Falscher Brennstoff in richtiger Lampe Ludwig Gebauer 10.12.2018

Was passiert, wenn wenn wir eine Lampe mit einem Brennstoff betreiben, für den sie nicht vorgesehen ist? Um die Sache einigermaßen übersichtlich zu halten, nehme ich als Beispiel eine Propanleuchte, die an 50 mbar betrieben wird, z.B. die Truma Propan-Campingleuchte CAL, und betreibe sie mit Butan. Auf Grund des geringen Betriebsdrucks kann hier die Kompressibilität des Gases vernachlässigt werden [1].

Butan hat nahezu den gleichen Heizwert wie Propan (in J/Kg) und auch nahezu den gleichen Sauerstoff- bzw. Luftbedarf (in Kg/Kg) für vollständige Verbrennung, nämlich ca. 15 Kg Luft je Kg Brennstoff, wie eine einfache stöchiometrische Berechnung zeigt [2]. Der lampentechnisch wichtige Unterschied ist die unterschiedliche Dichte der Gase (in Kg/m³). Butan hat die Molare Masse 58 g/mol, Propan 44 g/mol. Daraus ergibt sich nach dem Gesetz von Avogadro, dass die Dichte von Butan um den Faktor 58/44 = 1,32 höher ist als die von Propan.

Das System Düse/Mischrohr ist eine Strahlpumpe. Diese braucht wie jede Pumpe eine Antriebsleistung. Diese stammt aus dem vom Regler kommenden Überdruck des Gases mal dem Volumenstrom:

$$L_1 = \Delta p \cdot \dot{V}_1 \tag{1}$$

Dabei ist

L_1 = Antriebsleistung der Strahlpumpe in W = J/s

Δp = Überdruck des Gases in Pa = N/m²

$\dot{V}_1$ = Volumenstrom des Gases in m³/s

Diese Leistung wird beim Einlauf in die Düse in kinetische Leistung umgesetzt:

$$L_2 = 0{,}5 \cdot \dot{m}_1 \cdot w_1^2 \tag{2}$$

Dabei ist

L_2 = Kinetische Leistung des Gasstroms in der Düse in W

$\dot{m}_1$ = Massenstrom des Gases in Kg/s

w_1 = Geschwindigkeit des Gases in der Düse in m/s

Bei Vernachlässigung von Reibungsverlusten ist

$$L_1 = L_2$$

und somit

$$\Delta p \cdot \dot{V}_1 = 0{,}5 \cdot \dot{m}_1 \cdot w_1^2 \qquad (3)\ [3]$$

Die Gasgeschwindigkeit in der Düse ergibt sich aus dem Volumenstrom und dem Düsenquerschnitt:

$$w_1 = \frac{\dot{V}_1}{A_1} \tag{4}$$

Dabei ist

A_1 = Düsenquerschnitt in m²

Volumenstrom und Massenstrom des Gases sind über dessen Dichte verknüpft:

$$\rho_1 = \frac{\dot{m}_1}{\dot{V}_1} \tag{5}$$

Dabei ist

ρ_1 = Dichte des Gases in kg/m³

Aus den Gleichungen (1) – (5) lassen sich die folgenden Größen (6) – (9) berechnen. Die Dichte ρ_1 ist die Variable, deren Einfluss wir untersuchen wollen.

Der Volumenstrom ist

$$\dot{V}_1 = A_1 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_1}} \tag{6}$$

Der Massenstrom ist

$$\dot{m}_1 = A_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_1} \tag{7}$$

Die Antriebsleistung ist

$$L_1 = \Delta p \cdot \dot{V}_1 = A_1 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p^3}{\rho_1}} \tag{8}$$

Die Gasgeschwindigkeit in der Düse ist

$$w_1 = \frac{\dot{V}_1}{A_1} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_1}} \tag{9}$$

Wir sind jetzt am Düsenausgang angekommen. Bis hierher habe ich stillschweigend mit dem Energieerhaltungssatz gerechnet und Reibungsverluste vernachlässigt. Das geht ab hier nicht mehr, ohne Reibung zwischen Gasstrahl und Umgebungsluft funktioniert die Strahlpumpe nicht. Zum Glück gibt es den Impulserhaltungssatz, der unabhängig von innerer Reibung und Wirbelbildung gilt.

Dem Massenstrom aus der Düse entspricht ein Impulsstrom

$$\dot{I} = \dot{m}_1 \cdot w_1$$

(7) und (9) eingesetzt erhalten wir

$$\dot{I} = 2 \cdot A_1 \cdot \Delta p \qquad (10)\ [4]$$

Der Gasstrom aus der Düse reißt Luft mit, er wird dadurch langsamer und beschleunigt Umgebungsluft, bis beide (Gas und Luft) im Mischrohr die gleiche Geschwindigkeit erreichen. Der Impulsstrom verteilt sich damit auf Gas und Luft, außerdem wird ein Teil des Gesamtimpulses auf Mischrohrwand, Brennerkopf, Glühstrumpf etc. übertragen („äußere“ Reibung). Die Impulsbilanz ergibt sich damit zu

$$\dot{I} = \dot{m}_1 \cdot w_2 + \dot{m}_2 \cdot w_2 + z \cdot \dot{I} \tag{11}$$

