

Konstruktion von hochfliegenden

Wasserraketen

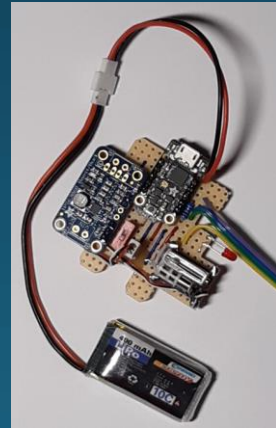
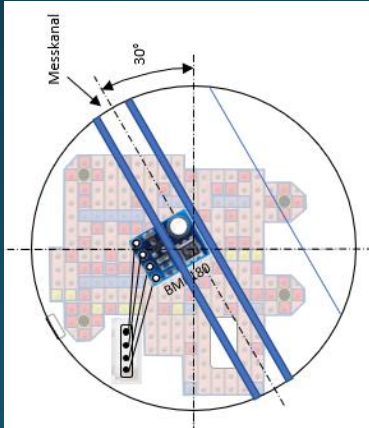
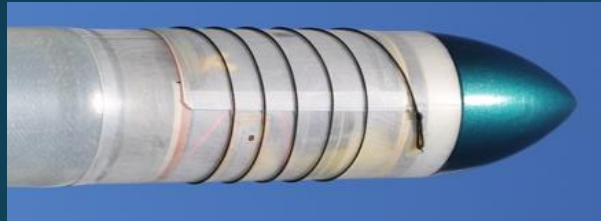
Erstellt von Pius Hurni

Inhalt

- Hauptkomponenten der Rakete
 - Bau des Druckbehälters aus 500 ml PET Flaschen
 - Bau weiterer Komponenten
 - Auswurfmechanik für den Fallschirm
 - Messkanal für Druckluftsensor
- Elektronik und Software
 - Bauteile und LED Anzeigen
 - Betriebsarten und Ausgabe der Flugdaten
 - Software Entwicklung
 - Drucksensor Berechnungen
 - Simulation Software, höchstem Punkt und Landung
- Konstruktion Startrampe
 - Aufbau zur Betankung von Wasser und Druckluft
 - Ablauf der Startphase
 - Faktoren welche die Flughöhe beeinflussen
- Berechnungen und Simulation
 - Beschleunigung, Druck, Geschwindigkeit
 - Analyse Flug von Raptor III
- Videos von Raketenstarts



Hauptkomponenten Rakete



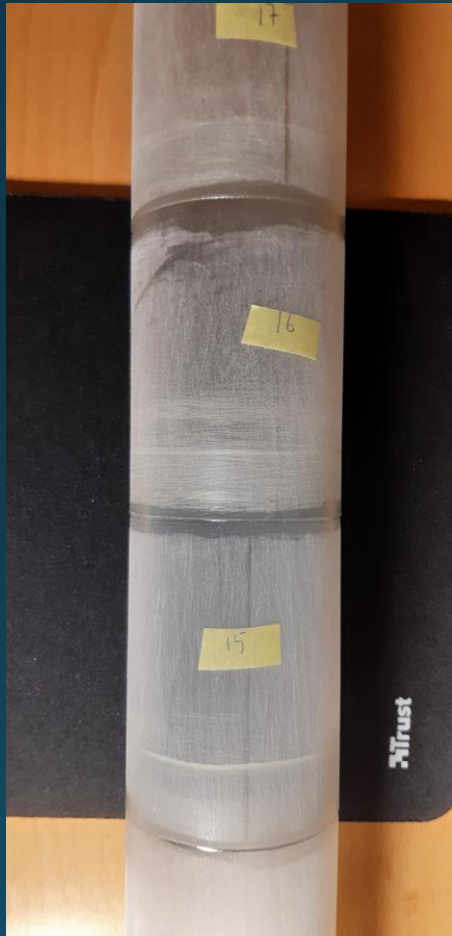
- Druckbehälter mit Startführung
- Leitflächen
- Adapter Nutzlastbehälter
- Raketenspitze
- Mechanik Fallschirmauswurf
- Druckluft Sensor / Messkanal
- Elektronik

Konstruktion Druckbehälter



- 500ml PET Flasche
 - Zylindrischer Teil mit Papiermesser ausschneiden
 - Mit heissem Wasser einseitig bis 20mm schrumpfen
 - Die Segmente müssen genau ineinander passen
 - Die Klebestellen und Oberflächen anschleiffen

Konstruktion Druckbehälter



- Kleben mit Araldite
 - Beim Zusammenfügen die Segment genau ausrichten
 - Überschüssiger Klebstoff beidseitig entfernen
 - Ein Segment nach dem anderen kleben und aushärten lassen
 - Der Zusammenbau braucht mehrere Tage

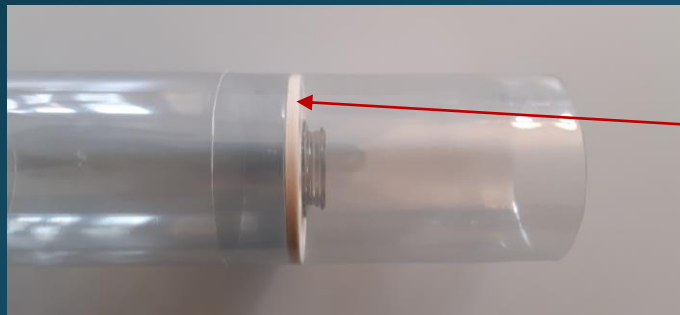
Konstruktion Druckbehälter



Ring aus
Flaschenhals



Flansch



Startführung
wird zwischen
zwei Segmente
geklebt

- Startführung

- Sie ist im Druckbehälter montiert
- Position ist bei $\frac{1}{3}$ der Gesamtlänge des Druckbehälters
- Die Startführung besteht aus Flaschenhalsring und Flansch
- Der Flansch dient zur Befestigung des Rings am Druckbehälter
- Der Flansch hat Löcher für den Druckausgleich

Konstruktion Druckbehälter



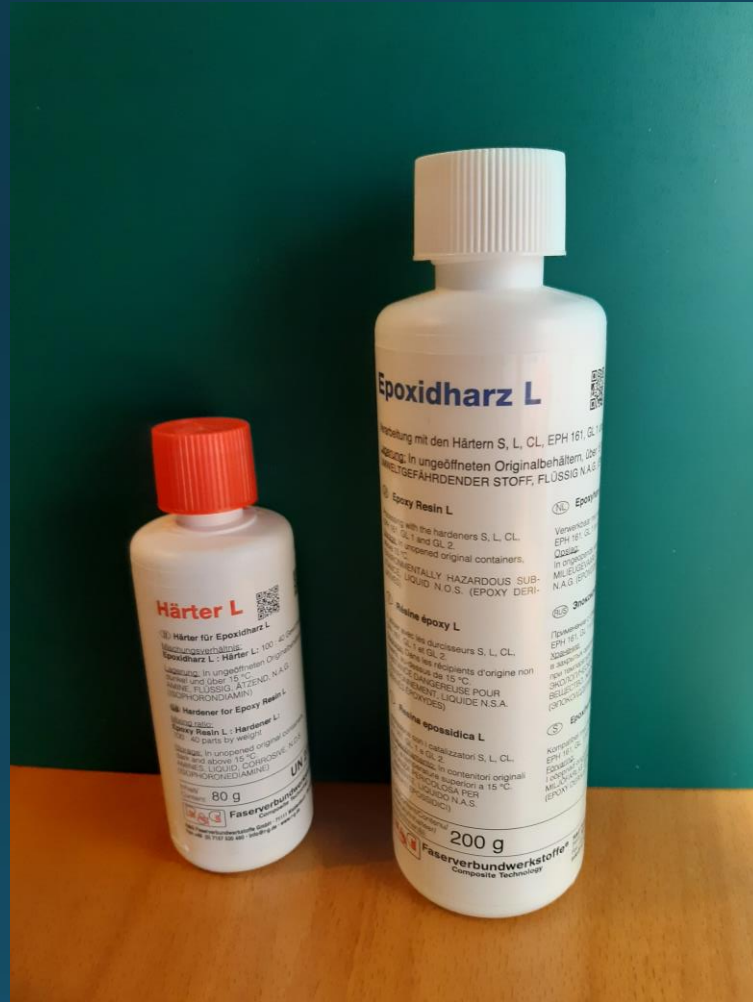
- Abschluss Druckbehälter
 - Beidseitig wird ein Flaschenhals für den Abschluss verwendet
 - Der Flaschenhals lässt sich am einfachsten mit Faserschlauch verstärken
 - Beim Bau werden beide Enden zuletzt an den Druckbehälter geklebt

