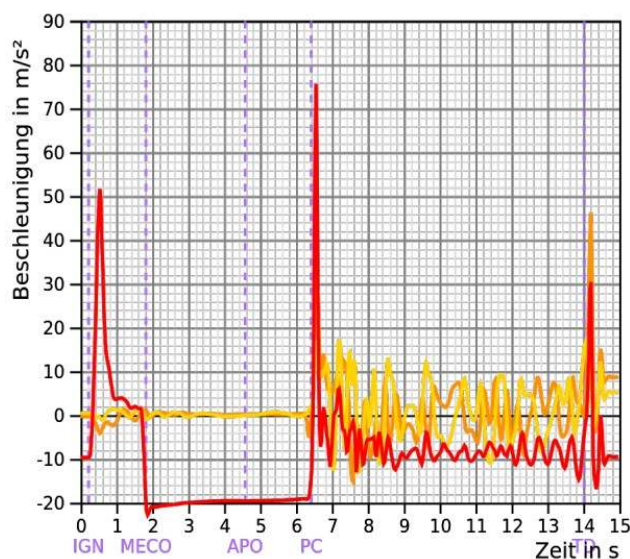
Links sehen Sie die vom Hersteller angegebenen Schubdiagramme verschiedener Treibsätze.

### Beschleunigung – im Bezugssystem der Rakete



In diesem Diagramm ist die Beschleunigung aufgetragen, wie Sie eine Person, die in der Rakete sitzt spüren würde. Gut erkennbar ist die „Schwerelosigkeit“ zwischen MECO und PC. Bei genauem Hinsehen erkennt man, dass perfekte „Schwerelosigkeit“ nur direkt um APO herum herrscht. Je weiter man davon entfernt ist umso stärker erzeugt die Luftreibung eine scheinbare „Schwerkraft“ (in Richtung Raketenspitze).

### Beschleunigung- vektoriell



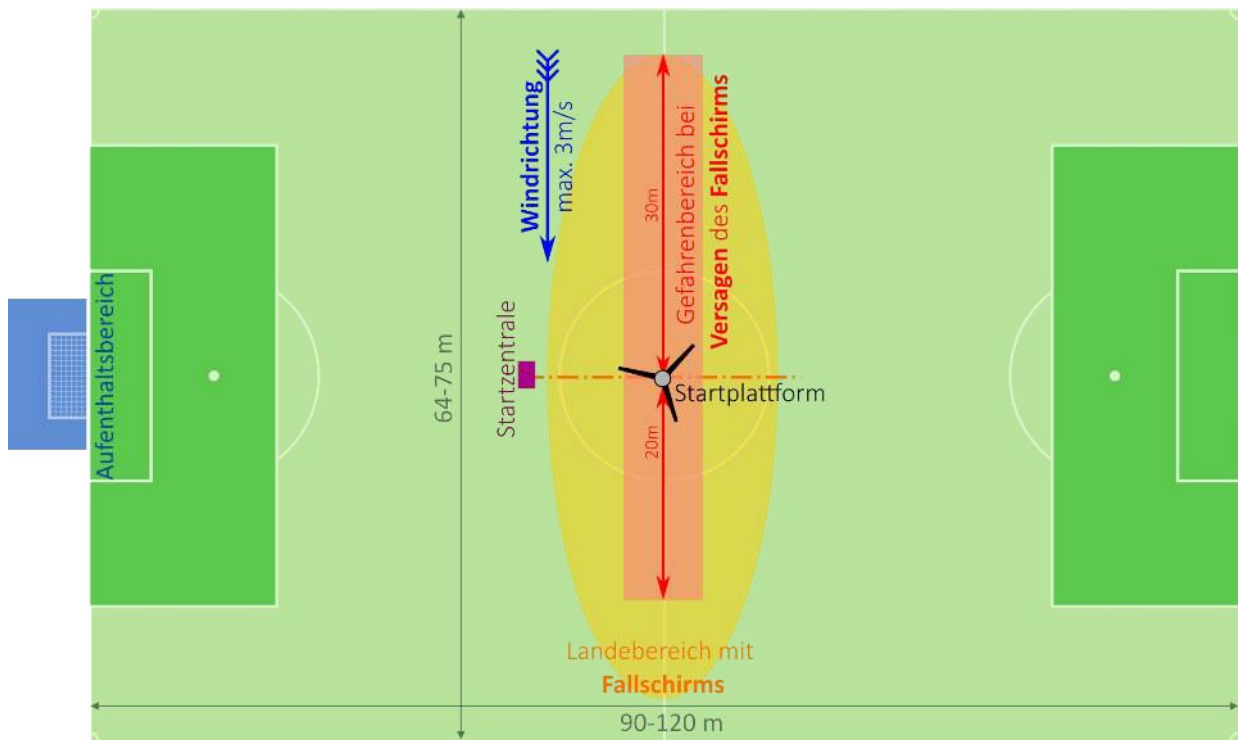
Dieses Diagramm zeigt die Beschleunigung in Richtung der Raumachse **x(rot)**, **y(orange)** und **z(gelb)** der Rakete. Die Orientierung der Raumachsen ist auf das Körperrohr der Rakete aufgedruckt.

## Einen geeigneten Startplatz finden

### Ein eigener Fußballplatz

Die Rakete ist so konstruiert, dass bei moderaten Windverhältnissen (maximal 4 m/s) ein Fußballfeld für einen sicheren Flug ausreicht. Wenn Ihre Schule ein eigenes Sportgelände mit einem Fußballfeld hat, oder Sie Zugang zu einem Fußballfeld einer benachbarten Schule haben ist dies sicher die einfachste Variante.

Wenn Sie keinen Zugang zu einem schulischen Fußballfeld haben, können Sie bei lokalen Fußballvereinen nachfragen. Meiner Erfahrung nach sehen viele Vereine darin eine willkommene Gelegenheit sich vorzustellen und so etwas Werbung für sich zu machen.



Beispielhafte Einteilung eines Fußballfelds als Flugfeld

### Im freien Feld

In ländlicheren Gebieten bietet es sich auch an bei Landwirten zu fragen ob diese eine Wiese oder ein abgeerntetes Feld zur Verfügung stellen könnten.

# Zeitplanung

Ein erfolgreicher Flug sollte in drei Doppelstunden vorbereitet werden können. Einen Vorschlag wie diese Stunden aufgeteilt werden können finden Sie in den folgenden Tabellen.

Diese Stunden können entweder in den normalen Unterrichtslauf eingeplant werden oder aber, beispielsweise im Rahmen eines Projekts auch an einem Tag hintereinander stattfinden.

| Im Laufe des Schuljahres      |                     |                               |                         | Im Rahmen eines Projekttages |              |
|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------|------------------------------|--------------|
| Stunde 1<br>Vor-<br>bereitung | Stunde 2<br>Planung | Stunde 3<br>General-<br>probe | Stunde 4<br>Raketenflug | Vormittag                    | Vorbereitung |
|                               |                     |                               |                         |                              | Planung      |
|                               |                     |                               |                         |                              | Generalprobe |
|                               |                     |                               |                         | Nachmittag                   | Raketenflug  |

| Teil 1- Vorstellung und Teamfindung  |   |
|--|---|
| Ziel dieser Einheit ist es, die Schülerinnen mit der Grundidee der Rakete vertraut zu machen und die Teams zu bilden. Zur Festigung des Teams sollen die Mitglieder jedes Teams sich bereits in ihre Aufgaben einlesen und am Ende der Doppelstunde ihre Aufgabe dem Plenum kurz vorstellen. |   |
| Dauer (min)  | Inhalt  |
| 10   | Grobe Vorstellung <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rakete zeigen</li> <li>• Beschreibung des Raketenflugs</li> <li>• Erwähnung der aufgezeichneten Daten</li> <li>• Ausblick auf die dabei entstehenden Arbeitsblätter</li> </ul> |
| 20   | Die Teams und ihre Aufgaben <ul style="list-style-type: none"> <li>• Benennung der Teams</li> <li>• grobe Beschreibung der Aufgaben jedes Teams</li> <li>• Herausforderungen und Erwartungen jedes Teams</li> </ul>                       |
| 20   | Einteilung der Teams  |
| 25   | Teamwork <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erstes Zusammensetzen der Teams</li> <li>• Gemeinsames Lesen der Aufgaben des jeweiligen Teams</li> </ul>   |
| 15   | Vorstellung der Teams im Plenum <ul style="list-style-type: none"> <li>• Jedes Team fasst in 3 Minuten zusammen was genau ihre Aufgabe beim Raketenflug ist</li> </ul>  |
|  | Hausaufgabe: <b>RTFM</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lesen des allgemeinen Teils der Anleitung und der Aufgaben der anderen Teams</li> </ul>   |
| <b>90</b>  |   |

## Teil 2- Planungsphase

In dieser Einheit sollen die Schülerinnen anfangen konkrete Aufgaben ihres Teams abzuarbeiten. Dabei sollen die SchülerInnen nicht nur die Phase *Planung* bearbeiten sondern sich auch anschauen, was in den Phasen 1 bis 7 von ihnen erwartet wird.

| Dauer (min) | Inhalt  |
|-------------|---|
| 5           | Begrüßung durch die Lehrkraft <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erwartung für den ersten Teil der kommenden Doppelstunde: Abschluss der Planungsphase</li> </ul> |
| 35          | Bearbeiten der Planungs-Phase <ul style="list-style-type: none"> <li>• Die einzelnen Teams bearbeiten die Punkte auf der Checkliste für die Phase Planung</li> </ul>    |
| 5           | Halbzeit Check  |
| 40          | Planungs-Phase Teil 2   |
| 5           | Abschlussplenum - Hat jeder Gruppe ihre Aufgaben erfüllt?   |
|             | Hausaufgabe: Fehlende Punkte der Planungsphase bearbeiten   |
| <b>90</b>   |   |

## Teil 3- Generalprobe

In dieser Einheit wird ein Trockentest der Rakete durchgeführt. Alle Teams führen einen Probestart der Rakete mit einem (funktionslosen) Dummy-Treibsatz durch. Statt des Treibsatzes wird eine Schülerin die Rakete einfach durch das Treppenhaus schnell nach oben tragen bis der Fallschirm auslöst und dann langsam wieder nach unten kommen.

| Dauer (min) | Inhalt  |
|-------------|---|
| 5           | Begrüßung durch die Lehrkraft <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erwartung für den ersten Teil der kommenden Doppelstunde: Erfolgreicher Trockentest</li> <li>• Erwartung für den zweiten Teil: Zusammenstellung aller benötigter Materialien für den wirklichen Raketenflug</li> </ul> |
| 45          | Trockenstart der Rakete   |
| 10          | Debriefing des Trockenstarts <ul style="list-style-type: none"> <li>• Was lief gut?</li> <li>• Wo ist noch Raum/Bedarf für Optimierung?</li> </ul>  |
| 25          | Bearbeiten der Phase <b><i>Vorbereitung</i></b>   |
| 5           | Abschlussplenum - Ist jede Gruppe bereit für den echten Flug?   |
|             | Hausaufgabe: Nochmaliges Durchlesen der Aufgaben jeder Gruppe   |
| <b>90</b>   |   |

# Gefährdungsbeurteilung

## Gefährdungsbeurteilung ApexExplorer

### 1. Beschreibung des Versuchs

Bei diesem Versuch wird eine Rakete (ca. 200g) mit einem pyrotechnischen Treibsatz auf eine Höhen von ca. 60m (kleiner Treibsatz) bzw. ca. 200m (großer Treibsatz) gebracht. Dabei misst sie kontinuierlich die Größen Höhe, Geschwindigkeit, Beschleunigung und die Schubkraft des Treibsatzes.