Dabei ist

w_2 = Geschwindigkeit des Gas/Luft-Gemischs im Mischrohr in m/s
$\dot{m}_2$ = Luftmassenstrom in Kg/s
z = Widerstandszahl (dimensionslos)

Die Geschwindigkeit des Gemischs im Mischrohr ergibt sich aus der Summe der Volumenströme von Gas und Luft im Mischrohr und dem Mischrohrquerschnitt:

$$w_2 = \frac{\dot{m}_1}{A_2 \cdot \rho_1} + \frac{\dot{m}_2}{A_2 \cdot \rho_2} \tag{12}$$

Dabei ist

A_2 = Mischrohrquerschnitt in m²
ρ_2 = Dichte der Luft in Kg/m³

(10) und (12) in (11):

$$2 \cdot A_1 \cdot \Delta p = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) \cdot \left(\frac{\dot{m}_1}{A_2 \cdot \rho_1} + \frac{\dot{m}_2}{A_2 \cdot \rho_2}\right) + z \cdot 2 \cdot A_1 \cdot \Delta p \tag{13}$$

$\dot{m}_1$ ist in der Nähe des stöchiometrischen Gas/Luft-Verhältnisses klein gegenüber $\dot{m}_2$. Für eine näherungsweise Betrachtung können daher die Terme mit $\dot{m}_1$ vernachlässigt werden.
(13) vereinfacht sich zu

$$(1-z)\cdot 2\cdot A_1\cdot \Delta p=\frac{\dot{m}_2^2}{A_2\cdot \rho_2} \tag{13a}$$

(13a) nach $\dot{m}_2$ aufgelöst:

$$\dot{m}_2=\sqrt{(1-z)\cdot 2\cdot A_1\cdot A_2\cdot \rho_2\cdot \Delta p} \tag{13b}$$

Division von (13b) durch (7) ergibt das Luft/Brennstoff-Verhältnis

$$\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}=\sqrt{\frac{(1-z)\cdot A_2\cdot \rho_2}{A_1\cdot \rho_1}} \tag{14}$$

Was wollen uns diese Gleichungen sagen? Halten wir den Betriebsdruck Δp konstant, so ergibt sich:

* Aus (7): Der Brennstoffmassenstrom (also der Brennstoffverbrauch, in Kg/s) nimmt mit der Wurzel der Gasdichte (also der Molaren Masse des Brennstoffs) zu.

* Aus (13b): Der Luftmassenstrom ist fast nur von Apparatekonstanten (z , A_1 , A_2) und der Dichte der Luft abhängig, also weitgehend unabhängig vom Brennstoff.

* Aus (14): Mit zunehmender Gasdichte (also zunehmender Molarer Masse des Brennstoffs) wird das Verhältnis von Luft- zu Gasmassenstrom kleiner. Eine auf einen „leichten“ Brennstoff eingestellte Lampe wird also beim Übergang auf einen „schwereren“ Brennstoff unter Luftmangel leiden, und umgekehrt.

Damit ist klar, was mit einer für Propan ausgelegten Lampe passiert, wenn sie mit Butan betrieben wird: Nach (14) geht sie zu fett, und nach (7) verbraucht sie auch noch mehr Brennstoff. Wenn man sie mit Butan optimal betreiben will, ist ein kleinerer Düsenquerschnitt A_1 erforderlich.

Ein ähnlicher Fall liegt vor, wenn eine für Petroleum vorgesehene Latüchte mit Petroleum nur trübe funzelt, aber mit Benzin strahlend leuchtet: Wegen der niedrigeren Dichte des Benzindampfs bekommt sie nach (14) plötzlich ausreichend Luft und atmet auf. Die feine englische Art wäre in diesem Fall, den Luftweg auf evtl. vorhandene Strömungshindernisse zu untersuchen (betrifft A_2 und z), und, falls das nicht hilft, die aller Wahrscheinlichkeit nach ausgeleierte Düse zu ersetzen.

---

[1] Wenn man die Kompressibilität berücksichtigen will muss man sich mit so schönen Sachen wie Adiabaten- bzw. Polytropenexponenten herumschlagen. Im folgenden erspare ich mir das, da sich an den Schlussfolgerungen letztlich nichts bzw. allenfalls wenig ändert.

[2] Das gilt für gesättigte Kohlenwasserstoffe („Alkane“, „Paraffine“) von etwa C_3 an aufwärts. Die folgenden Überlegungen gelten daher auch für Benzin und/oder Petroleum. Beim Vergleich mit Brennstoffen mit stark abweichenden Heizwerten (z.B. Ethanol) müsste der Heizwert in die folgenden Überlegungen mit einfließen, was ich mir hier erspare.

[3] Falls sich jemand durch Gleichung (3) an die Bernoulli-Gleichung erinnert fühlt, so ist das

durchaus berechtigt. Es handelt sich um die Leistungsform derselben, wobei auf der linken Seite die kinetische Leistung des Gasstroms vernachlässigt wurde und auf der rechten Seite der Druck in der Düse gleich dem Außendruck gesetzt wurde.

[4] Der naturwissenschaftlich vorgebildete Leser wird möglicherweise bemerken, dass der Impulsstrom von der Größenart einer Kraft ist. In entgegengesetzter Richtung erfährt die Düse die Rückstoßkraft $-2 \cdot A_1 \cdot \Delta p$.