Folie 1 Thema: Feststoff-Raketenantriebe

- Überblick
- An Siggi weitergeben

→ Siggis Vortrag

Folie 2 Kapitel: Ermittlung der Treibstoff-Parameter

- **Charakteristische Geschwindigkeit**
  - konstante Größe für einen bestimmten Treibstoff
  - Abhängig von Mischungsverhältnis, Korngrößen-Verteilung, Kornoberflächen, Verunreinigungen, Herstell-Prozess (mahlen, mischen, Temperatur), Lieferant
  - Nicht verwechseln mit spezifischem Impuls
  - Hohe Gasmenge und hohe Temperatur sind günstig
  - Feststoff-Anteil bei Reaktionsprodukten wirkt sich negativ aus.
  - Ermittlung aus Messung
  - Berechnung theoretisch, bei Reaktionsprodukten mit hohem Feststoff-Anteil muss die 2-Phasen-Strömung beachtet werden
- **Treibstoff-Dichte**
  - Hohe Dichte bringt stärkeren volumenspezifischen Schub aber auch höhere Masse
  - Lunker und Mikro-Blasen verringern die Dichte
  - Praktisch sind 97% der Maximaldichte gut erzielbar
- **Brennrate**
  - Abhängig vom Brennkammerdruck und Treibstoff-Temperatur
  - Vereinfachte Darstellung über Gesetz von Robert und Vieille und Abwandlungen
  - Reale Zusammenhänge komplizierter, Brennraten-Diagramme
  - Plateau- oder Mesa-Treibstoff
  - Messung der Brennrate in Test- oder Normbrennkammer oder "Strand-Burner"
- **Adiabatenexponent**
  - Exponent, der bei schnellen Entspannungen das Verhältnis zwischen Druckab- und Volumen-Zunahme beschreibt.
  - pV^k=const.
  - Bei Gasströmungen mit hohem Feststoff-Anteil muss die 2-Phasen-Strömung beachtet werden
  - Nicht auf Formeln zu Gasentspannung und 2-Phasen-Strömung eingehen

Folie 3 Beispiele verschiedener Treibstoffe

- **Schwarzpulver**
  - Mischung 75/15/10
  - Isp = 600 .. 800 m/s
  - c* = 400 .. 533 m/s
  - Temperatur ca. 2400K
  - Dichte: 1,6g/cm³
  - Brennrate ca. 8 bis 25mm/s bei 1 bis 30bar

- **Candy**
  - Bsp: KN/Zucker
  - Quelle: http://www.nakka-rocketry.net
  - Mischung 65/35 O/F bei 1000psi (68bar)
  - Isp = 1608m/s (164 sec bei 9,806m/s²)
  - c* = 909 m/s
  - Temperatur: ca. 1720K
  - Dichte: 1,8373 g/cm³
  - kappa: k=1.133 (Gemisch) -> c* k'=1.0437 (2-phase-flow)-> Isp
  - Brennrate: 7,09 bis 7,75 mm/s bei ca. 34,5 bar (500 psi) (0.279 in./sec bis 0.305in./sec)
  - M = 41.98 kg/kmol

- **AP-Composit**
  - Space-Shuttle-Booster-Treibstoff
  - Isp = 2374 - 2629 m/s
  - Temperatur 3480K
  - Dichte ca. 1,772g/cm³
  - Molar mass [gram/mole]: 27.8
  - Brennrate: 7.4 mm/s bei 6.9 MPa (69bar), 294 K
  - kappa: 1.18 (Specific heat ratio)
  - Temperatur-Empfindlichkeit [%/K] 0.20
  - Mischung
    - 16% Atomized aluminum powder (fuel)
    - 69.8% Ammonium perchlorate (oxidizer)
    - .2% Iron oxide powder (catalyst)
    - 12% Polybutadiene acrylic acid acrylonite (binder)
    - 2% Epoxy curing agent
  - Space-Shuttle-Booster: Isp: 242 seconds at sea level or 268 seconds in a vacuum (2374m/s bis 2629m/2)
  - The propellant is an 11-point star-shaped perforation in the forward motor segment and a double-truncated-cone perforation in each of the aft segments