Jede Rakete wird durch die Zusammenarbeit von vier Teams gestartet. Jedes Team hat klar formulierte Aufgaben und explizite Checklisten. Dies stellt sicher, dass die Rakete für die Beteiligten sicher gestartet werden kann.

### 2. Durchführende Personen

Schüler und Schülerinnen ab der 10. Klasse unter Aufsicht der Lehrkraft.

### 3. Allgemeine und physikalische Gefährdungen



#### a) Gefahr durch herabfallende Gegenstände

- Durch Fehlfunktion des Fallschirms kann die Rakete ungebremst und mit hoher Geschwindigkeit auf dem Boden aufschlagen.



#### b) Gefahr durch explosionsgefährliche Stoffe

- Die Treibsätze enthalten bis zu 17,5g Schwarzpulver. Fehlzündungen oder falscher Umgang mit den Treibsätzen kann zu Explosionen führen.



#### c) Gefahr von Verbrennungen / Gefahr durch heiße Oberflächen

- Der Treibsatz erzeugt einen sehr heißen Abgasstrahl. Dieser kann auf der Haut zu schweren Verbrennungen führen. Oberflächen, die mit dem Abgasstrahl in Kontakt kamen können sich erhitzen.

### 4. Schutzmaßnahmen



#### Allgemein

- Das Lesen und Befolgen der Anleitung ist von größter Bedeutung.
- Die Checklisten müssen vollständig und in der vorgegebenen Reihenfolge bearbeitet werden.
- Jede teilnehmende Schüler\*in wird genau einem Team zugeordnet und arbeitet während des Flugversuchs ausschließlich mit diesem Team zusammen.
- Eine neue Phase der Checklisten wird erst dann begonnen, wenn alle Teams ihre Checkliste der aktuellen Phase vollständig abgearbeitet haben.
- Das Team *Mission Control* entscheidet wann eine neue Phase beginnt.



#### a) Schutz vor herabfallenden Gegenständen

- Der Bereich in dem die Rakete ungebremst landen könnte darf beim Start von niemandem betreten werden.
- Zum Start des Countdowns der Rakete wird ein Achtungssignal (Pfiff) gegeben. Alle Schüler und Schülerinnen sind aufgefordert den Flug der Rakete zu beobachten um sich notfalls in Sicherheit bringen zu können.



#### b) Schutz vor explosionsgefährlichen Stoffen

- Nur einzelne, speziell ausgewiesene Schüler und Schülerinnen haben Zugang zu den Treibsätzen.
- Treibsätze werden grundsätzlich ohne Zünder bewegt.



#### c) Schutz vor Verbrennungen

- Durch technische Maßnahmen kann der Treibsatz nur gezündet werden, wenn ...
  - ... der Zünder eingesetzt wurde UND
  - ... die Rakete senkrecht auf der Startplattform steht UND
  - ... die Lehrkraft den Startcode eingegeben hat.
- Der Zünder wird nur durch einzelne, speziell ausgewiesenen Schüler und Schülerinnen eingesetzt, die sich danach schnellstmöglich aus der Gefahrenzone begeben.

## Didaktisch-pädagogische Einschätzungen

Flugversuche mit dem ApexExplorer sind sehr sicher.

Durch die mehrstufigen Sicherheitssysteme liegt das Schadensrisiko durch einen ApexExplorer deutlich unter dem Risiko beim Verwenden von Silvesterraketen.

Beim strikten Befolgen der Anleitung und der Checklisten ist das Eintreten eines Personenschadens nahezu ausgeschlossen.

Da es aber keine absolute Sicherheit gibt, muss das Restrisiko des Flugversuchs gegen die didaktisch-pädagogischen Vorteile eines Experiments mit dem ApexExplorer abgewogen werden.

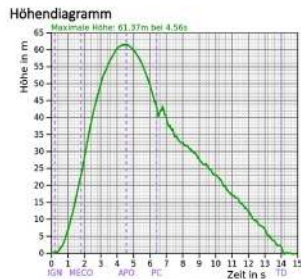
Diese Vorteile sind:

- Durch die gefühlte Gefahr, die von Raketen ausgeht haben SchülerInnen ein intrinsisches Interesse sich genau an die Checklisten zu halten.
- Für einen erfolgreichen Raketenflug müssen die vier Teams konzentriert und "auf den Punkt genau" zusammenarbeiten. Durch das Setting eines Raketenstarts ist Teamwork nicht nur eine pädagogische gewünschte, sondern auch eine technisch zwingend notwendige Arbeitsform. Der Erfolg hängt dabei von jedem Team ab.
- Die Teamarbeit bietet auch SchülerInnen, die mit den kognitiv abstrakten Anforderungen im Fach Physik Probleme haben, die Möglichkeit Kompetenzen im physikalischen Arbeiten (exaktes Durchführen von Experimenten anhand einer schriftlichen Anleitung) zu zeigen.
- Die Erleichterung einer sicher gelandeten Rakete belohnt die SchülerInnen direkt für die Teamarbeit.
- Durch das Mitfiebern beim Raketenflug ist die Aufmerksamkeit der SchülerInnen deutlich gesteigert. Die SchülerInnen werden sich in den folgenden Wochen viel wahrscheinlicher an Details des Flugs erinnern, als dies bei einem Tischexperiment der Fall wäre. Die SchülerInnen bleiben den gewonnenen Daten sozusagen lange *emotional* verbunden.

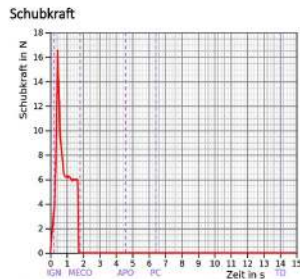
Diese Vorteile lassen sich ohne die minimalen Risiken eines Raketenflugs nicht realisieren und rechtfertigen die Inkaufnahme des geringen Restrisikos.

## Übersicht

### Einfache Übersicht



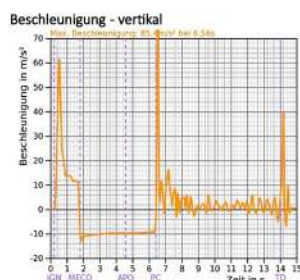
Das Höhendidiagramm wird mithilfe des Luftdrucks bestimmt. Es bietet über kurze Zeiträume eine recht gute Genauigkeit.



In diesem Diagramm sehen Sie, mit welcher Kraft der Treibsatz die Rakete beschleunigt hat.



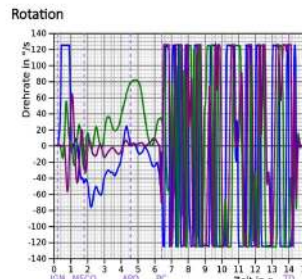
Das Geschwindigkeitsdiagramm wurde aus den Daten der Höhe und der Beschleunigung errechnet und nicht direkt gemessen. Kleine Abweichungen und Schwankungen sind dabei zu erwarten. Positive Werte bedeuten, dass sich die Rakete nach oben bewegt. Negative Werte bedeuten eine Bewegung nach unten.



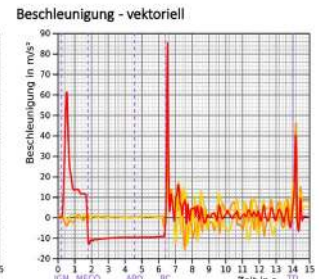
In diesem Diagramm wird die Beschleunigung in Bezug zur vertikalen Achse dargestellt. Positive Werte bedeuten, dass die Rakete nach oben beschleunigt wurde. Negative Werte bedeuten eine Beschleunigung nach unten.

Abkürzungen:  
IGN: Zündung (IGNition)  
MECO: Zündschluss (Main-Engine-Cut-Off)  
APO: Gipfelhöhe (APOgee)  
PC: Fallschirmauslösung (ParaChute)  
TD: Landung (TouchDown)

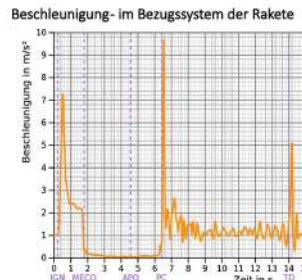
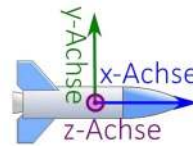
### Detaillierte Übersicht



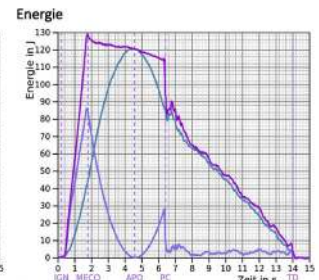
Hier ist aufgezeichnet, wie schnell sich die Rakete um die Raketenachsen gedreht hat.



In diesem Diagramm können Sie die Beschleunigungskomponenten in Bezug auf die Raketenachsen ablesen.



In diesem Diagramm sehen Sie, welche Gesamtbeschleunigung ein Beobachter, der in der Rakete sitzt, spüren würde.



Potentielle Energie  
Kinetische Energie  
Gesamtenergie ( $E_{pot} + E_{kin}$ )

Auf diesen beiden Seiten sehen Sie alle Diagramme auf einen Blick. Gut geeignet als Referenz oder als „Muster“-Lösung für verschiedene Aufgaben der Arbeitsblätter.