Konstruktion Druckbehälter



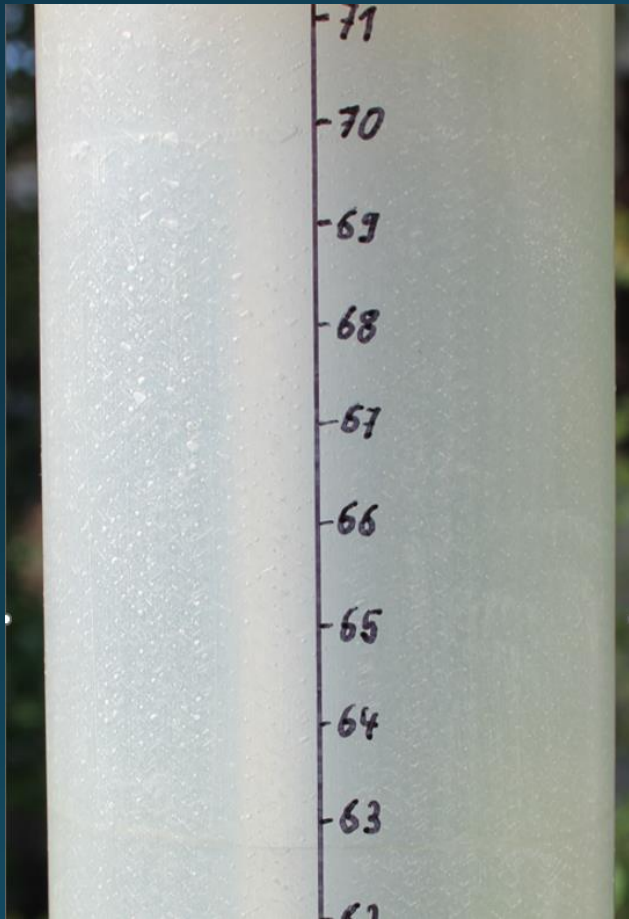
- Verstärkung
 - Mit Glas- oder Kohlefaserschlauch
 - Dreh-Mechanismus ist erforderlich
 - Horizontal, langes Rundholz
 - Zur Drehung verwende ich einen Motor vom Lego Roboter
- Bei Kohlefaser
 - 20 cm langer Bereich ist aus Glasfaser für Wasserstandsanzeige
 - Schlauch Segmente überlappen sich mit 20 mm
- Während der Trocknungszeit langsam drehen

Druckbehälter – Epoxidharz anbringen



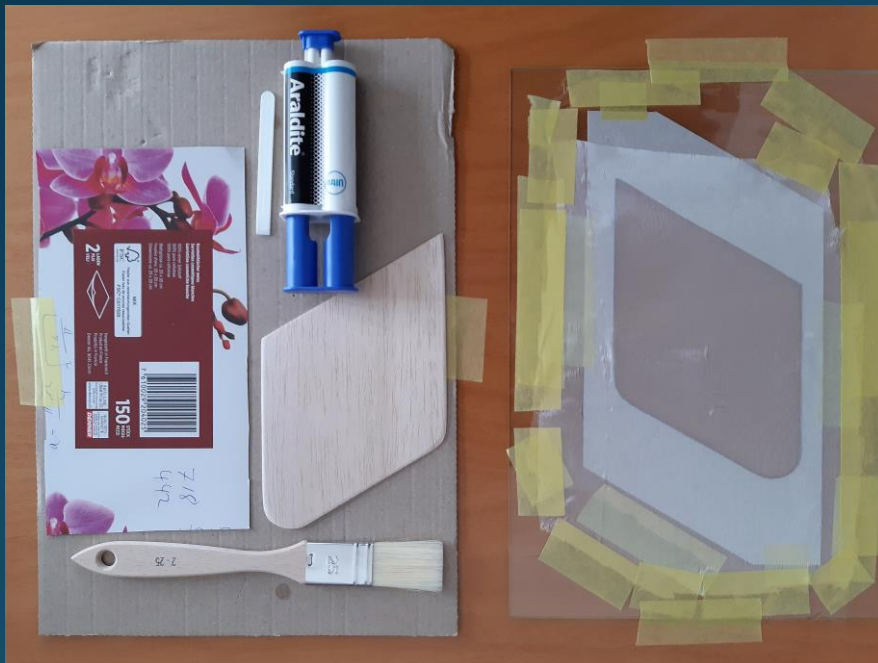
- Faserschlauch mit Epoxidharz kleben
 - Maske, Vinylhandschuhe und Augenschutz tragen
 - Raumlüftung garantieren
 - 2-komponenten Epoxidharz vorbereiten und anbringen
 - Behälter ständig drehen, auch beim Trocknen

Konstruktion Druckbehälter



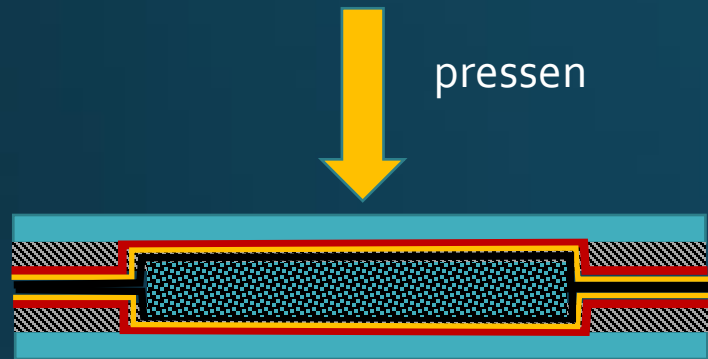
- Feinbearbeitung
 - Schleifen mit Sandpapier
 - Keine Verstärkung wegschleifen, nur Harz
 - Am besten kontrolliert man mit einer Schieblehre den Durchmesser
 - Die Verstärkung wird ca. 0.3mm dick

Konstruktion Leitflächen



- Optimiert auf Stabilität und kleines Gewicht
 - Kern aus Balsaholz 1.5mm dick
 - Verstärkt mit Glasfaser und Araldite
 - Dicke ca. 2.1mm
 - 3 Stück, trapezförmig
 - Wiegt bei 110 x 115 mm, ca. 10 g

Konstruktion Leitflächen



- Glasplatte
- Maske aus Karton
- Frischhaltefolie als Trennfläche
- Glasfaser
- Araldite
- Leitfläche aus Balsaholz

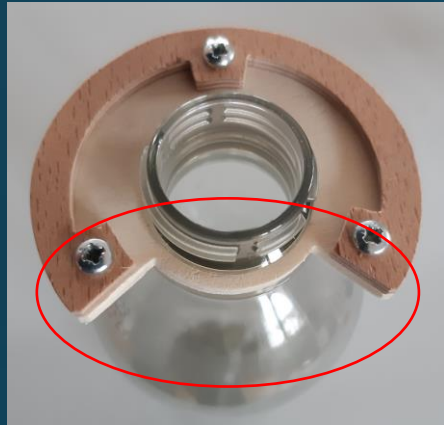
- Arbeitsablauf
 - Leitfläche aus Holz ausschneiden
 - Leitfläche in fertige Form schleifen
 - 2 Masken aus Karton erstellen
 - Dicke Karton ist $\frac{1}{2}$ der Holzdicke
 - Jede Maske auf eine Glasplatte kleben
 - Frischhaltefolie darüber befestigen
 - Glasfaser über Folie befestigen
 - Leitflächen kleben
 - Auf Leitfläche Araldit einseitig auftragen
 - In Maske legen und festdrücken
 - Araldit auf zweite Seite auftragen
 - Zweite Maske darüberlegen und festdrücken
 - Zum Trocken pressen

Konstruktion Leitflächen

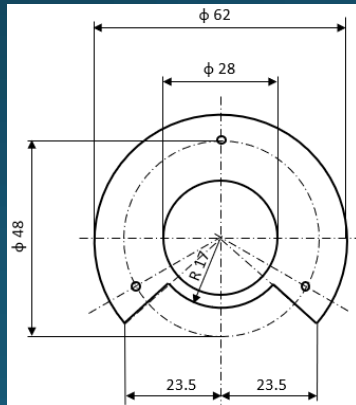
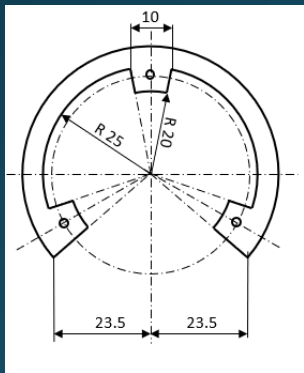


- Masken entfernen
 - Glasscheiben entfernen
 - Leitfläche aus Maske entfernen
 - Leitfläche ausschneiden
 - Rand in fertige Form schleifen
- Anbringen der Leitflächen
 - Sie werden am Schluss an den Druckkörper geklebt