- **Zink/Schwefel**
  - Schlechte Reproduzierbarkeit
  - Schub bei Bodentests und Flugversuchen kann deutlich abweichen
  - Schlanke Düsen mit langem Ein- und Auslaufkegel nötig
  - Quelle: VLAAMSE RAKET ORGANISATIE http://www.vro.be
  - Mischung z.B. 67.1% Zinc and 32.9% Sulfur
  - Spezifischer Impuls typisch: 340m/s bis 500m/s (35s to 50s, maximal 60s)
  - Brennrate 35 cm/s bis 700 cm/s, oder 3cm/s bis 10cm/s, 17 – 18 cm/s
  - Dichte: 3.4 g/cm³ bis 4.4 g/cm³
  - nearly 50% of the efficiency was lost due to the sublimation of zinc sulfide during expansion in the nozzle. At 1458°K, zinc sulfide solidifies from the gaseous state, and can no longer expand in the nozzle
  - the thrust during flight could be 3 to 4 times larger than the thrust during ground tests, with corresponding smaller duration
  - Schmalere Düsen-Ein-/Ausgangswinkel nötig (Ausgangswinkel: 15°, Eingangswinkel: 30°-35°)
  - the remains are in general about 5% of the total propellant mass / amounts of remains (up to 40%) in the motor case
  - Düse: Ae/At ratio of 33. / Minimum bei 10 und 50 / an optimum is reached for values of Ae/At between 16 and 18

Folie 4 Praktische Bestimmung von c*

- Test-Brennkammer ohne divergenten Düsenteil
- Druckverlauf messen
- A_t muss konstant bleiben
- c^*_{eff} ist der praktisch erreichte Wert (Verlust-behaftet)

Folie 5 Theoretische Bestimmung von c*

- Bestimmung der Parameter recht aufwändig
- κ für Gas/Rauch-Gemisch verwenden (→ 2-Phasen-Strömung)
- Der Wert muss nach unten korrigiert werden wegen Verlusten durch unvollständige Verbrennung
- Weitere Verluste bei der Berechnung der Effizienz durch
    - Düsenform
    - Reibung (2-Phasen-Strömung)
    - Niederdruck-Phasen

Folie 6 Bestimmung von r

- Testbrennkammer ohne divergenten Düsenteil
- Zeit- und Druckmessung
- Mehrere Versuche mit unterschiedlichem Düsen-Durchmesser
- Ermittlung der Brennrate bei bestimmten Drücken
- Idealisierung der Mess-Ergebnisse
- Brennratenkoeffizient a ist temperaturabhängig
- Druck-Exponent $n < 1$ für stabile Verbrennung nötig
- Verschiedenartige Brenn-Charakteristiken möglich

Folie 7 Grenzen der Testbrennkammer

- Aus der Brennrate den Massenstrom berechnen
- Mathematische Darstellung der verbrannten Masse und Massenfluss durch die Düse
- Beide Massenströme im Gleichgewicht
- Stabile und instabile Verbrennungs-Zustände
- „Instabile Zone“ mit Testbrennkammer nicht messbar

Folie 8 Kapitel: Berechnung des Treibstoffabbrands

- Vorstellen verschiedener Brenn-Geometrien
- Wie berechnet man Druck und Schub beim Abbrand

Folie 9 Abbrand-Geometrie

- Jede Geometrie hat einen speziellen Verlauf der Brennfläche während dem Abbrand
- Möglichst konstante Abbrandfläche ist am effizientesten (→ konstante Düsenentspannung, Auslegung der Druckkammer) (nur gültig, wenn die Düse nicht erodiert)
- Die gezeigten Verläufe gelten nur für ganz bestimmte Verhältnisse von Länge zu Durchmesser der Treibstoff-Blöcke
- Durch die Formen kann Treibstoff-Erosion beeinflusst werden (Errosion an Orten hoher Strömungsgeschwindigkeit (hohe innere Klemmung) und exponierte Stellen)

Folie 10 Berechnung der Brennfläche

- Idealisierung: Gleichmässiger Abbrand über gesamte Fläche, d.h. gleiche Brennrate an allen Orten (keine Erosion) und gleichzeitige Zündung aller aktiven Oberflächen
- Zerlegung in einfache geometrische Formen