### Hinweis zur Farbgebung

In den Arbeitsblättern werden durchgehend für dieselbe Größe immer die selbe Farbe verwendet

| Ort  | Geschwindigkeit | Beschleunigung | Kraft | Impuls | Energie |
|------|-----------------|----------------|-------|--------|---------|
| Grün | Blau            | Orange         | Rot   | Pink   | Lila    |

Dieses Farbschema wird auch in den Musterlösungen beibehalten.



## Aufgabe 1 – Flugphasen erkennen

Auf dem unten abgebildeten Diagramm ist die Flughöhe ihrer Rakete dargestellt. Zum Zeitpunkt 0 s wird das Startsignal gegeben.

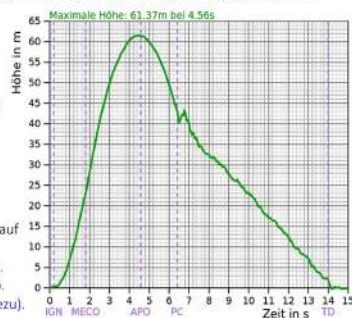
a) Erinnern Sie sich an ihren Raketenflug. Können Sie Ereignisse im Diagramm wiedererkennen?

b) Markieren Sie folgende **Ereignisse** im Diagramm:

- A: Erreichen des Gipfelpunkts (Apogäum)
- S: Die Rakete hebt ab.
- F: Auslösung des Fallschirms
- L: Landung der Rakete
- M: Brennschluss der Treibsätze.

c) Markieren Sie die folgenden **Zeiträume** auf der Zeitachse farblich:

- Die Geschwindigkeit der Rakete nimmt zu.
- Die Geschwindigkeit der Rakete nimmt ab.
- Die Geschwindigkeit bleibt konstant (nahezu).



Bestimmen Sie nun folgende Kenngrößen ihres Raketenflugs:

| Kenngröße   | Wert |
|---|------|
| Gipfelhöhe (Apogäum)  |      |
| Zeit von Start bis zur Gipfelhöhe                           |      |
| Die Höhe beim Auslösen des Fallschirms                      |      |
| Zeit, in der die Rakete frei gefallen ist (ohne Fallschirm) |      |
| Zeit am Fallschirm  |      |



## Aufgabe 2 – Geschwindigkeiten berechnen

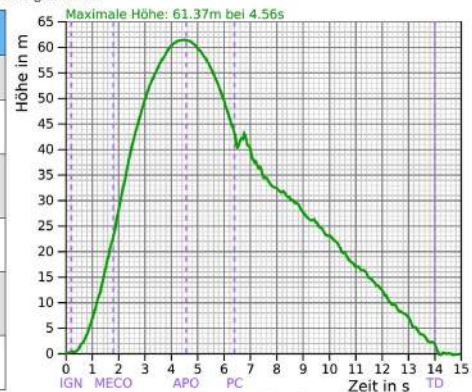
a) Berechnen Sie folgende **Durchschnittsgeschwindigkeiten**. Zeichnen Sie dazu die passenden Steigungsdreiecke in das Diagramm ein.

Durchschnittsgeschwindigkeit ...

... zwischen Start und Gipfelhöhe:

... zwischen Gipfelhöhe und Fallschirmauslösung:

... zwischen Fallschirmauslösung und Landung:

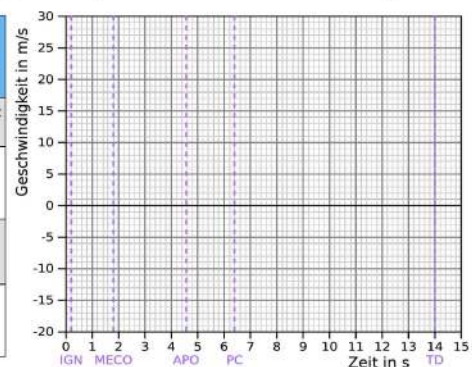


b) Bestimmen Sie die **Momentangeschwindigkeit** zu jeder vollen Sekunde. Verwenden Sie dazu die Tangentenmethode. Tragen Sie Ihre Ergebnisse in das unten stehende Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm ein.

Bestimmen Sie zusätzlich die folgenden **Momentangeschwindigkeiten**:

Höchstgeschwindigkeit (in km/h)

die Geschwindigkeit bei der Fallschirmauslösung:



Mit der **Aufgabe 1** dieses Arbeitsblatts sollen sich die SchülerInnen zuerst mit dem Verlauf der Raketenfluges vertraut machen und bestimmte Kenngrößen und besonderen Ereignisse des Fluges anhand des Höhendigramms bestimmen. Einige der gesuchten Zeitpunkte sind im Höhendigramm bereits markiert. Dadurch sollen die SchülerInnen diese Markierungen bewusster wahrnehmen, da sie auch in allen anderen Diagrammen auftauchen. Ziel ist es dadurch die Diagramme mit unterschiedlichen physikalischen Größen leichter miteinander vergleichbar zu machen.

In der **Aufgabe 2** sollen die SchülerInnen dann ganz konkrete Geschwindigkeiten ermitteln. In der Teilaufgabe 2 a) die Durchschnittsgeschwindigkeiten zwischen besonderen Ereignissen; in Aufgabe 2 b) dann auch Momentangeschwindigkeiten mit Hilfe der Tangentenmethode. Aus diesen ermittelten Geschwindigkeiten erstellen die SchülerInnen dann ein Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm. Zur Erfolgskontrolle können die SchülerInnen ihr Diagramm mit dem von der Rakete erzeugten Diagramm (auf der Übersicht) vergleichen.

Als zusätzliche Erweiterung können die SchülerInnen nach der Aufgabe 2 a) aufgefordert werden den Geschwindigkeitsverlauf zu erst einmal zu skizzieren bevor sie in Aufgabe 2 b) den konkreten Verlauf ermitteln.

# Geschwindigkeiten

## Aufgabe 1 – Flugphasen und Geschwindigkeitsänderungen erkennen

Auf dem unten abgebildeten Diagramm ist die Geschwindigkeit ihrer Rakete dargestellt. Zum Zeitpunkt 0s wird das Startsignal gegeben.

a) Versuchen Sie sich an Ihren Raketenflug zu erinnern. Können Sie einige Ereignisse des Fluges im Diagramm wiedererkennen?

b) Wann wurden folgende Geschwindigkeiten erreicht?

| Ereignis                         |  |
|----------------------------------|--|
| Maximale Aufwärtsgeschwindigkeit |  |
| Maximale Abwärtsgeschwindigkeit  |  |
| Stillstand ( $v=0$ )             |  |

c) Markieren Sie die folgenden Zeiträume auf der Zeit-Achse farblich:

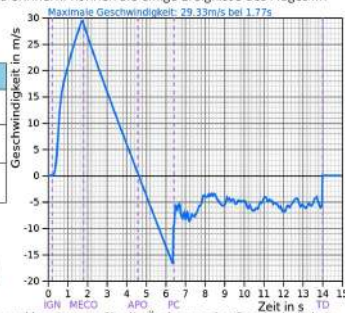
Die Geschwindigkeit der Rakete nimmt zu

Die Geschwindigkeit der Rakete nimmt ab

Die Geschwindigkeit bleibt konstant

Ermitteln Sie die Dauer folgender Zeiträume und bestimmen Sie die Änderung der Geschwindigkeit

| Zeitraum  | Dauer $\Delta t$ | Änderung $\Delta v$ |
|---|------------------|---------------------|
| Von der Zündung (IGN) bis zum Brennschluss (MECO)             |                  |                     |
| Vom Brennschluss (MECO) bis zum Auslösen des Fallschirms (PC) |                  |                     |
| Vom Auslösen des Fallschirms (PC) bis zur Landung (TD)        |                  |                     |



## Aufgabe 2 – Beschleunigungen berechnen und Verlauf skizzieren

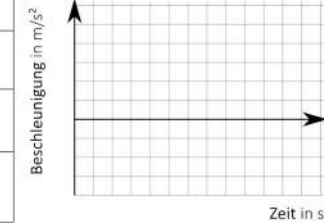
a) Berechnen Sie diese Beschleunigungen aus den Ergebnissen von Aufgabe 1:

Von der Zündung (IGN) bis zum Brennschluss (MECO)

Vom Brennschluss (MECO) bis zum Auslösen des Fallschirms (PC)

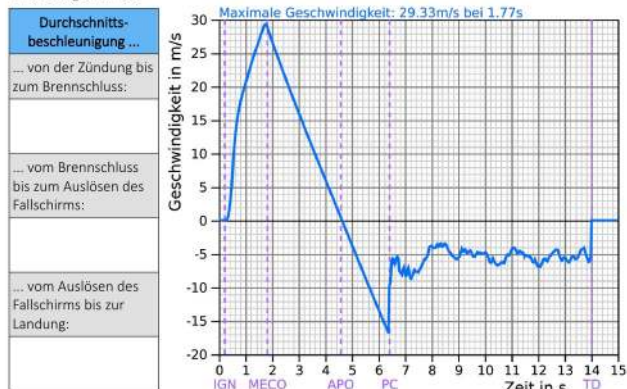
Vom Auslösen des Fallschirms (PC) bis zur Landung (TD)

b) Skizzieren Sie den Verlauf der Beschleunigung:

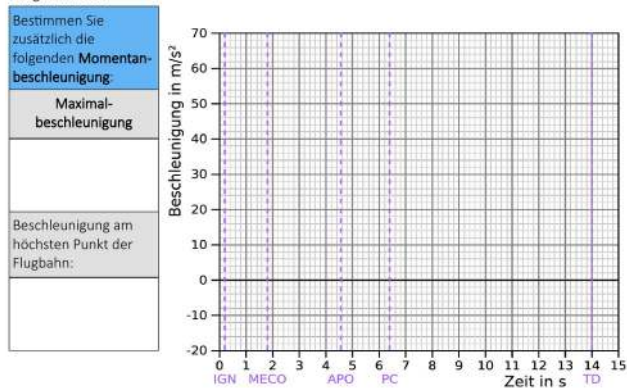


## Aufgabe 3 – Beschleunigungsverlauf bestimmen

a) Zeichnen Sie die in Aufgabe 1 berechneten Beschleunigungen als Steigungen (Steigungsdreiecke) in das Diagramm ein.



b) Bestimmen Sie die Momentanbeschleunigung zu jeder vollen Sekunde. Verwenden Sie dazu die Tangentenmethode. Tragen Sie Ihre Ergebnisse in das unten stehende Zeit-Beschleunigungs-Diagramm ein.



Das Arbeitsblatt zur Geschwindigkeit umfasst vier Seiten. Dieser große Umfang kommt dadurch zustande, dass man von der Geschwindigkeit ausgehend sowohl die Beschleunigung berechnen als auch die Flughöhe rekonstruieren kann.