Montage Nutzlastbehälter

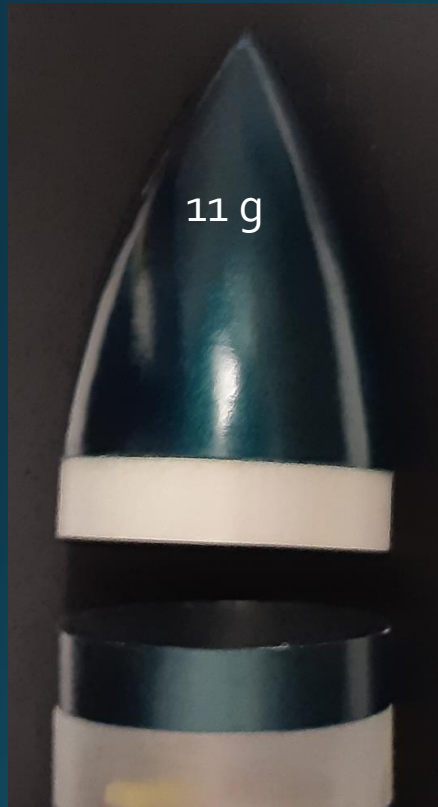


Bereich
Fallschirmverbindung



- Die Montage erfolgt über 3 Schrauben am Druckkörper
- Adapter Platten
 - Platten für Nutzlastbehälter und Druckkörper
 - Form berücksichtigt Verbindung zum Fallschirm
 - Fallschirmschnur kann sich daran nicht beschädigen

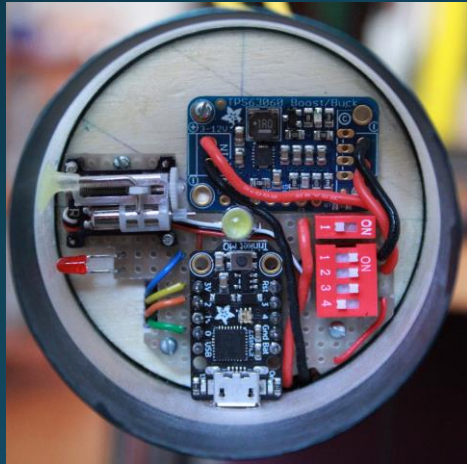
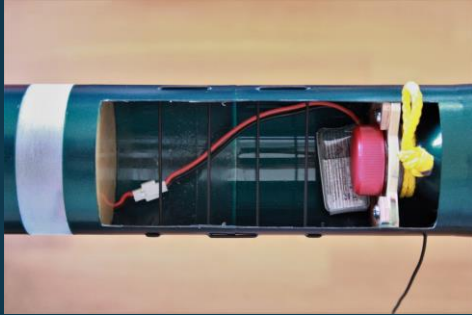
Konstruktion Raketenspitze



Messkanal Sensor

- Ist aus einem Styropor Kegel in Form geschliffen
- Die Oberfläche ist mit Araldite verstärkt
- Die Spitze lässt sich in den Nutzlastbehälter stecken
 - geschrumpfter Ring aus PET bildet das Verbindungsstück
- Fertiges Gewicht ca. 11 g
 - Innen leicht ausgehöhlt

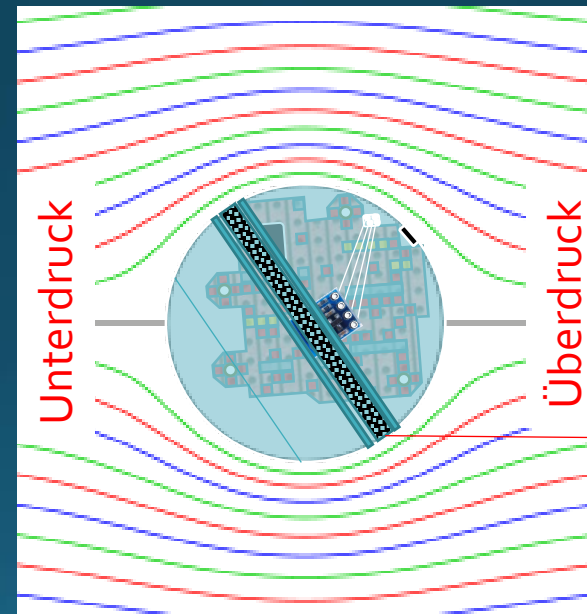
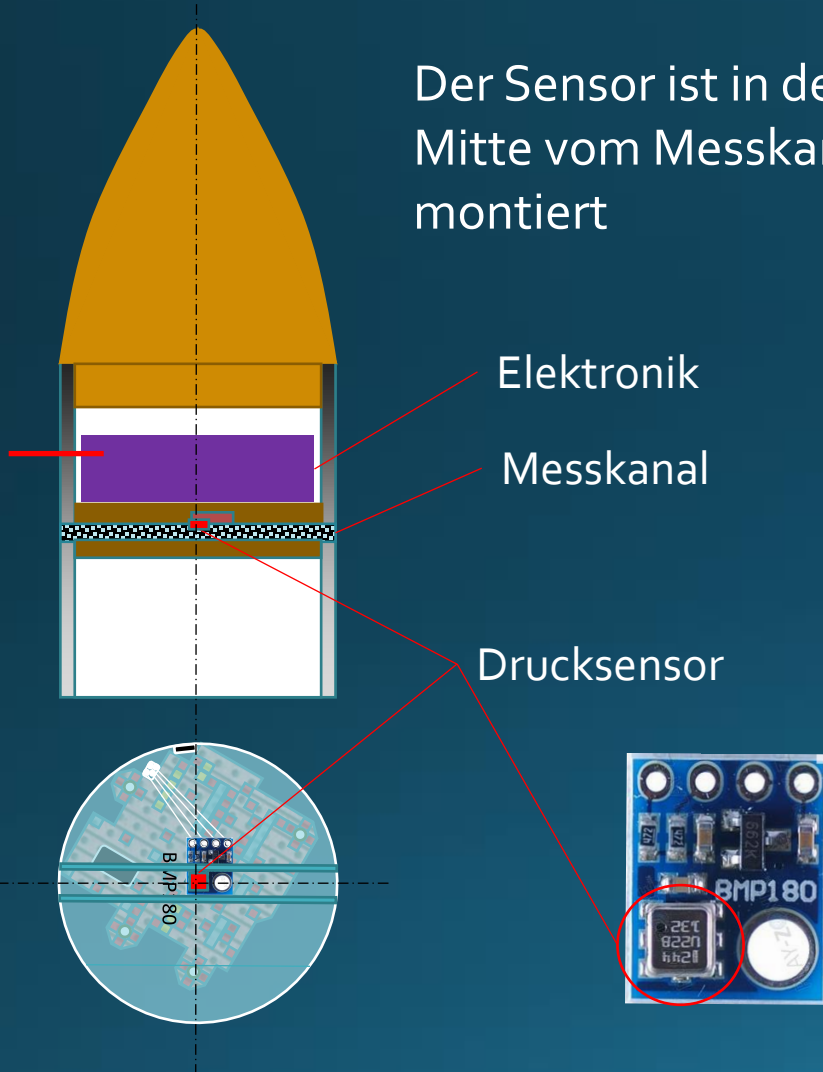
Auswurfmechanik für den Fallschirm



- Auswurf mit 2 Gummibänder
 - Gummiband für Nutzlastabdeckung
 - Gummiband für Fallschirmauswurf
- Luftdruck Messungen
 - Ermitteln von Start / Landung
 - Flughöhe und Geschwindigkeit
- Zeitpunkt Fallschirmauswurf
 - Höchster Flugpunkt detektiert oder
 - Timer abgelaufen
- Freigabe Nutzlastabdeckung
 - Linear Servo zieht Stift vom Gummiband