Folie 11 Klemmung

- Klemmung: Verhältnis zwischen Brennfläche und Düsenhals-Querschnittsfläche
- Äußere Klemmung beeinflusst den Brennkammerdruck
- Innere Klemmung zur Beurteilung der Gefahr von Erosion
- Verhältnis zwischen innerer und äußerer Klemmung beachten
- Weitere Einflüsse der Geometrie auf die Verbrennung
    - Länge der Brennkammer
      ⇒ Verweildauer der Gase in der Brennkammer
      ⇒ längere Reaktionsdauer aber auch Temperaturverlust über Wände
    - Spalt zwischen Treibstoff-Blöcken
      ⇒ Zündverzögerung in den Spalten
      ⇒ veränderte Abbrand-Geometrie und langsamer Druck- und Schubanstieg
- Höhere Motoren-Effizienz bei möglichst konstanter Klemmung während Abbrand
- Düsen-Erosion und Treibstoff-Erosion beeinflussen die Klemmung
- **Einschub:** Entzündbarkeit
- Probleme, wenn Treibstoffblöcke zu dicht aufeinander liegen ⇒ Zündverzögerung und deutliche Abweichung von der Soll-Schubkurve

Folie 12 Düsen-Geometrie

- Aufgabe der Düse: Entspannung und damit Beschleunigung der Gase
- Blockierte Strömung: Schallgeschwindigkeit im Düsenhals
- Optimale Ausnutzung, wenn am Düsenaustritt P_a herrscht
- Überexpansion möglich, Gefahr der Strömungs-Ablösung
- Einseitige Strömungsablösung möglich ⇒ Schubkraft wirkt zur Seite
- Düsenöffnungswinkel üblicherweise bei ca. 30°
- Berechnung der Entspannung einer Düse
- Schubkoeffizient: Wirkung von Treibstoff und Düse auf den Schub
- Impuls- und Druckanteil des Schubs
- Wertebereich für Schubkoeffizient

Folie 13 Optimaler Schubkoeffizient

- Verlauf des Schubkoeffizienten bei verschiedenen Entspannungs-Verhältnissen und konstantem Brennkammerdruck
- Optimierung von Düsen auf Betriebs-Brennkammerdruck
- Hohe Drücke und Temperaturen sind günstig für den Schub (T hoch ⇒ c* hoch)

Folie 14 Schubkoeffizient über Brennkammerdruck

- Verlauf des Schubkoeffizienten bei konstanten Entspannungs-Verhältnissen (unveränderliche Düse) und variablem Brennkammerdruck
- c_F-Verlauf während dem Abbrand bei veränderlicher Brennfläche
- Hohe Drücke sind günstig

Folie 15 Berechnung eines Stirnbrenners

- Gegeben: I=150Ns, t_B=6s, P_{max}=30bar, c*=500m/s, r = 25mm/s (bei 30bar), rho=1,6g/cm³, c_F=1,5
- Berechnung:
  - Isp = 1,5 * 500 = 750m/s
  - m_Trst = 150Ns/(750m/s) = 0,2kg = 200g
  - w = 25mm/s * 6s = 150mm = 15cm
  - Brennfläche A_b= 200g/(15cm*1,6g/cm³) = 8,33cm² (D_i= 3,26cm)
  - Klemmung K = 30 * 10^5/(1600 * 500 * 0,025) = 150
  - Düsenquerschnitt A_t= 833/150 = 5,56mm² (D_t= 2,66mm)
  - Schub F = 1,5 * 5,56/1000000 * 30 *10^5 = 150Ns / 6s = 25N
- Spezifischer Impuls = Impuls pro Masse: Einheit ist Ns/kg = m/s und kann als "effektive Ausstömgeschwindigkeit" gesetzt werden

Folie 16 Berechnung bei variabler Brennfläche

- Annahme: Gleichgewicht zwischen verbrannter Masse und Masse durch Düse
- Vereinfachung bei „idealer Brennrate“:

  P = K rho c* r

  P = K rho c* a $(P/Pref)^n$

  P = U P^n (U = K rho c* a / $Pref^n$)