Die Aufgaben 1 bis 3 bestimmen (ganz klassisch) aus der Änderung der Geschwindigkeit die Beschleunigung. In den Aufgaben 4 bis 6 wird aus dem Geschwindigkeitsverlauf die Flughöhe rekonstruiert.

**Aufgabe 1** dient dazu sich intensiver mit dem Geschwindigkeitsgraph auseinanderzusetzen. Achten Sie darauf in der Teilaufgaben **b)** die Abwärtsgeschwindigkeit mit einem negativen Wert zu versehen. Das wird Ihnen in Teil c) helfen.

Aufgabenteil **c)** führt die SchülerInnen dazu hin, die Änderung der Geschwindigkeit (positiv-"echte" Beschleunigung; negativ- Bremsen) in den Fokus zu nehmen. In dieser Teilaufgabe sollte sich genug Zeit genommen werden um sich eingehend mit der vereinfachenden Definition von negativer Änderung der Geschwindigkeit, also negativer Beschleunigung, als "Bremsen" zu beschäftigen. Hierbei ist besonders auf das Vorzeichen der Geschwindigkeitsänderung zu achten.

Im Zeitraum von IGN bis MECO erkennt man sehr schön, dass die Rakete schneller wird. Ebenso klar ist zwischen MECO und APO erkennbar, dass die Rakete langsamer wird. Didaktisch kompliziert wird es erst zwischen MECO und PC. Denn hier ist die Steigung der Geschwindigkeit weiterhin negativ, also haben wir auch hier, genauso wie von MECO bis APO eine negative Beschleunigung, also ein "Bremsvorgang"? Das passt natürlich nicht zu der Beobachtung der SchülerInnen, da die Rakete nach dem Gipfelpunkt ja offensichtlich wieder schneller wurde. Zwei mögliche Ansätze diesen

Widerspruch aufzulösen finden sie weiter unten.

Eine weitere Fehlvorstellung der SchülerInnen lässt sich in der dritten Zeile der Tabelle dieser Teilaufgabe ansprechen. Wenn es Ihnen gelingt, die SchülerInnen davon zu überzeugen, dass die Geschwindigkeitsänderung zwischen PC und TD (nahezu) Null war, werden sie in Aufgabe 2 a) für diesen Zeitraum eine Beschleunigung von Null berechnen, obwohl sich, zu Verwunderung einiger SchülerInnen, die Rakete doch bewegt hat.  $a = 0 \neq v = 0$

### Geschwindigkeitszunahme bei negativer Beschleunigung

#### (Mathematischer) Unterschied zwischen Wert und Betrag

Die schnellste Möglichkeit diesen Widerspruch aufzulösen ist, sich mit den SchülerInnen mit den beiden Definitionen für eine "große Zahl" in der Mathematik auseinanderzusetzen. Für viele SchülerInnen ist die Zahl "-100" gefühlt größer als die Zahl "0,001".

Vom Wert her ist das natürlich falsch denn es gilt  $-100 < 0,001$ , aber was SchülerInnen zu der Aussage "-100 ist größer als 0,001" verleitet ist, das der Betrag von -100 größer als der Betrag von 0,001 ist.

Wenn der Unterschied zwischen dem Betrag und dem Wert einer Zahl klar ist kann man sagen:

Zwischen APO und PC wird der Wert der Geschwindigkeit immer kleiner (sie wird immer negativer), der Betrag der Geschwindigkeit nimmt aber wieder zu.

#### Wechsel der Bezugssysteme

Etwas ausführlicher und physikalisch tiefgreifender ist eine Erklärung über einen (unbewussten) Wechsel der Bezugssysteme.

Eine Person in der Rakete würde nämlich eine Bewegung nach vorne (in Richtung der Raketenspitze) als positiv definieren. Die Person in der Rakete würde nach dem Gipfelpunkt sagen, dass Ihre Geschwindigkeit wieder zunimmt. Denn im Gipfelpunkt hat sich die Rakete um  $180^\circ$  und fällt mit der Spitze voran nach unten. Der Aus dieser Sicht bewegt sich die Rakete immer mit positiver Geschwindigkeit<sup>4</sup>.

Wir, die wir außerhalb der Rakete stehen haben eine andere Sicht auf die Dinge. Für uns ist eine Bewegung nach oben positiv, und eine nach unten negativ. Nach dem Gipfelpunkt wird die Geschwindigkeit immer negativer. Daher eine negative Beschleunigung. MathematikerInnen würden sagen, dass die Geschwindigkeit vom Wert her immer kleiner, vom Betrag aber immer größer wird.

Da sich die Person in der Rakete mit der Rakete dreht, dreht sich auch ihr Bezugssystem um  $180^\circ$ . Nach dem Gipfelpunkt hat der Begriff "positive Geschwindigkeit" für beide Beobachter entgegengesetzte Bedeutungen(, weil ihre Bezugsachsen für positiv entgegengesetzt zueinander stehen).

In **Aufgabe 2 a)** werden konkrete (mittlere) Beschleunigungen berechnet als quantitative Vorbereitung für die Skizze des Beschleunigungsverlaufs in Aufgabenteil **b)**.

In **Aufgabe 3 a)** sollen die SchülerInnen ihre Ergebnisse aus Aufgabe 2 visualisieren, indem sie die Mittlere Beschleunigung als Sekanten in das Geschwindigkeitsdiagramm einzeichnen. Weisen Sie darauf hin, dass der Wert der Beschleunigung als Steigung erkennbar ist- dies dient zur Vorbereitung auf die nächste Teilaufgabe. In dieser Teilaufgabe **b)** sollen die SchülerInnen mithilfe der Tangentenmethode die momentan Beschleunigung zu jeder Sekunde ermitteln um einen genaueren Verlauf der Beschleunigung als in der Skizze in Aufgabe 2 zu ermitteln.

4 Zumindest bis zum Auslösen des Fallschirms. Solange die Rakete am Fallschirm hängt bewegt sie sich für die Person in der Rakete rückwärts.

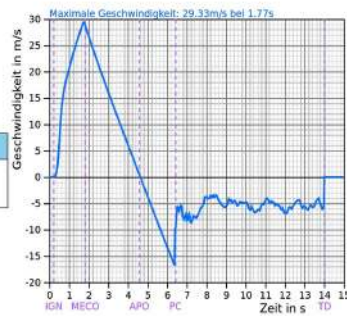
**Aufgabe 4 – Geschwindigkeit als Ortsänderung**

Im Gegensatz zu Aufgabe 1 und 2 werden wir nun untersuchen, wie sich die Höhe der Rakete geändert hat.

**Wichtig:**  
Positive Geschwindigkeiten zeigen eine Bewegung nach oben, negative Geschwindigkeiten zeigen eine Bewegung nach unten.

b) Wann hat die Rakete ihrer größte Höhe erreicht?

c) Markieren Sie die folgenden Zeiträume auf der Zeit-Achse farblich:  
Die Höhe der Rakete nimmt zu  
Die Höhe der Rakete nimmt ab  
Die Höhe bleibt konstant



Ermitteln Sie folgende Mittlere Geschwindigkeiten ihres Raketenflugs:

|   | Wert |                                | Wert |
|---|------|--------------------------------|------|
| Mittlere Geschwindigkeit am Fallschirm            |      | Zeitdauer am Fallschirm        |      |
| Mittlere Geschwindigkeit bei der Aufwärtsbewegung |      | Zeitdauer der Aufwärtsbewegung |      |
| Mittlere Geschwindigkeit bei der Abwärtsbewegung  |      | Zeitdauer der Abwärtsbewegung  |      |

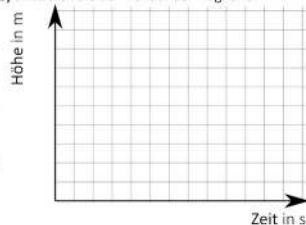
**Aufgabe 5 – Ortsänderungen berechnen und Höhe skizzieren**

a) Verwenden Sie die Kenngrößen aus Aufgabe 1, um folgende Höhenänderungen zu berechnen:

- Vom Auslösen des Fallschirms bis zu Landung.
- Vom Start bis zum Apogäum (Höhepunkt)
- Vom Apogäum bis zum Auslösen des Fallschirms.

|  |
|--|
|  |
|  |
|  |

b) Skizzieren Sie den Verlauf der Flughöhe:

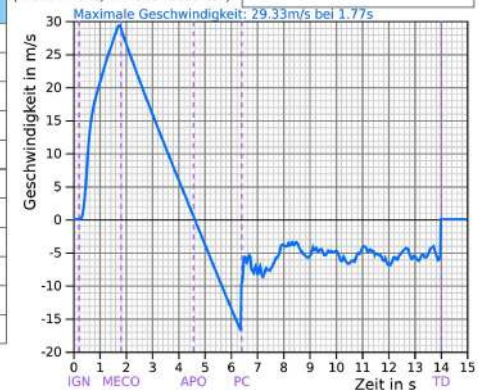


**Aufgabe 6 – Höhe mit Hilfe der Flächenmethode berechnen**

a) Bestimmen Sie mithilfe der Flächenmethode die Höhe der Rakete zu jeder vollen Sekunde, so wie zusätzlich an den markierten Punkten.

| Zeit in s | Anzahl in Kästchen | h in m |
|-----------|--------------------|--------|
| 0         |                    |        |
| 1         |                    |        |
| 2         |                    |        |
| 3         |                    |        |
| 4         |                    |        |
| 5         |                    |        |
| 6         |                    |        |
| 7         |                    |        |
| 8         |                    |        |
| 10        |                    |        |
| ...       |                    |        |

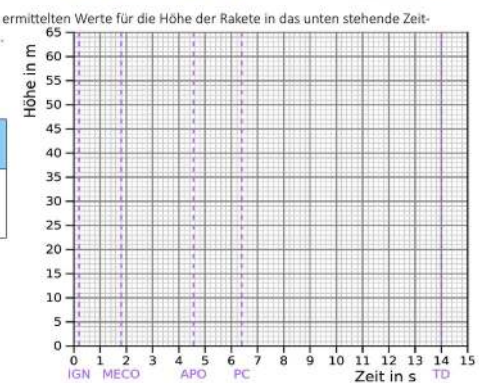
Wert eines Kästchens im Diagramm: (Breite x Höhe; Einheiten beachten)



b) Übertragen Sie die ermittelten Werte für die Höhe der Rakete in das unten stehende Zeit-Höhen-Diagramm ein.

c) Bestimmen Sie zusätzlich die Maximale Flughöhe.