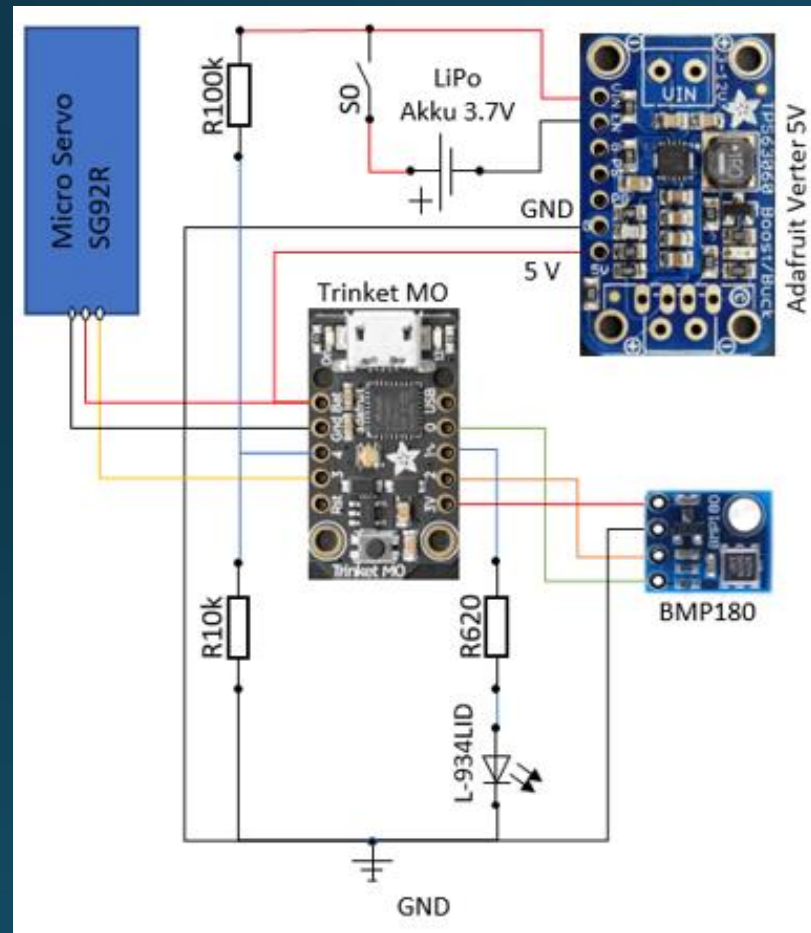
Messkanal für Druckluft Sensor

Der Sensor ist in der Mitte vom Messkanal montiert



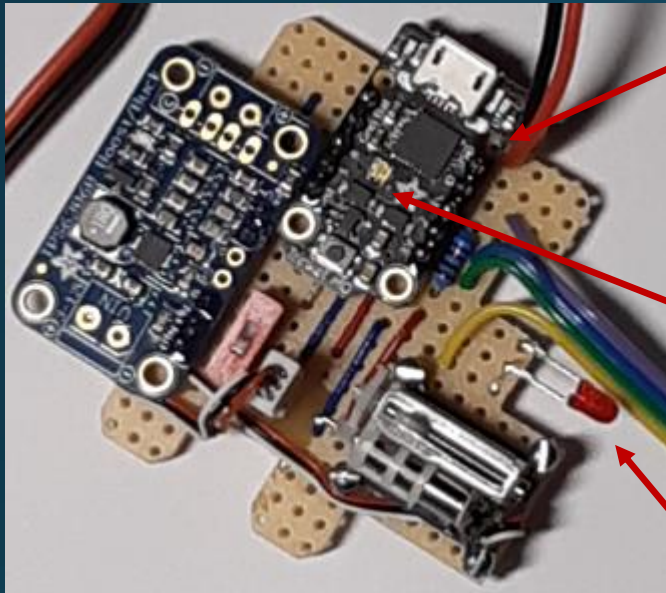
- Diagonaler Messkanal
- ⇒ kleines Volumen
- ⇒ Druckausgleich im Kanal
- ⇒ Windstabil

Elektronik - Bauteile



- Linear Servo
- Trinket MO Microprozessor
- 5V Buck-Boost 1000mA
- LEDs für
 - Flug- und Akku Status
 - Flughöhe, Starthöhe m.ü.M
- LiPo Akku 3.7V 400mAh
- Schalter Ein/Aus
- BMP180 Drucksensor
- Widerstände

Elektronik - LED Anzeigen



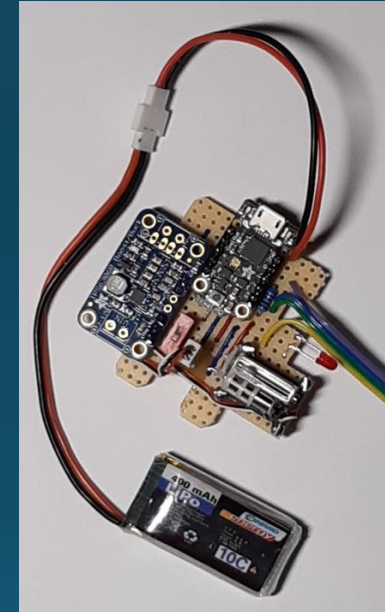
- Build in red pin #13 LED Trinket MO
 - Vor dem Start: Akku Spannung
 - Nach Landung: Zeitpunkt der Fallschirmfreigabe
- DotStar Trinket MO
 - Vor Start: LiPo Akku Status (Restlaufzeit > 4h grün, < 3h gelb, < 2h rot)
 - Nach Landung: Maximal gemessene Flughöhe
- LED L-934LID
 - Vor dem Start: Meter über Meer
 - Nach Landung: Gemittelte maximale Flughöhe
- Anzeigen sind über das Sichtfenster ablesbar



LED
Sichtfenster

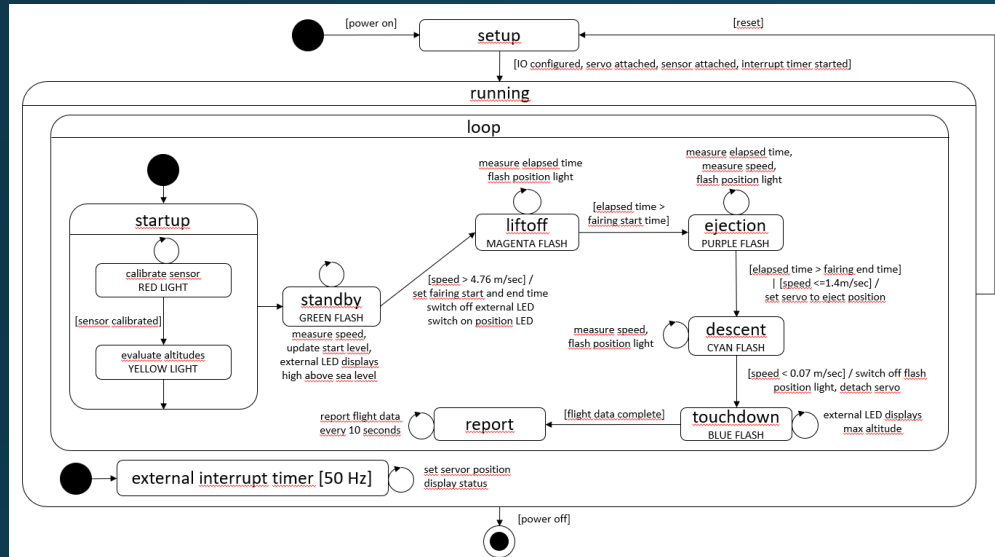
Elektronik - Betriebsarten

- Programmieren vom Microprozessor
 - Schalter in AUS Stellung, USB zum PC angeschlossen
 - Trinket MO verwendet die Speisung vom USB Anschluss
 - Servo hat keine 5V Speisung
- Debuggen mit eingeschaltetem Servo
 - Schalter in EIN Stellung, USB zum PC angeschlossen
 - Trinket MO verwendet die Speisung vom USB Anschluss
 - Servo hat 5V Speisung von Adafruit Verter 5V
- Normalbetrieb - Standby / Flug / Landung
 - Schalter in EIN Stellung, Speisung über Akku
 - Trinket MO verwendet Speisung von Adafruit Verter 5V
 - Servo hat 5V Speisung von Adafruit Verter 5V
- Auslesen der Flugdaten
 - Die Datenübertragung erfolgt über den USB Anschluss zum Notebook
 - Die Flugdaten werden alle 10 Sekunden über den seriellen Port (USB) ausgegeben