  Log P = log (U P^n) = log U + log P^n = log U + n log P

  (1-n) log P = log U

  log P = 1/(1-n) log U

  log P = log U ^(1/(1-n))

  P = U^(1/(1-n))

  Damit

  P = (K rho c* a / Pref^n)^(1/(1-n))
- Üblicherweise Iteration zur Bestimmung des Drucks
- Schrittweise Berechnung des gesamten Abbrands

Folie 17 Kapitel: Berechnung des Motorgehäuses

- Nur kurze Übersicht mit den wichtigsten Betrachtungen
- Welche Belastungen wirken auf das Gehäuse
- Einige Formeln zur Berechnung

Folie 18 Gehäusebelastung

- Mechanische Belastung: Spannungen
- Thermische Belastung
- Festigkeits-Verlust bei höheren Temperaturen
- Isolation: Liner
- Hinterströmungen verhindern (hinter Isolation oder an Dichtungen)
- Kühlungs-Methoden:
    - Kapazitiv
    - Wärmeleitung/Konvektion/Strahlung
    - Ablativ-Kühlung
    - Aktive Kühlung (z.B. Flüssig-Triebwerke)
- Chemische Belastung (Lagerung)

Folie 19 Hüllenspannung

- Spannungen in drei Richtungen
- Radialspannung ist eine Druck-Spannung (deswegen negativ), der Rest sind Zugspannungen
- Die Umfangspannung ist am größten
- Man kann zeigen, dass die Umfangspannung immer mindestens doppelt so groß ist, wie die Längs-Spannung:

  Sig_L
  = P/((Da/Di)²-1)
  = (P Di²)/((Da-Di)(Da+Di))
  Mit Da = Di+2s:
  (P Di²)/((Di+2s-Di)(Di+2s+Di))
  = (P Di²)/(2s(2Di+2s))
  = P * Di/(2s) * Di/(2(Di+s))
  = sig_phi * Di/(2(Di+s))
  ≤ ½ Sig_phi

  also Sig_phi ≥ 2* Sig_L
- Deswegen platzen längliche, unbeschädigte Gehäuse immer mit Längsrissen
- Deswegen bei faserhaltigem Hüllenmaterial (z.B. Papier) die Faser in Umfangsrichtung legen.
- Es gibt verschiedene Spannungshypothesen zur Berechnung einer eindimensionalen Vergleichsspannung
- Überschlägig: nur Sig_Phi beachten
- Auslegung: Sig_Phi ≤ ½ Sig_Versagen (d.h. plastische, nicht reversible Verformung bei plastischen Werkstoffen oder Bruchgrenze z.B. bei Fasern), d.h. doppelte Sicherheit gegen Versagen (hier: Faktor 2; Luftfahrt: üblicherweise 1,5; Raumfahrt: bis 1,1)
- Bei dünnen Hüllen reicht für Sig_Phi die Überschlagsrechnung, bei dickwandigen Hüllen gibt es im innern Spannungserhöhungen → andere Formeln nutzen

Folie 20 Verschluss mit Schraubverbindungen

- Nur ein paar wenige Beispiele für Lösungsmöglichkeiten
- Im Bild keine Isolation eingezeichnet
- Berechnung der Kraft auf den Verschluss
- Scher-Belastung der Schrauben oder Bolzen, N=Anzahl der Schrauben, A_K=Kern-Querschnittsfläche der Schraube
- Lochleibungs-Belastung der Gehäusewand, s=Wandstärke, d= Lochdurchmesser
- Hier: keine Berücksichtigung der Schrauben-Biegung
- Lochabstand von Rändern immer mind. 2d
- Schraubenlöcher immer auf der nicht druck-beaufschlagten Seite
- Bei Starrschrauben besser Spannhülle verwenden
- Durch Material-Wahl und Anzahl der Schrauben kann ein gezieltes Versagen bei Überdruck erreicht werden (z.B. Verschluss löst sich oder Düse löst sich), um ein Platzen der Hülle (zufällige Richtung von Trümmerteilen) zu verhindern.

Folie 21 Anwendung

- Verschluss eines Metall-Gehäuses
- Abbrand-Test eines Schwarzpulver-Motors