Apogäum (in Meter)



In **Aufgabe 4** sollen die SchülerInnen sich nochmals das Geschwindigkeitsdiagramm anschauen. Dieses Mal sollen sie aber die Bereiche voneinander unterscheiden in denn die Rakete an Höhe gewinnt oder Höhe verliert. Eingeführt wird dies mit der Frage in Teilaufgabe **a)** wann die Rakete ihrer größte Höhe erreicht hatte. Hierbei wird auf die Besonderheit der Nullstelle zwischen Aufwärts- und Abwärtsbewegung hingewiesen. In Teilaufgabe **b)** wird dieser Blick auf die gesamte Zeitachse ausgedehnt.

In Aufgabe 4 **c)** werden konkrete Mittlere Geschwindigkeiten auch dem Geschwindigkeitsdiagramm abgeschätzt. Dabei wird mit der Geschwindigkeit am Fallschirm begonnen, da sich die Mittlere Geschwindigkeit hier am intuitivsten ablesen lässt. Bei den folgenden Zeiträumen wird das Abschätzen der Mittleren Geschwindigkeit für SchülerInnen schwerer. Hilfreich ist hier ein Vorgriff auf den *Mittelwertsatz der Integralrechnung*. Alles was unter der Mittelwertslinie "fehlt" muss durch Flächen über der Mittelwertslinie ausgeglichen werden. Zusätzlich notieren die SchülerInnen die Zeitdauer über den die Rakete diese mittlere Geschwindigkeit hatte. Achten Sie darauf, dass negative Geschwindigkeiten auch als negative Werte aufgeschrieben werden.

**Aufgabe 5 a)** nutzt die in Aufgabe 4 c) ermittelten Werte um daraus die zurückgelegte Strecke in den entsprechenden Zeiträumen zu berechnen. Hier bietet sich die Möglichkeit einer Kontrolle der Abschätzung der mittleren Geschwindigkeit aus Aufgabe 4 c). Bei guten Schätzungen ergibt die Summe der Höhenänderungen nahezu Null. In Teilaufgabe b) sollen die SchülerInnen diese Höhenänderungen im zeitlichen Verlauf skizzenhaft einordnen.

**Aufgabe 6** verwendet dann die Flächenmethode um zuverlässigere Ergebnisse für Höhenänderung zu erhalten. Spannend ist dabei wie gut man durch diese Methode auf die direkt gemessene maximale Flughöhe kommt und ob die Rakete bei der Landung wirklich auf dem Boden ( $h = 0$ ) liegt.

# Beschleunigung

## Aufgabe 1 – Flugphasen erkennen

Auf dem unten abgebildeten Diagramm ist die Beschleunigung ihrer Rakete dargestellt. Zum Zeitpunkt 0s wird das Startsignal gegeben.

a) Erinnern Sie sich an Ihren Raketenflug. Können Sie einige Ereignisse des Fluges im Diagramm wiedererkennen?

b) Welche Zeitpunkte (IGN, MECO, ...) markieren folgende Ereignisse?

| Ereignis                        | von | bis |
|---------------------------------|-----|-----|
| Das Triebwerk brennt.           |     |     |
| Die Rakete ist im freien Fall.  |     |     |
| Die Rakete hängt am Fallschirm. |     |     |

c) Markieren Sie die folgenden Zeiträume auf der Zeit-Achse farblich:

- Die Geschwindigkeit der Rakete nimmt zu
- Die Geschwindigkeit der Rakete nimmt ab
- Die Geschwindigkeit bleibt (nahezu) konstant

Ermitteln Sie folgende Kenngrößen ihres Raketenflugs:

| Kenngröße   | Wert | Kenngröße   | Wert |
|---|------|---|------|
| Maximale Beschleunigung während des Startvorgangs |      | Zeitpunkt der höchsten Geschwindigkeit                        |      |
| Zeit im freien Fall                               |      | Mittlere Beschleunigung Zeit im freien Fall                   |      |
| Brenndauer der Triebwerke                         |      | Mittlere Beschleunigung während der Brenndauer der Triebwerke |      |

## Aufgabe 2 – Geschwindigkeiten berechnen

a) Verwenden Sie die Kenngrößen aus Aufgabe 1, um folgende Geschwindigkeitsänderungen zu berechnen:

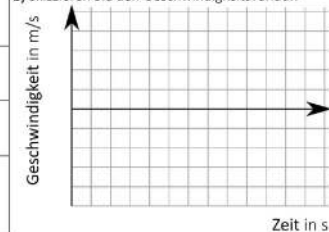
... vom Start der Rakete bis zum Brennschluss.

... vom Brennschluss zum Apogäum.

... vom Apogäum bis zum Auslösen des Fallschirms.

|  |
|--|
|  |
|  |
|  |

b) Skizzieren Sie den Geschwindigkeitsverlauf:



Rayyanah\_Barnawi am 5.8.2025, 14:36

Beschleunigung

Seite 1 von 2

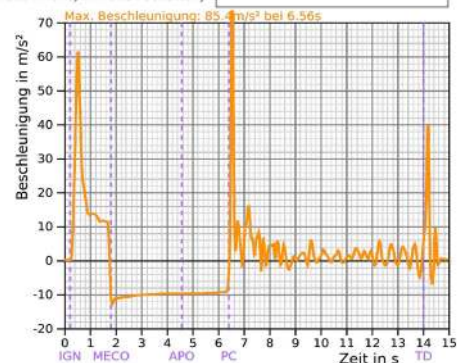
raketenwerkstatt@posteo.de

## Aufgabe 3 – Geschwindigkeiten mit Hilfe der Flächenmethode berechnen

a) Bestimmen Sie mithilfe der Flächenmethode die Momentangeschwindigkeiten zu jeder vollen Sekunde, so wie zusätzlich an den markierten Punkten (MECO, APO, PC, TD).

| Zeit in s | Anzahl Kästchen | v m/s |
|-----------|-----------------|-------|
| 0         |                 |       |
| 1         |                 |       |
| 2         |                 |       |
| 3         |                 |       |
| 4         |                 |       |
| 5         |                 |       |
| 6         |                 |       |
| 7         |                 |       |
| 8         |                 |       |
| 9         |                 |       |
| 10        |                 |       |

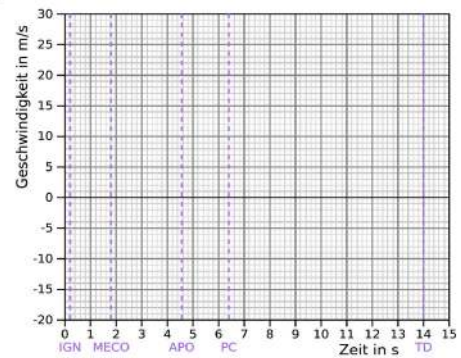
Wert eines Kästchens im Diagramm: (Breite x Höhe; Einheiten beachten)



b) Übertragen Sie die ermittelten Werte für die Momentangeschwindigkeit in das unten stehende Zeit-Geschwindigkeitsdiagramm ein.

c) Bestimmen Sie die Maximalgeschwindigkeit.

|   |
|---|
| <b>Maximalgeschwindigkeit (in km/h)</b> |
|   |



Rayyanah\_Barnawi am 5.8.2025, 14:36

Beschleunigung

Seite 2 von 2

raketenwerkstatt@posteo.de

Auf der ersten Seite in **Aufgabe 1 b)** sollen die SchülerInnen wieder dieselben Ereignisse wie vom letzten Arbeitsblatt erkennen, diesmal allerdings im Zeit-Beschleunigungs-Diagramm. Von einigen Ereignissen werden konkrete Beschleunigungswerte abgefragt.

Mit diesen Werten sollen die SchülerInnen die daraus folgenden Geschwindigkeitsänderung in **Aufgabe 2 a)** berechnen. Dies ist eine Vorbereitung zur Aufgabe 2 b), in der die SchülerInnen den Geschwindigkeitsverlauf anhand des Beschleunigungsverlaufs skizzieren sollen.

Auf der zweiten Seite des Arbeitsblatts sollen die SchülerInnen den Geschwindigkeitsverlauf quantitativ ermitteln. Dazu müssen die SchülerInnen in **Aufgabe 3 a)** den "Geschwindigkeits-Gehalt" eines Flächenelements im Zeit-Beschleunigungsdiagramms bestimmen. Danach schätzen die SchülerInnen in Sekundenschritten ab, wie viele Kästchen zwischen der Zeitachse und der Messkurve eingeschlossen sind. (Negative Wertung beachten!) Aus diesen Werten können die SchülerInnen dann auf die Geschwindigkeit schließen.

*Hinweis:* Ab die die gesamte Anzahl der Kästchen seit Start ermittelt wird, oder die Anzahl der Kästchen innerhalb eines der Sekundenintervall kann den SchülerInnen überlassen werden. Je nach Wahl muss/kann dann der Unterschied zwischen absoluter Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsänderung erörtert werden.

Zum Schluss erstellen die SchülerInnen aus diesen Daten ein Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm, das sie mit ihrer Skizze von der ersten Seite und dem von der Rakete errechneten Verlauf vergleichen können

## 2. Newton'sches Axiom

Raketenphysik
Datum:  
2. Newton-Gesetz

**Aufgabe 1 - effektive Kraft**

**Diagramm 1 - Schubkraft**

**Diagramm 2 - Beschleunigung vertikal**

**Diagramm 3 - Geschwindigkeit**

Die in Diagramm 1 dargestellte Schubkraft ist nicht die einzige Kraft, die beim Flug auf die Rakete wirkt.

a) Zeichnen Sie in die Skizze rechts alle relevanten Kräfte mit ihrer Wirkrichtung während des Aufstiegs der Rakete ein.

b) Geben Sie an in welchen Zeiträumen diese Kräfte auf die Rakete wirken oder wann sie nicht wirken.

| Kraft          | wirkt von ... bis ... | keine Wirkung |
|----------------|-----------------------|---------------|
| Schubkraft     |                       |               |
| Schwerkraft    |                       |               |
| Luftwiderstand |                       |               |

**Hinweis:**  
Die Rakete wiegt mit Treibsatz ca. 200g (200g +/- 10g). Diese Angabe benötigen Sie für die Aufgaben auf Seite 2. Wenn Sie es genauer wissen wollen, müssen Sie ihre Rakete direkt wiegen.