USB Anschluss

Entwicklung der Software



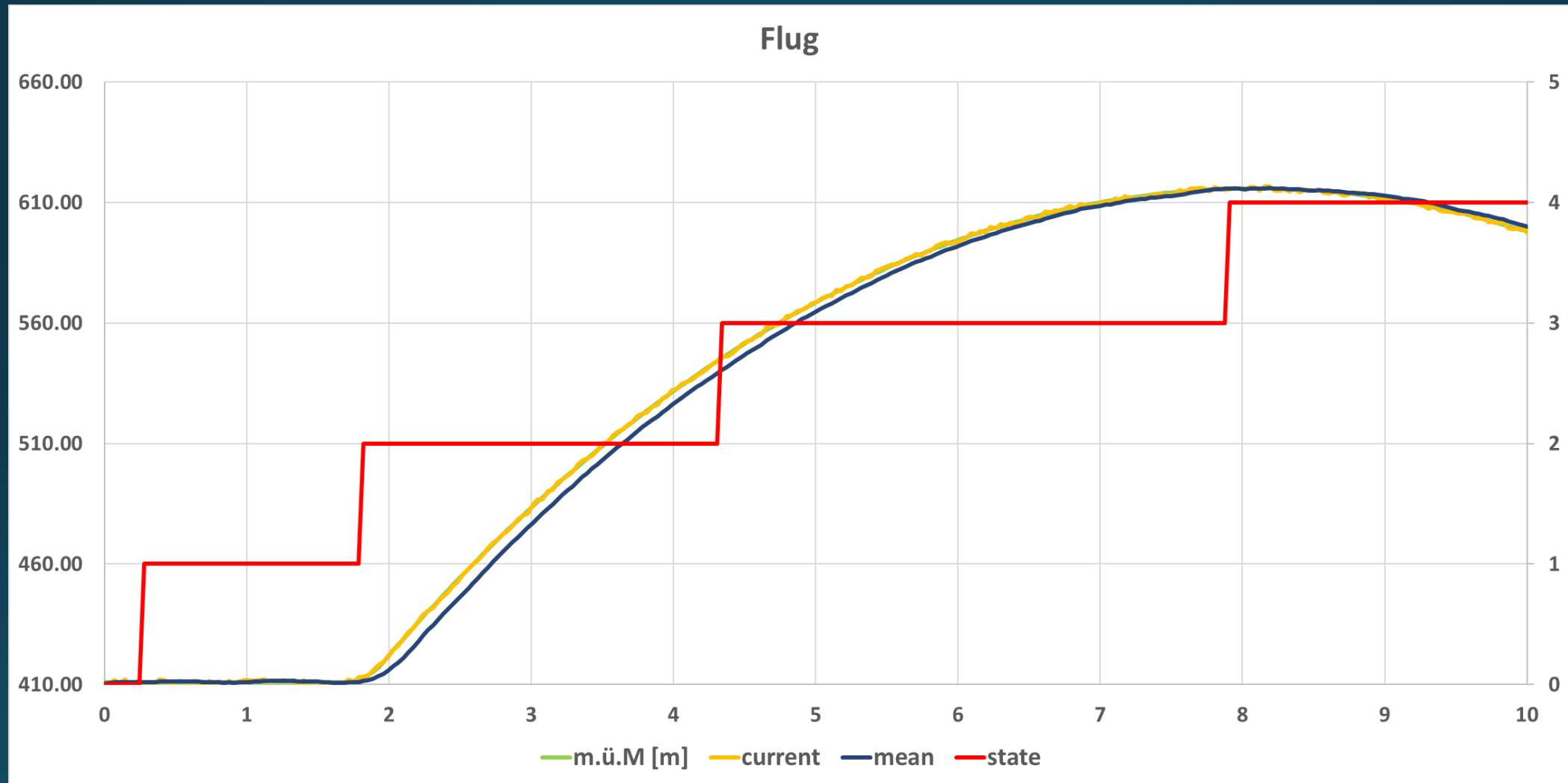
```
void loop() {
  switch (currentStatus) {
    case ST_STARTUP:
      dotStar.show(dotStar.Red);
      if (!altimeter.calibratePressure(PRESSURE_SENSOR_SEA_LEVEL)) {
        currentStatus = ST_ERROR;
      }
      dotStar.show(dotStar.Yellow);
      if (!altimeter.evaluateAltitudes()) {
        currentStatus = ST_ERROR;
      }
      powerOnTemperature = altimeter.readTemperature();
      currentStatus = ST_STANDBY;
      break;
    case ST_STANDBY:
      altitudes = altimeter.readAltitudes();
      timeStamp = millis();
      if (altimeter.isAboveLiftoffSpeedLimit()) {
        levelLed.off();
        FlightData.setStartLevel(altimeter.getStartLevel());
        FlightData.appendEntry(timeStamp, altitudes.actual, altitudes.mean, ST_LIFTOFF);
        currentStatus = ST_LIFTOFF;
      }
    else {
      ejectionStartTimeLimit = timeStamp + EJECTION_START_TIME_LIMIT;
      ejectionTimeLimit = timeStamp + EJECTION_TIME_LIMIT;
      FlightData.appendStartEntry(timeStamp, altitudes.actual, altitudes.mean, ST_STANDBY);
      altimeter.updateStartLevel();
      levelLed.display(convertToInch(altitudes.mean));
      builtInLed.display(convertToInch(36.0 * altimeter.getApogeeSpeedLimit()));
    }
    dotStar.flash(dotStar.Green);
    break;
    case ST_LIFTOFF:
      altitudes = altimeter.readAltitudes();
      timeStamp = millis();
```

- Tool Arduino IDE
- Programmiersprache C++
- «Multitasking»
 - Ansteuerung LEDs
 - Druckmessung
 - Zustandsmaschine
 - Detektion von Start / höchster Flugpunkt / Landung
 - 50Hz Interrupt Timer für Servo
 - Für periodisches PWM Signal
 - Arduino Servo Lib ist nicht kompatibel zu Trinket MO
 - Speichern der Flugdaten
 - Ausgabe der Flugdaten

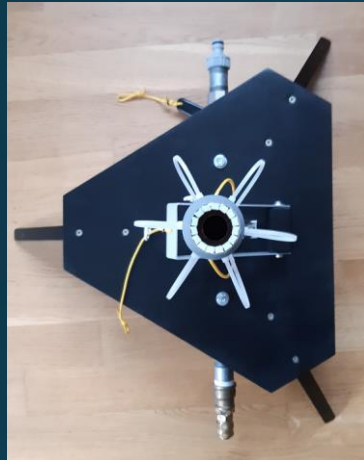
Berechnungen mit Drucksensor

- Sensor Werte
 - Alle 35ms wird der aktuelle Höhenwert (Meter über Meer) ermittelt
 - Standardabweichung ist normalverteilt mit einem Wert von 0.4
- Nach dem Einschalten wird der Sensor auf die Starthöhe kalibriert
- Alle 35ms werden folgende Werte ermittelt
 - Gleitender Mittelwert h_m aus 8 Höhenwerten
 - Minimalen h_{min} und maximalen h_{max} Mittelwert
 - Vertikale Geschwindigkeit v_m aus dem 1. und 8. Höhenwert
- Alle 35ms wird auf erfolgten Start / erreichen des höchsten Flugpunkts geprüft
 - Startzeitpunkt wenn $v_m > 40$ km/h
 - Apogee wenn $v_m < 14$ km/h UND $h_{max} > h_m$
- Alle Sekunden wird auf erfolgte Landung geprüft
 - Merkt sich jede Sekunde den Mittelwert h_m
 - Landung ist erfolgt wenn die Geschwindigkeit aus den Mittelwerten < 0.54 km/h ist

Simulation der Software

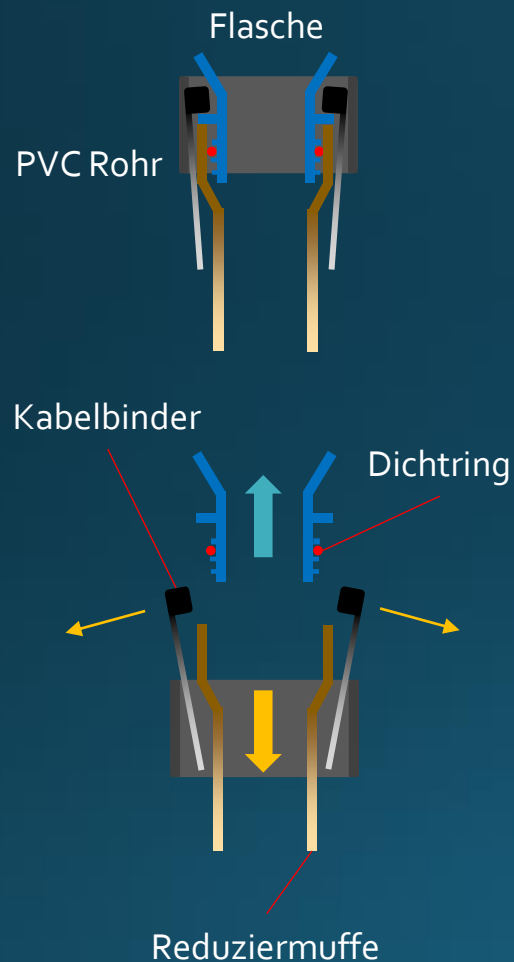


Konstruktion Startrampe



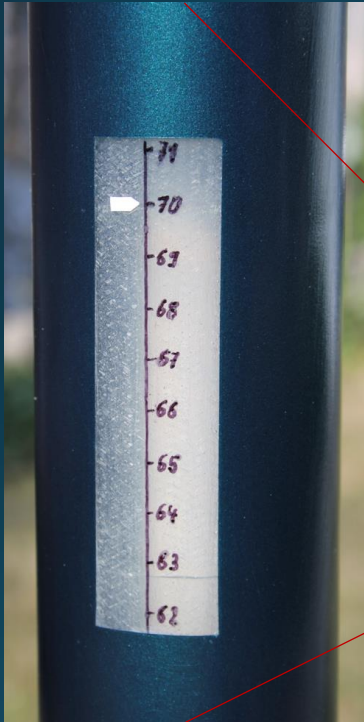
- Konzept gemäss RAKETFUED ROCKET
- Die Plattform steht auf 3 Füßen
- Sie ist mit 3 Erdnägeln gegen das Umkippen gesichert
- Launch Tube kann in das Kupferrohr eingesteckt werden
- Pneumatik Teile sind an der Plattform fest montiert

Druckanschluss / Start Rakete



- Die Rakete (Flaschenhals) wird mit Kabelbinder und PVC Rohr festgehalten
- Der Freigabemechanismus wird über Schnur bedient
 - PVC Rohr wird nach unten gezogen
 - Kabelbinder werden freigegeben
- Die gesamte Flaschenöffnung wird als Raketendüse verwendet
- Dichtring am Gewindeende vom Flaschenverschluss

