

# Der kleine Gaslieferant

## Physics-4-beginners

Nehmen wir mal an, Sie seien Gaslieferant und ein Kunde will Gas bei Ihnen kaufen. Was man mit ihm ausmachen muss, sind:

- (1) Welche Wärmemenge  $Q$  will er abnehmen, anzugeben in  $kWh$  auf dem Gaszähler. Was dabei bei ihm an Verlusten entsteht, ist seine Sache und muss Sie nicht interessieren.
- (2) In welchen Einzelmengen, also mit welcher Leistung  $L=Q/t$  will er das abnehmen. Es macht einen Unterschied, ob jemand  $100kWh/24h$  benötigt oder  $2.400kWh/h$ , dafür aber die nächsten 23 Stunden nichts mehr, weil man die Liefermengen pro Zeiteinheit entsprechend gestalten muss.
- (3) Gewünschter Vordruck  $P_K$  des Gases bei Abnahme. Denn schließlich muss man als Lieferant ja wissen, ob er den Kunden gleichzeitig mit anderen beliefern kann oder eine besondere Lieferstrecke, in der Regel eine Pipeline, benötigt.

Aus Tabellenwerken entnehmen Sie nun die Verbrennungsenthalpie des Gases, also die Wärmemenge, die pro Gramm bei der Verbrennung frei wird. Damit kann nun schon mal die Masse des Gases berechnet werden, die geliefert werden muss:

$$m=Q/h_g$$

Nun weiß man, dass Gas normalerweise in Kubikmeter abgerechnet wird, also nach Volumen. Den Zusammenhang zwischen Masse, Volumen, Druck und Temperatur liefert das „ideale Gasgesetz“:

$$P*V=m*R*T \quad , \quad R=R_0/M \quad \Rightarrow \quad V=\frac{m*R*T}{P}$$

Dabei ist  $R_0$  eine Konstante, die in Tabellen zu finden ist,  $M$  die Molmasse des Gases, die sich durch die Summe der Atommassen der Bestandteile nach dem chemischen Periodensystem ergibt ( $M(CH_4)=12+4*1=16$ ). Neben der Gesamtmenge ist natürlich auch die maximale zeitbezogene Menge zu berechnen, d.h.

$$\dot{V}=\frac{dV}{dt} = \dot{V}(P)$$

Eine Rolle spielen natürlich auch Temperatur und Druck. Die Temperatur wird i.d.R. die normale Umgebungstemperatur (Raumtemperatur) sein und keine große Rolle spielen, bei Großkunden kann aber auch schon mal der Druck etwas höher angefordert werden als beim Privathaushalt.

Das Gas kann nun durch Rohre als Gas oder in Tanks als Flüssiggas geliefert werden. Schauen wir uns zunächst die Lieferung per Rohr an:

## Gaslieferung durch eine Pipeline

Beim Rohr stellt sich die Frage, wie dies dimensioniert werden muss. Mechanistisch wird es so aussehen, dass das Gas in der Mitte des Rohres am schnellsten fließt, an den Wänden aber nahezu stillsteht (bei laminarer Strömung). Formal können wir uns das so vorstellen, dass das Gas in kleine ineinander verschachtelte Röhren zerlegt wird, die sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegen, an deren Grenzen die Geschwindigkeit  $v$  jedoch kleine Sprünge zeigt, die wiederum einen Kraftverlust durch Reibung zwischen den Röhren bewirken.

Ist  $r$  der Radius von zwei solcher Röhren an der Kontaktstelle,  $l$  die Länge des Kontakts und damit  $A = 2 * \pi * r * l$  die Kontaktfläche, so erfordert die Überwindung des Reibung zwischen den Röhren die Kraft

$$F * A = F * 2 * \pi * r * l = \eta * \frac{dv}{dr}$$

$\eta$  ist der Viskositätskoeffizient, der wiederum Tabellenwerken entnommen werden muss.

Der Druck ist durch  $P = F/a$ , also Kraft pro Fläche definiert. Man kann natürlich auf so ein virtuelles Gasröhren keine Kraft ausüben, da die Moleküle nicht zusammen hängen, sondern muss das dem Gas selbst überlassen. Strömt das Gas durch ein Rohr, so nimmt folglich der Druck auf dem Weg der Strömung ab, wobei  $a$  nun natürlich nicht die Kontaktfläche der virtuellen Röhren untereinander bezeichnet, sondern die Querschnittsfläche des Röhrens selbst. Wenn man das nun genau ausrechnen möchte, führt das auf eine Differentialgleichung 2. Ordnung und lustige Mehrfachintegrale, so dass diesmal nur die Lösung angegeben sei. Für den Zusammenhang zwischen Volumenstrom und Druckabfall erhalten wir:

$$\dot{V} = \frac{\pi * r^4}{8 * \eta} * \frac{\Delta P}{l}$$

Wie man sieht, hat der Durchmesser des Rohres einen hohen Einfluss auf den druckverlust. Man kann ihn zwar aus rein praktischen Gründen nicht so groß machen, wie man will, aber es sollte darauf geachtet werden, dass die so genannte Reynolds-Zahl

$$\text{Re} = \frac{m}{V} * \frac{\dot{V} * l}{\eta} = \frac{P}{R * T} * \frac{\dot{V} * l}{\eta}$$

unterhalb  $\text{Re}_{\text{krit}} \approx 2.040$  bleibt, da ansonsten die laminare Strömung in eine turbulente umschlägt, die wesentlich größere Druckverluste zur Folge hat. Da bei Gasen

$$P(x) = P_{\text{high}} - \frac{\Delta P}{l} * x, \quad 0 \leq x \leq l$$

gilt, also der Druck linear abfällt, ist das möglicherweise aber nur in einem Teil des Rohres der Fall.