Rayyanah\_Barnawi am 5.8.2025, 14:36  
2. Newton'sches Axiom Seite 1 von 2

Raketenphysik
Datum:  
2. Newton-Gesetz

**Aufgabe 2 - Bestimmung der Luftreibung**

a) Berechnen Sie die Beschleunigung, welche die Rakete zu den angegebenen Zeitpunkten laut Diagramm 1 haben sollte.

|                                    | kurz nach dem Start<br>t = 0,5s | während des Aufstiegs<br>t = 1s | kurz nach Brennschluss<br>t = 2s | Apogäum<br>(maximale Höhe) |
|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Gemessene Beschleunigung (D2)      |                                 |                                 |                                  |                            |
| Beschleunigung aus Schubkraft (D1) |                                 |                                 |                                  |                            |

b) Korrigieren Sie die beschleunigende Kraft in Diagramm 1 unter Berücksichtigung der Schwerkraft. Berechnen Sie erneut die theoretisch erreichbare Beschleunigung.

|                            | kurz nach dem Start<br>t = 0,5s | während des Aufstiegs<br>t = 1s | kurz nach Brennschluss<br>t = 2s | Apogäum<br>(maximale Höhe) |
|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Korrigierte Beschleunigung |                                 |                                 |                                  |                            |

c) Die letzten Abweichungen haben ihre Ursache im Luftwiderstand. Nun nehmen wir eine andere Perspektive ein. Berechnen Sie mit Diagramm 2 die effektiv wirkende Kraft  $F_{\text{eff}}$ . Ziehen Sie davon die Schubkraft (Diagramm 1) und die Schwerkraft  $F_{\text{grav}}$  ab. Das Ergebnis ist die Reibungskraft  $F_R$  der Luft. Tragen Sie in die Tabelle auch die Geschwindigkeit  $v$  der Rakete aus Diagramm 3 ein.

|                    | kurz nach dem Start<br>t = 0,5s | während des Aufstiegs<br>t = 1s | kurz nach Brennschluss<br>t = 2s | Apogäum<br>(maximale Höhe) |
|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| $F_{\text{eff}}$   |                                 |                                 |                                  |                            |
| $F_{\text{schub}}$ |                                 |                                 |                                  |                            |
| $F_{\text{grav}}$  |                                 |                                 |                                  |                            |
| $F_R$              |                                 |                                 |                                  |                            |
| $v$                |                                 |                                 |                                  |                            |

d) Tragen Sie die Luftreibungskraft  $F_R$  gegenüber der Geschwindigkeit  $v$  in das Diagramm rechts ein.

e) Haben Sie eine Idee, wie die Luftreibungskraft  $F_R$  von der Geschwindigkeit abhängen könnte? Können Sie diese Abhängigkeit auch als Funktionsgleichung angeben?

Rayyanah\_Barnawi am 5.8.2025, 14:36  
2. Newton'sches Axiom Seite 2 von 2

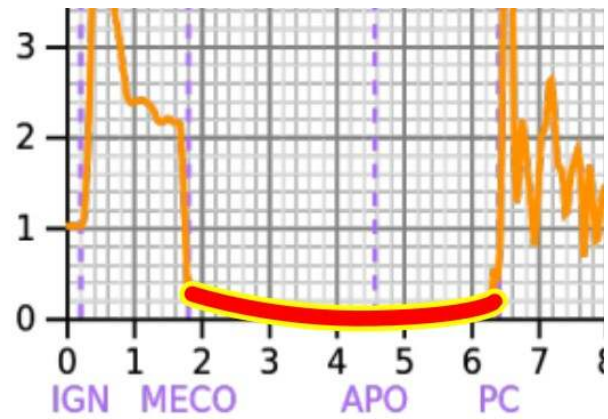
Auf der ersten Seite wird als erster Schritt die Kräftesituation an der Rakete besprochen mit dem Ziel die effektive beschleunigende Kraft zu ermitteln. Der zeitliche Verlauf dieser Kräfte wird in **Aufgabe 1 b)** angesprochen.

Auf der zweiten Seite werden die Kraft und die Beschleunigung zu verschiedenen Zeitpunkten miteinander verglichen. Schritt für Schritt wird dabei die Kräftesituation an der Rakete genauer beschrieben mit dem Ziel am Ende eine die effektiv beschleunigende Kraft so exakt bestimmt zu haben, dass der theoretische Zusammenhang zwischen Kraft und Beschleunigung ( $a = F/m$ ) auch in den Messdaten erkennbar wird. Dies wird für verschiedenen Zeitpunkte vorgenommen, da sich zu verschiedenen Zeitpunkten unterschiedlich komplizierte Kräftesituationen einstellen. Besonders das Apogäum ist ein optimaler Zeitpunkt, da hier nur die Gewichtskraft wirken sollte.

In **Aufgabe 2 a)** werden nur die gemessene Beschleunigung und die direkt aus der Schubkraft resultierende Beschleunigung miteinander verglichen. Sollten die SchülerInnen natürlich gravierende Abweichungen feststellen, da die Gewichtskraft nicht berücksichtigt wurde. In **Aufgabe 2 b)** wird dann die Gewichtskraft mitberücksichtigt und die als beschleunigende Kraft wird nun die Schubkraft minus die Gewichtskraft angenommen. Das sollte zumindest im Apogäum eine gute Übereinstimmung ergeben. Zu den anderen Zeiten wirkt zusätzlich eine noch unbekannte Luftwiderstandskraft. Diese Luftwiderstandskraft zu bestimmen ist Ziel der **Aufgabe 2 c)**. Hier wird die Luftwiderstandskraft als Abweichung von der gemessenen effektiv beschleunigenden Kraft und den identifizierten beschleunigenden Kräften (Gewichts- und Schubkraft) bestimmt. Idealerweise kann so die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Luftreibung erkannt werden.

**Aufgabe 2 d) und e)** zielen darauf ab einen quadratischen Zusammenhang zwischen Luftreibungskraft und Geschwindigkeit zu erkennen.

*Hinweis:* Sollte sich dieser Zusammenhang in dem von den SchülerInnen ermittelten Graph aus Aufgabe 2 d) nicht erkennen lassen so lohnt sich ein genauer Blick auf das Beschleunigungsdiagramm (Beschleunigung im Bezugssystem der Rakete). Hier gut zu erkennen, dass die Beschleunigung nur um das Apogäum wirklich Null ist. Je weiter die Rakete vom Apogäum entfernt ist umso stärker ist die Störung der perfekten Schwerelosigkeit durch die Luftreibung (-> Scheinschwerkraft zur Raketenspitze hin).



Mit etwas gutem Willen lässt sich der Verlauf auch als sehr stark gestauchte Parabel interpretieren. Das deutet auch auf eine quadratische Abhängigkeit der Luftreibung von der Geschwindigkeit hin.

# Impuls

**Raketenphysik** Datum: \_\_\_\_\_  
Impuls

**Aufgabe 1 - Impuls als Zustandsgröße**

Verwendeter Treibsatz

|                            |                            |
|----------------------------|----------------------------|
| <b>C6</b><br>Impuls: 10 Ns | <b>D9</b><br>Impuls: 20 Ns |
|----------------------------|----------------------------|

a) Berechnen Sie mit Hilfe des Diagramms den Impuls der Rakete beim Brennschluss des Treibsatzes.

b) Der Hersteller gibt den Impuls der Treibsätze an (siehe oben). Wie bewerten Sie die Angabe des Herstellers.

Wie schnell wäre Ihre Rakete gewesen, wenn Sie den anderen Treibsatz verwendet hätten?

**Diagramm 1 - Geschwindigkeit**  
Maximale Geschwindigkeit: 29.33m/s bei 1.77s

Masse der Rakete: 200g

**Aufgabe 2 - Impulserhaltung**

Der Treibsatz verbrennt 12g Schwarzpulver und stößt die Abgase mit hoher Geschwindigkeit nach hinten aus, um die Rakete nach vorne zu beschleunigen.

a) Beschreiben Sie, wie die nach hinten auströmenden Gase die Rakete nach vorne beschleunigt.

b) Wie schnell müssen die Abgase die Düse nach hinten verlassen haben, um den von Ihnen berechneten Impuls zu erzeugen? Geben Sie das Ergebnis auch in km/h an.

**Raketenphysik** Datum: \_\_\_\_\_  
Impuls

**Aufgabe 3 - Impuls als Kraftstoß**

Rechts sehen Sie den zeitlichen Verlauf der Schubkraft, die der Treibsatz beim Raketenflug erzeugt hat.

a) Berechnen Sie mit Hilfe der Flächenmethode den Gesamtimpuls des Treibsatzes.

b) Vergleichen Sie den in a) berechneten Wert mit dem Wert aus Aufgabe 1a) und der Herstellerangabe aus Aufgabe 1b).

**Diagramm 2 - Schubkraft**  
Wert eines Kästchens im Diagramm: (Breite x Höhe; Einheiten beachten)

**Aufgabe 4 - Unterschiede**

Um die Unterschiede in den Impulsmessungen besser zu verstehen, müssen wir uns die beiden Diagramme nochmals genauer ansehen. Im Geschwindigkeitsdiagramm sehen wir die tatsächliche Geschwindigkeit. Im Kraftdiagramm sehen wir die Kraft des Treibsatzes, der die Rakete beschleunigt hat und so indirekt die im Diagramm 1 gemessene Geschwindigkeit erzeugt hat. Allerdings erzeugt nur ein Teil der Schubkraft wirklich eine Bewegung nach oben.

a) Warum sorgt nur ein Teil der Schubkraft für eine Bewegung nach oben? Markieren Sie im Diagramm 2 den Teil der Schubkraft, der die Rakete nach **oben** bewegt.

b) Bestimmen Sie den Impuls des in Teilaufgabe 4 a) markierten Teils.

c) Vergleichen Sie den in Aufgabe 4 b) berechneten, effektiven Impuls mit dem in Aufgabe 1a) berechneten Impuls.

Auf diesem Arbeitsblatt sollen die Schüler sich mit dem Impuls der Rakete beschäftigen. In **Aufgabe 1 a)** wird der maximale Impuls der Rakete als Zustandsgröße aus dem Zeit-Geschwindigkeitsdiagramm berechnet. Um einen genaueren Wert für die Masse der Rakete zu erhalten, können die SchülerInnen die Rakete natürlich auch wiegen. Sollte dabei die Frage auftauchen, ob man die Rakete mit vollem Treibsatz, mit leerem Treibsatz wiegt, so ist dies eine schöne Propädeutik zur Raketengleichung.