Betanken mit Wasser



- Die Markierung an der Rakete erlaubt eine bestimmte Menge zu betanken
- Beim Betanken wird zusätzlich eine Reserve einberechnet
- Die Reserve ist die Menge welche beim Druckaufbau verloren geht
 - Durch Videoanalyse bestimmt
- Durch dieses Konzept kann die erforderliche Menge Wasser genau betankt werden

Erzeugen der Druckluft

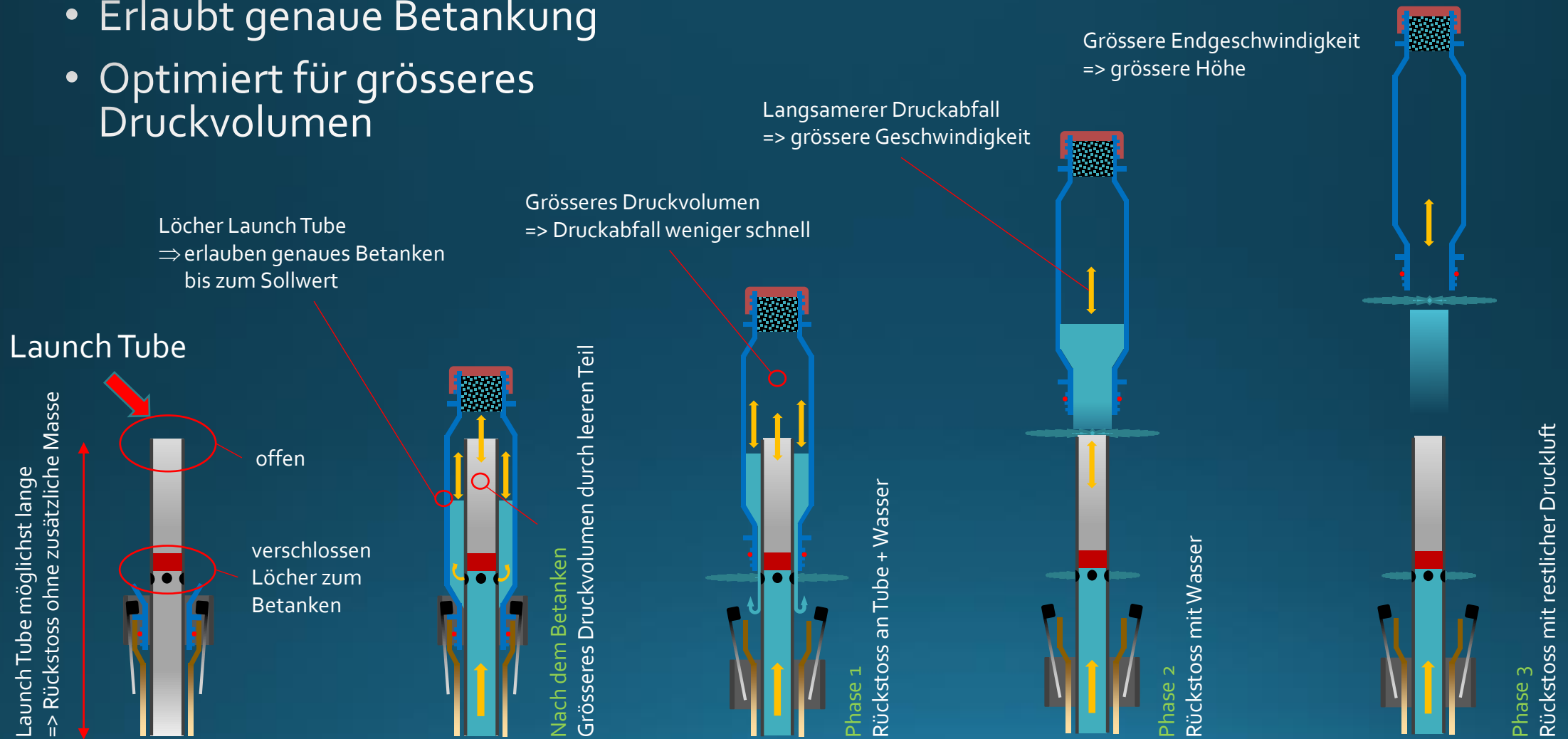


11 bar Kompressor

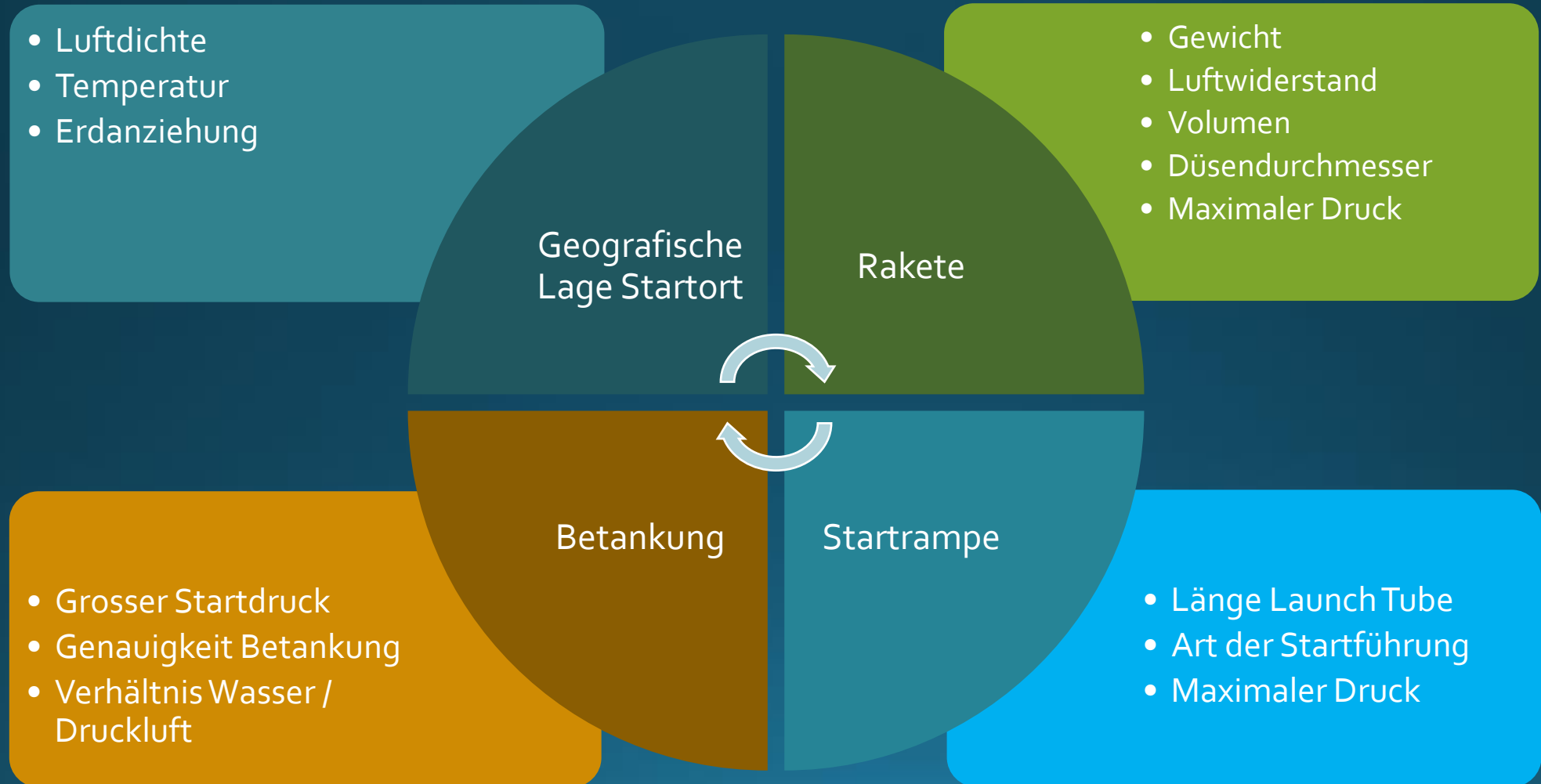
- Mit einem Kompressor wird Luft bis zum Sollwert reingepumpt
- Der Kompressor hat eine Druckanzeige in bar
- Der Kompressor wird ausgeschaltet wenn der Druck erreicht ist
- Durch das Rückschlagventil an der Startvorrichtung fließt kein Wasser in die Luftzufuhr

Launch Tube - Optimiertes Design

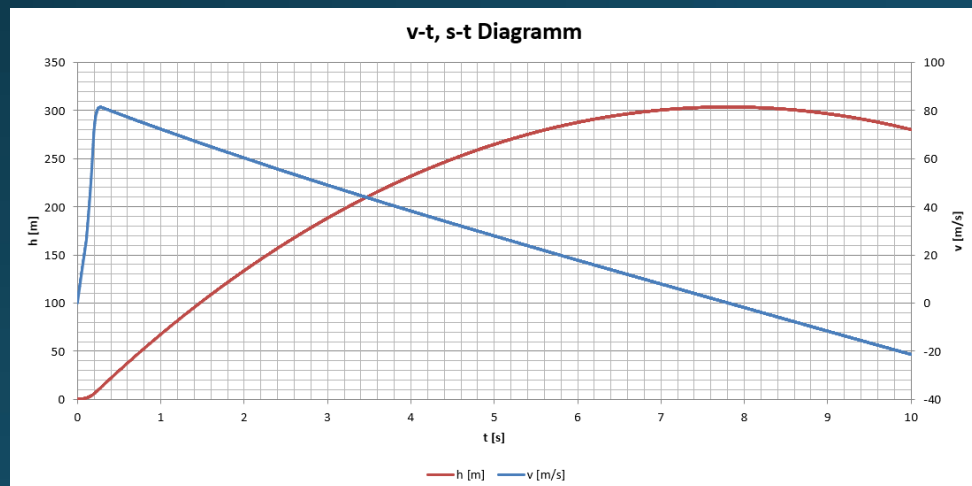
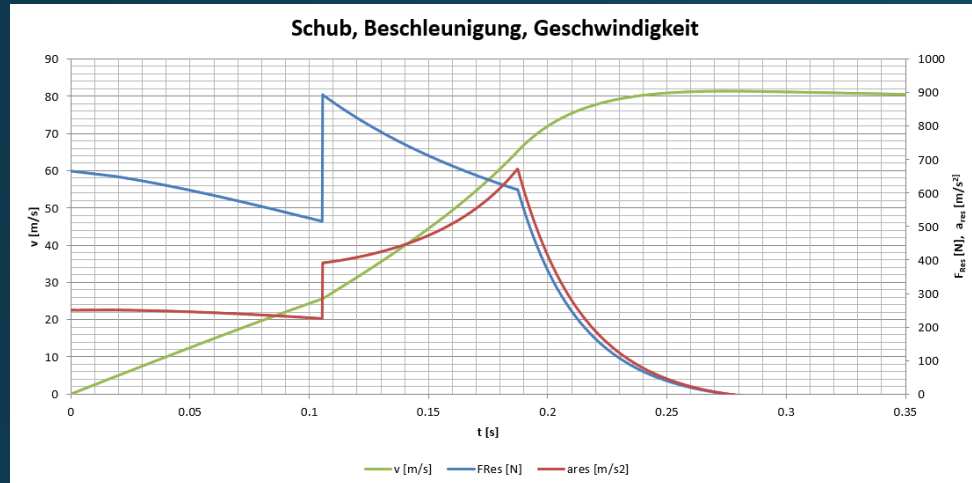
- Erlaubt genaue Betankung
- Optimiert für grösseres Druckvolumen



Flughöhe – Abhängige Werte



Berechnungen mit Excel



- Rakete
 - Leergewicht
 - Schwerpunkt / Gierachse / Kaliber
 - Luftwiderstand
 - Maximaler Druck
- Startvorrichtung
 - Länge und Art der Launch Tube
 - Sollwert Wasseranzeige
- Fallschirm
 - Gewicht
 - Belastung und Sinkgeschwindigkeit
 - Vorschlag Timer Wert
- Simulation vertikaler Flugbahn
 - Betankungswerte und Flughöhe
 - Skalenwert für Betankung
 - Erwartenden Temperatur im Druckkörper
 - Diverse Grafiken für Höhe / Geschwindigkeit / Beschleunigung / Temperatur / Schub / Druckverlauf