In **Aufgabe 1 b)** werden die SchülerInnen aufgefordert den ermittelten Wert mit der Angabe des Herstellers zu vergleichen. Dabei ist eine große Abweichung zu erwarten. Der Grund dafür ist vor allem der unberücksichtigte *Gravity Loss*, also der Teil des Impulses der benötigt wurde um die Rakete überhaupt erst in der Schwebelage zu halten. Verluste in der Endgeschwindigkeit durch die Luftreibung spielen dabei nur eine geringe Rolle. Bei der Abschätzungsfrage nach der Höchstgeschwindigkeit des anderen Treibsatzes gibt es mehrere differenzierte Antwortmöglichkeiten. Ein prozentualer Vergleich von Treibsatz zur Geschwindigkeit sollte aber ausreichen.

Die **Aufgabe 2** beschäftigt sich direkt mit Raketenphysik. Aufgrund der Impulserhaltung können die SchülerInnen berechnen, wie schnell die Gase die Rakete verlassen haben. Für die Angabe des maximalen Impuls der Rakete, stellt sich die Frage ob man mit dem tatsächlich gemessenen Impuls aus Aufgabe 1 a) arbeitet oder mit dem (noch) theoretischen Impuls aus der Herstellerangabe. Auf beiden Wegen kommen imposante Austrittsgeschwindigkeiten im Überschallbereich heraus. Zunächst ist für die SchülerInnen sicher eine Berechnung mit dem tatsächlich gemessenen Impuls nachvollziehbarer. Mit Bearbeitung der Aufgaben 3 und 4 erkennen die SchülerInnen, dass die

Herstellerangaben doch korrekt sind. Mit dieser Erkenntnis könnten die SchülerInnen die Austrittsgeschwindigkeit korrigieren. Die korrigierte Austrittsgeschwindigkeit von 833 m/s liegt im unteren Bereich von Schwarzpulvertreibsätzen (800 m/s bis 1200 m/s).

Auf der zweiten Seite wird der Impuls dann als Kraftstoß betrachtet und in **Aufgabe 3 a)** bestimmen die SchülerInnen den Impuls der Rakete durch die Flächenmethode. Der Vergleich mit der Herstellerangabe in Aufgabe 3 b) sollte nun zeigen, dass der Wert des Herstellers nahezu erreicht wurde (vielleicht sogar übertroffen).

In **Aufgabe 4** werden die SchülerInnen angeleitet den *Gravity Loss* aus der Impulsberechnung heraus zurechnen. Der Vergleich mit dem aus der Höchstgeschwindigkeit ermittelten Impuls von Aufgabe 1 a) sollten nun sehr ähnliche Werte liefern. Die bleibende Abweichung ist hauptsächlich auf die Luftreibung zurückzuführen.

# Energie

Datum: \_\_\_\_\_

**Raketenphysik**  
Energie

**Aufgabe 1 - Minimale und Maximale Energien**  
Beim Raketenflug sind drei Energieformen interessant. Die potentielle, die kinetische und die chemische Energie. Geben Sie an, zu welchen Zeitpunkten diese Energieformen ihren maximalen Wert erreicht haben und in welchen Zeiträumen sie nicht vorhanden waren.

| Energieform         | Maximal | Null |
|---------------------|---------|------|
| Potentielle Energie |         |      |
| Kinetische Energie  |         |      |
| Chemische Energie   |         |      |

Markieren Sie diese Zeitpunkte und Zeiträume auch in den Diagrammen.

**Aufgabe 2 - Energien berechnen.**  
Berechnen Sie mit Hilfe der Diagramme den Wert der Maximalen Energie.  
*Beachten Sie die unten stehenden Daten.*

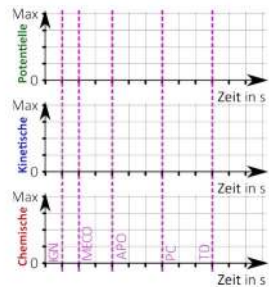
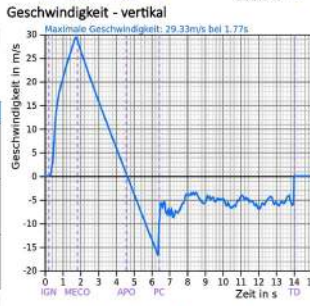
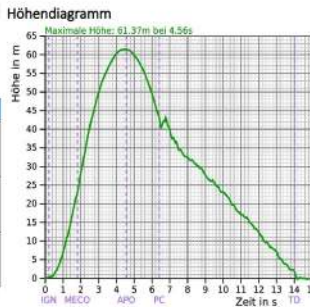
| Energieform | Maximaler Wert |
|-------------|----------------|
| Potentielle |                |
| Kinetische  |                |
| Chemische   |                |

**Aufgabe 3 - Energieumwandlung**  
Skizzieren Sie den Verlauf des Energiegehalts der einzelnen Energieformen über den gesamten Raketenflug. Beginnen Sie mit dem Blockdiagramm unten:

Verfeinern Sie diese Darstellung in den drei Diagrammen rechts.

| Daten                               |                   |
|-------------------------------------|-------------------|
| Masse der Rakete                    | 200g              |
| Masse des Schwarzpulvers            | C6: 12g / D9: 18g |
| Explosionsenergie von Schwarzpulver | 2700 kJ/kg        |

Rayyanah\_Barnawi am 5.8.2025, 14:36



Datum: \_\_\_\_\_

**Raketenphysik**  
Energie

**Aufgabe 4- Wirkungsgrad**

- Wie viel der chemischen Energie im Treibsatz ging bis zum Erreichen der maximalen Höhe verloren?
- Berechnen Sie den Wirkungsgrad der Umwandlung von chemischer Energie in potentielle Energie vom Start bis zur maximalen Höhe.
- Berechnen Sie den Gesamtenergiegehalt der Rakete zum Zeitpunkt des Brennschlusses des Treibsatzes.
- Welche Leistung erbringt der Treibsatz?
- Wie viel dieser Energie hat die Rakete vom Brennschluss bis zum Erreichen der maximalen Höhe verloren?
- Berechnen Sie den Wirkungsgrad des freien Aufstiegs der Rakete.
- Was ist mit dem fehlenden Teil der Energie passiert?
- Die Wärmekapazität der Rakete beträgt etwa  $c_w = 1,3 \text{ kJ/(K}\cdot\text{kg)}$ . Um wie viel Grad Celsius wurde die Rakete beim Aufstieg wärmer?

**Aufgabe 5 Arbeit oder Energieübertrag als Prozess**

- Berechnen Sie nun zu jeder vollen Sekunde ...
  - die potentielle Energie,
  - die kinetische Energie und
  - die Gesamtenergie aus potentieller und kinetischer Energie,
 und zeichnen Sie diese Werte in das Diagramm rechts ein.
- Betrachten Sie den zeitlichen Verlauf der Gesamtenergie. Was fällt Ihnen dabei auf?
- Wie viel Energie geht der Rakete am Fallschirm verloren?

Rayyanah\_Barnawi am 5.8.2025, 14:36

Auf dem Arbeitsblatt zur Energie sollen die SchülerInnen zunächst überlegen zu welchen Zeitpunkten die angegebenen Energieformen ihren maximalen Energiegehalt und zu welchen Zeiträumen diese Energieformen nicht auftreten. In **Aufgabe 2** berechnen die SchülerInnen dann den konkreten maximalen Energiegehalt der angegebenen Energieformen anhand der Graphen und der Angaben zum Treibsatz.

In **Aufgabe 3 a)** machen sich die SchülerInnen Gedanken zum zeitlichen Verlauf der Energieformen. Im Blockdiagramm sollen sie zunächst den groben Ablauf der Energiefolgen beschreiben.

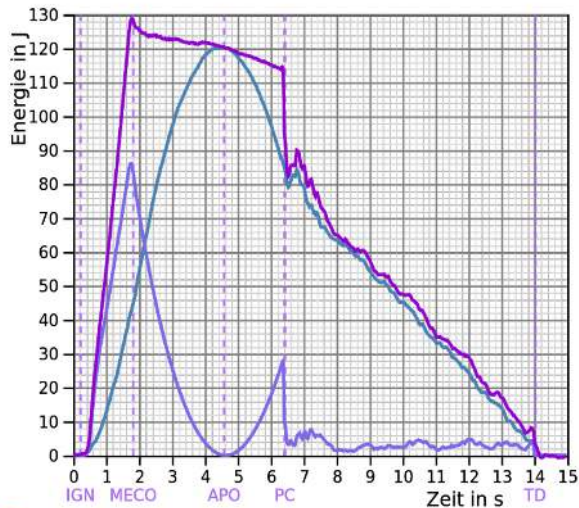
Als Musterlösung ist chemische Energie → kinetische Energie → potentielle Energie → kinetische Energie → thermische Energie

vorgesehen. Allerdings bietet die etwas grobschlüchtige Einteilung der Energieformen in einzelne Blöcke nicht die Möglichkeit den genauen Verlauf der Energieverteilung abzubilden. Sollten sich die SchülerInnen daran stören, haben sie eine perfekte Überleitung zum zweiten Teil dieser Aufgabe.

Für eine genauere Betrachtung der Verteilung der Energie auf die verschiedenen Formen ist die **Aufgabe 3 b)** vorgesehen. In den drei Graphen sind zur besseren Koordinierung die besonderen Ereignisse des Raketenflugs eingezeichnet.

In **Aufgabe 4** berechnen die SchülerInnen Energiedifferenzen und Wirkungsgrade der Rakete, sowie die Leistung des Treibsatzes. Auffällig ist dabei der sehr schlechte Wirkungsgrad von der Chemischen Energie zu den mechanischen Energieformen. Tatsächlich beziehen sich die 2700 kJ/kg auf die sogenannte Explosionswärme. In der Chemie gibt man deshalb noch einen Wert für die *spezifische*

## Energie



- Potentielle Energie
- Kinetische Energie
- Gesamtenergie ( $E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}}$ )

In der Übersicht (die ersten beiden Seiten der Arbeitsblätter) finden Sie einen exakten Verlauf der Energie.

APEX Explorer Physik

Raketenphysik Energie Datum:

---

**Aufgabe 6 Arbeit oder Energieübertrag als Prozess**

Der Treibsatz überträgt seine chemische Energie auf die Rakete, in dem er mit der Schubkraft  $F_s$  gegen die Rakete drückt. Dadurch verrichtet der Treibsatz **Arbeit  $W$**  an der Rakete. Die Menge an Arbeit die dabei verrichtet wird hängt von der **Strecke  $s$**  ab über die diese Kraft wirkt:

$W = F \cdot s$

**a)** Schätzen Sie anhand des Diagramm rechts ab, wie hoch diese Schubkraft durchschnittlich war und über welche Strecke (Höhe) sie wirkte. Berechnen Sie damit die Arbeit, die der Treibsatz an der Rakete verrichtete hat.

**b)** Vergleichen Sie diese Arbeit (aka Energieänderung) mit dem Gesamtenergiegehalt zum Zeitpunkt des Brennschlusses des Treibsatz (siehe Aufgabe 4 c). Wodurch könnte die Abweichung erklärt werden?

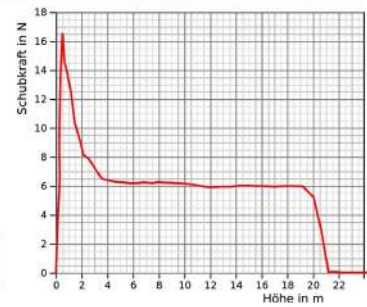
**c)** Genauer lässt sich die Menge der Arbeit über die Flächenmethode bestimmen. Berechnen Sie zuerst welcher Arbeit ein Kästchen im Diagramm oben rechts entspricht und zählen Sie danach die Kästchen unter der Kraft-Strecken-Kurve. Vergleichen Sie diesen Wert erneut mit dem Ergebnis aus Aufgabe 4 c).

**d)** Im Diagramm der Aufgabe 4 fehlt in der "Gesamt"energie noch die chemische Energie. Die chemische Energie des Treibsatzes sorgt für die Schubkraft. Daher können wir im Kraft-Weg-Diagramm die Änderung (die Abnahme) der chemischen Energie ablesen. Führen Sie dafür folgende Schritte durch:

- Die in Aufgabe 6 c) bestimmte Energie nehmen wir den (chemischen) Energiegehalt des Treibsatzes zu Beginn. Tragen Sie diesen Wert für den Zeitpunkt  $t = 0$  s in das Energiediagramm in Aufgabe 5 ein.
- Bestimmen Sie, wie in Aufgabe 6 c), aus dem Energie-Weg-Diagramm den Energie zwischen  $t = 0$  s und  $t = 0,55$  s.
  - Als erstes müssen Sie im Diagramm der Aufgabe 1 nachschauen welche Höhe die Rakete zum Zeitpunkt  $t = 0,55$  hatte.
  - Zählen Sie die Kästchen zwischen der Höhe zu Beginn und am Ende des beobachteten Zeitraums.
  - Ziehen Sie diesen Wert von der Anfangsenergie ab. Tragen Sie diesen Wert ebenfalls in das Energiediagramm in Aufgabe 5 ein.
- Wiederholen Sie die letzten Schritt für jeden 0,5s-Intervall. Ziehen Sie den aus dem Flächeninhalt ermittelten Energiemengen jeweils vom vorherigen Energiegehalt ab und tragen Sie diesen Wert ebenfalls in das Energiediagramm in Aufgabe 5 ein.

Nun sehen Sie die zeitliche Abnahme der chemischen Energie des Treibsatzes. Betrachten Sie diesen Verlauf im Vergleich zu den anderen eingezeichneten Energieformen. Was fällt Ihnen auf?

**e)** Berechnen Sie nun den wirklichen Gesamtenergiegehalt, in dem Sie die in Aufgabe 6 d) berechneten Werte für die chemische Energie zur unvollständigen Gesamtenergie aus Aufgabe 5 a) hinzu addieren. Tragen Sie diese neue Gesamtenergie ebenfalls in den Graphen in Aufgabe 5 ein. Was fällt Ihnen auf?



Energie der Schwarzpulverreaktion an. Diese spezifische Energie gibt den Anteil der mechanisch nutzbaren Energie der Reaktion an (also abzüglich der thermischen Energie). Dieser Wert wird für Schwarzpulver mit 280 kJ/kg angegeben<sup>5</sup>.

In **Aufgabe 5** wiederholen Sie SchülerInnen die Energiebetrachtung aus Aufgabe 3 mit einer feineren zeitlichen Auflösung. Zusätzlich sollen die SchülerInnen in das Diagramm auch die Summe aus der potentiellen Energie und der kinetischen Energie einzeichnen<sup>6</sup>. Zur Besprechung können Sie Ihren SchülerInnen auch den exakten Energieverlauf aus der Übersicht zeigen (siehe Beispiel oben links). Hier wird der Energieaustausch zwischen potentieller und kinetischer Energie noch deutlicher. In Teilaufgabe **b)** werden die SchülerInnen nach den Besonderheiten der Energieverläufe gefragt. Dabei sollten Sie das Augenmerk auf die "Gesamt"energie lenken. Sie bleibt während des freien Falls nahezu konstant. Die kontinuierliche Abnahme ist natürlich durch den (thermischen) Verlust durch die Luftreibung verursacht. Am Fallschirm wird dieser "Verlust" noch deutlicher sichtbar. Falls Sie vorhaben Aufgabe 6 d) und e) zu bearbeiten lohnt es sich auch darauf hinzuweisen, dass es so aussieht als würde zu Beginn Energie aus dem Nichts entstehen.

**Aufgabe 6** steigt tiefer in das Thema Energie ein und beschäftigt sich mit der Arbeit als Energieübertragung. Zu Beginn wird an die Definition der Arbeit als Kraft über eine Strecke erinnert. Im Aufgabenteil **a)** sollen die SchülerInnen die durchschnittliche Schubkraft abschätzen um die Arbeit über  $W = F \cdot s$  zu berechnen. Wie gewohnt werden die SchülerInnen im Teil **b)** aufgefordert diesen Wert mit dem zuvor bestimmten Wert der Gesamtenergie (aus Aufgabe 4) zu vergleichen. Wenn gewünscht können die SchülerInnen ihre Schätzung aus a) verbessern, indem sie auch in diesem Diagramm eine händische Integration über die Flächenmethode durchführen.

<sup>5</sup> Siehe: <https://www.chemie.de/lexikon/Schwarzpulver.html>

<sup>6</sup> Die wird vorläufig Gesamtenergie genannt. Die noch fehlende chemische Energie wird in Aufgabe 6 hinzugefügt.

Weiterführende Impulse:

- Im Gegensatz zum Impulsarbeitsblatt muss im Kraft-Weg-Diagramm die Gewichtskraft der Rakete nicht aus der Berechnung der Arbeit herausgerechnet werden. Dies lässt sich plausibilisieren, wenn man sich (wie beim Gravity Loss) vorstellt, was passieren würde, wenn der Treibsatz nur eine Schubkraft von 2 N leisten könnte. Die Rakete würde dann nur auf der Startplattform schweben. Im Gegensatz zum Kraft-Zeit-Diagramm verursacht das im Kraft-Weg-Diagramm zu keinen Problemen, da in diesem Fall der zurückgelegte Weg ebenfalls Null bleibt und so keine Arbeit geleistet wird.



# Erlaubnis für minderjährige SchülerInnen

Liebe Eltern,

ich möchte mit Ihrem Kind ein Raketenprojekt durchführen um den Physikunterricht spannender und einprägsamer zu gestalten. Dazu werden wir eine Rakete (220g) durch einen pyrotechnischen Treibsatz wie in einer Silvesterrakete auf eine Höhe zwischen 70m und 200m aufsteigen lassen. Die Rakete wird dann an einem Fallschirm wieder zu Boden schweben. Die aufgezeichneten Flugdaten werden wir in den folgenden Unterrichtsstunden für verschiedene Physikaufgaben nutzen.

Während des Fluges gibt es strengste Sicherheitsvorkehrungen:

- Große Sicherheitsabstände wo immer möglich
- Klar ausgewiesene Aufenthaltsräume
- Strikte Aufgabenteilung und Begrenzung der SchülerInnen, die an der Rakete arbeiten.

Trotz aller dieser Vorsichtsmaßnahmen und Sicherheitsvorkehrungen können bestimmte Gefahren, wenn auch extrem unwahrscheinlich, nicht vollständig ausgeschlossen werden:

- Verletzungen durch herabfallende Gegenstände

Für die Transparenz (und auch aus rechtlichen Gründen) benötigt Ihr Kind für die Teilnahme an diesem Projekt Ihre Erlaubnis:

|                           |      |             |
|---------------------------|------|-------------|
| Mein Kind                 | Name | Klasse      |
| darf am Raketenprojekt am |      | teilnehmen. |

Einige Teams sind aufgrund Ihrer Aufgaben besonderen Risiken ausgesetzt. Zusätzlich erlaube ich meinem Kind in den folgenden Teams mitzuarbeiten:

*Zutreffende Teams bitte ankreuzen*

| <input checked="" type="checkbox"/> | Team  | Zusätzliche Gefahren   |  |   |
|-------------------------------------|---|--|--|---|
|                                     | JPL   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dieses Team hantiert mit dem Treibsatz. Dadurch sind Verbrennungen durch Fehlzündungen möglich.</li> <li>• Aufenthalt in der Nähe der startbereiten Rakete: Verletzungen durch nicht ordnungsgemäß startende Rakete.</li> </ul> <p>Zusätzliche Erlaubnis</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20px; height: 20px;"></td> <td>Mein Kind darf selbst direkt mit dem Treibsatz hantieren.</td> </tr> </table> |  | Mein Kind darf selbst direkt mit dem Treibsatz hantieren. |
|                                     | Mein Kind darf selbst direkt mit dem Treibsatz hantieren. |  |  |   |
|                                     | FC  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufenthalt in der Nähe der startbereiten Rakete: Verletzungen durch nicht ordnungsgemäß startende Rakete.</li> <li>• Verletzungen bei Bergung der Rakete in unwegsamem Gelände.</li> </ul>  |  |   |
|                                     | MC  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufenthalt in der Nähe der startbereiten Rakete: Verletzungen durch nicht ordnungsgemäß startende Rakete.</li> </ul>  |  |   |

|                      |              |
|----------------------|--------------|
| Name des Elternteils | Unterschrift |
|----------------------|--------------|

# Technische Hinweise

## Allgemeine Sicherheitshinweise

- Der Apex-Explorer ist nur für Jugendliche ab 14 Jahren geeignet.
- Der Apex-Explorer darf nur unter der Aufsicht einer Lehrkraft gestartet werden.

## Entsorgung und Recycling

Die Rakete bitte nicht im Hausmüll entsorgen sondern, an uns (kostenfrei) zurückschicken. Für einen Retourenschein kontaktieren Sie uns bitte.

## Kontaktdaten

### Anschrift:

Raketenwerkstatt Dr. Benjamin Bertsche  
Heinrich-von-Stephan-Str. 16  
79100 Freiburg i. Br.

**E-Mail:**        raketenerkstatt@posteo.de