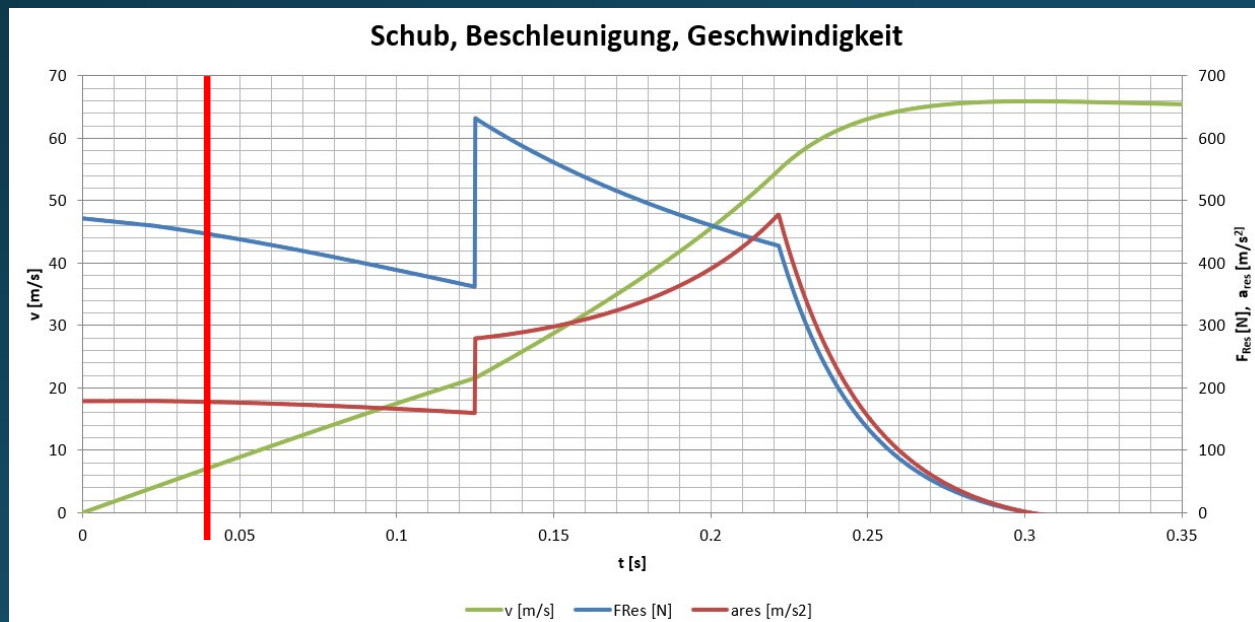
Flug Raptor III - Start

Zeitpunkt nach Start $t = 40 \text{ ms}$

Rakete 25.7 km/h 2.52 kg 0.14 m 18.09 G 446.5 N

Wasser 165.6 km/h 1.62 kg

Luft 0.0 km/h 4.50 l 51 g 10.56 bar



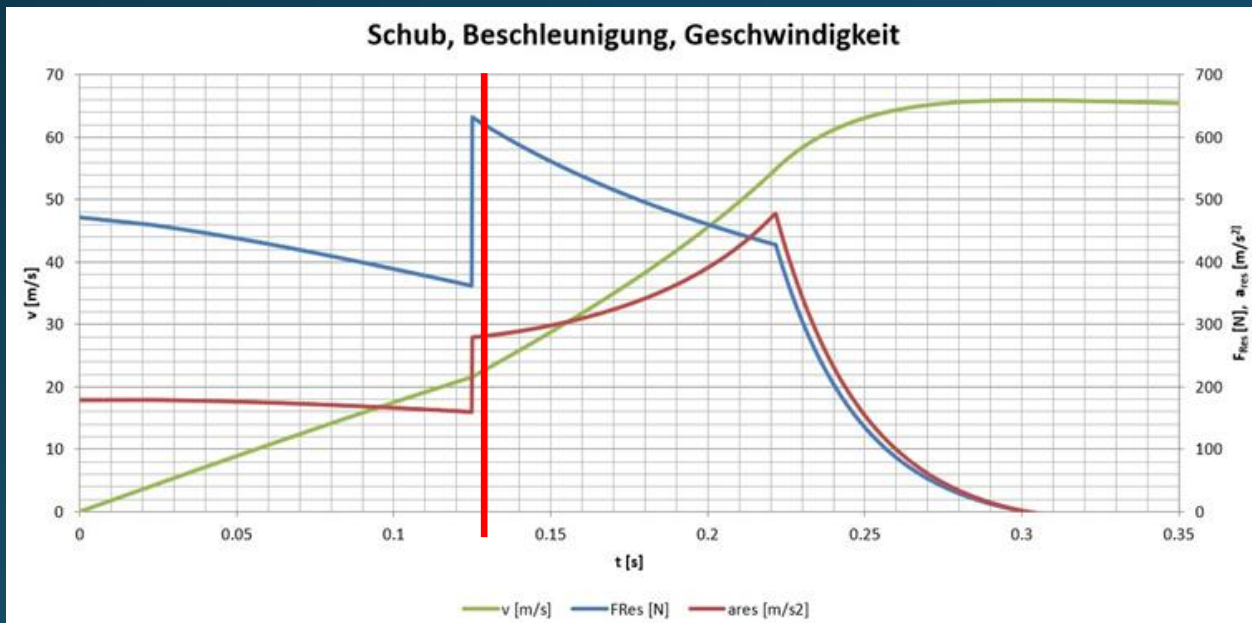
Flug Raptor III – Ende Launch Tube

Zeitpunkt nach Start $t = 130 \text{ ms}$

Rakete 82.7 km/h 2.19 kg 1.49 m 28.75 G 617.1 N

Wasser 147.6 km/h 1.29 kg

Luft 0.0 km/h 4.81 l 47 g 8.4 bar



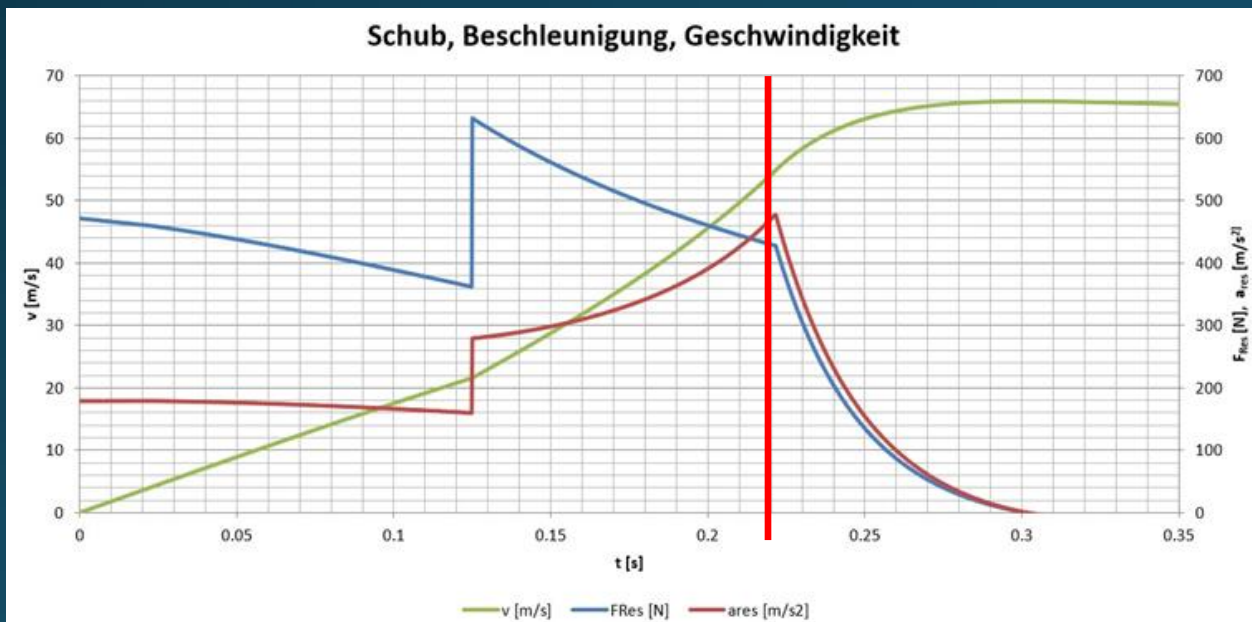
Flug Raptor III – Ende Wasserausstoss

Zeitpunkt nach Start $t = 220 \text{ ms}$

Rakete 194.8 km/h 0.92 kg 4.84 m 47.92 G 430.2 N

Wasser 122.6 km/h 0.02 kg

Luft 0.0 km/h 6.16 l 47 g 5.8 bar



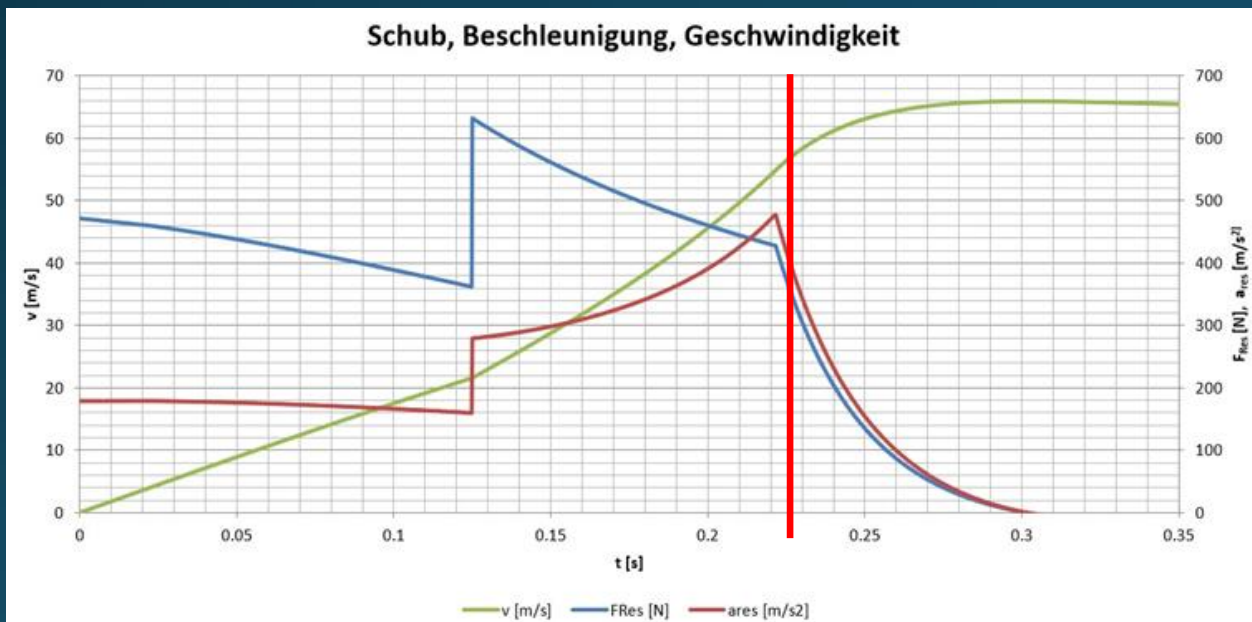
Flug Raptor III – Beginn Luftausstoss

Zeitpunkt nach Start $t = 226 \text{ ms}$

Rakete 204.5 km/h 0.89 kg 5.171 m 41.06 G 362 N

Wasser 0.0 km/h 0.00 kg

Luft 1345 km/h 6.18 l 43 g 4.9 bar



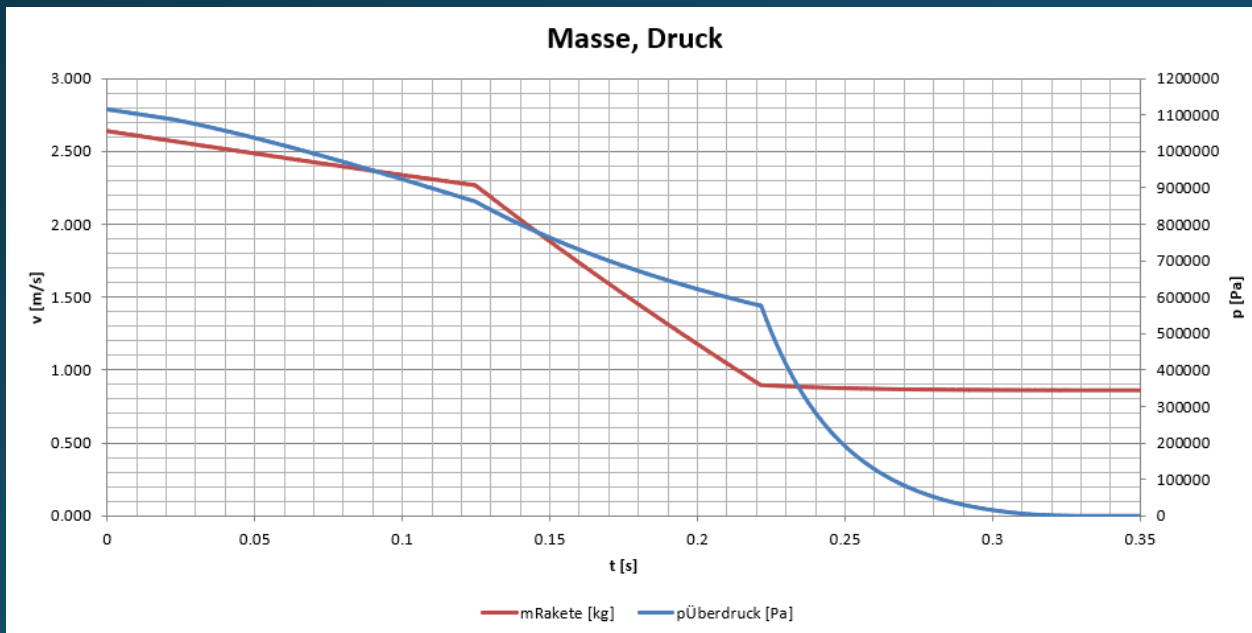
Flug Raptor III – Start Zeitlupe

Maximalwerte

Rakete 237.4 km/h 211 m 48.67 G 632.1 N

Wasser 170.15 km/h

Luft 1391 km/h 11.15 bar 88.5 bis -95 °C



Flug Raptor III – Auswurf Fallschirm

Freigabe 0.2 s nach dem höchsten Flugpunkt

2 Sekunden nach Freigabe wird Rakete zum Fallschirm gezogen

Stabile Gleitphase nach 3.5 s erreicht