Damit dem Kunden nun die Flussmenge  $\dot{V}$  beim vereinbarten Druck  $P$  geliefert werden kann, müssen Sie am anderen Ende des Gasrohres erst einmal kräftig den Gasdruck erhöhen.

Wird Gas komprimiert, ist dazu die Arbeit

$$w = - \int_{V_1}^{V_2} P * dV \quad V_1 < V_2$$

zu leisten. Arbeit ist bekanntlich Kraft\*Weg oder in mathematischer Form

$$w = \int_{\vec{p}_1}^{\vec{p}_2} \vec{F} \cdot d\vec{s}$$

mit  $\vec{p}_i$  als Ortskoordinate von Start- und Endpunkt. Wie man sich leicht überzeugt, sind die Dimensionen gleich, d.h.

$$[F * s] = [P * V]$$

Bleibt die Temperatur während der Kompression konstant, erhält man mit Hilfes des idealen Gasgesetzes die Kompressionsarbeit

$$w = n * R * T * \ln \left( \frac{V_1}{V_2} \right)$$

Die Temperatur bleibt aber nur dann konstant, wenn Wärme an die Umgebung abgeführt wird. Ist das nicht möglich, heizt sich das Gas auf, da es die Kompressionsarbeit aufnehmen muss. Es gilt dann

$$- \int_{V_1}^{V_2} P * dV = \int_{T_1}^{T_2} m * \kappa * dT$$

wobei  $\kappa$  die Wärmekapazität des Gases ist. Um den gleichen Druck im Rohr zu erreichen bedarf es also eines größeren Drucks im Kompressor oder einer guten Kühlung, die Verluste verhindert, aber auch verursacht.

Die Kompressionsarbeit geht auf jeden Fall verloren und muss in die Gesamtbilanz einkalkuliert werden.

*Kleine Nebenbetrachtung: komprimierte Luft kann man auch als Energiespeicher nutzen. Dazu wird die Luft komprimiert, wenn genügend Strom vorhanden ist, und über eine Turbine, die als Generator arbeitet, wieder in Strom zurück verwandelt. Das geht mit relativ wenig Verlusten, aber man braucht viel Luft und hohen Druck. Grüne Physikexperten verkaufen daher gerne Gaskavernen als Druckspeicher, weil die eben ein hohes Volumen haben. Aber! Die Sache mit den wenigen Verlusten funktioniert nur, wenn die Temperatur nach der Kompression konstant bleibt. Tut sie in einer Kaverne bekanntlich nicht, d.h. die Kompressionswärme ist auf jeden Fall verloren und das Ding einen denkbar miesen Wirkungsgrad.*

## Flüssiggaslieferung

Soll Flüssiggas geliefert werden, wird zunächst der Kompressionsprozess von der Pipeline-Lieferung wiederholt.

1. Kompression auf einen hohen Druck. Das führt zu einer Temperaturerhöhung  $\Delta T_1 = T_{komp} - T_{raum}$
2. Abkühlen des komprimierten Gases auf  $T_{raum}$ . Die Wärme ist erst mal verloren. Der Prozess erfordert mehr Energie für das Kühlen als der Pipeline-Prozess, da er aktiv und schnell sein muss.
3. Entspannen auf Normaldruck ohne Energiezufuhr. Dabei sinkt die Temperatur um den Betrag  $\Delta T_2 = T_{raum} - T_{kalt}$ . Aufgrund der geheimnisvollen Physik ist aber  $\Delta T_2 < \Delta T_1$ . Eigentlich gilt eher  $\Delta T_2 \ll \Delta T_1$ . D.h. die Siedetemperatur des Gases  $T_s$  lässt sich i.d.R. nicht in einem Schritt erreichen.
4. Wiederholung von 1., diesmal mit  $T_{kalt}$  als Starttemperatur. Das Gas muss dann auf  $T_{kalt}$  nach der Kompression herunter gekühlt werden, wozu ein Teil des komprimierten Gases aus 3. dient. Die ersten Stufen der Kompression müssen folglich eine höhere Kapazität besitzen als die letzten.

Wird die Siedetemperatur  $T_s$  erreicht, kondensiert das Gas zu flüssigem Gas. Dabei wird die spezifische Verdampfungsenthalpie  $H_v$  frei, die ebenfalls abgeführt werden muss. Der Gesamtaufwand beläuft sich mithin auf

$$H = H_{komp} + H_v * m$$

Dafür liegt das Gas nun nicht mehr gasförmig mit der Dichte  $\rho_g$ , sondern als Flüssigkeit mit der Dichte  $\rho_l$  vor und benötigt nur noch den Raumanteil  $\rho_l / \rho_g$  für den Transport. Man kann jetzt die notwendige Transportkapazität ausrechnen

$$V_t = V * \frac{\rho_l}{\rho_g}$$

die Tanks auf den Schiffen füllen und diese auf die Reise schicken. Die Tanks sind natürlich nicht absolut wärmeisoliert. Sie lassen die Wärmemenge

$$Q = \lambda * F * \frac{T_{raum} - T_l}{d} * (t_{ankunft} - t_{abfahrt})$$

durch.  $\lambda$  ist eine materialspezifische Konstante,  $F$  die Tankoberfläche,  $d$  die Wandstärke. Die Tankoberfläche ist bei einer Kugel im Verhältnis zum Raumvolumen am günstigsten, weshalb die Schiffe auch leicht zu erkennen sind. Die zugeführte Wärme führt zu dem Verlust

$$m = Q / H_v$$

d.h. das Schiff kommt mit weniger Gas an als bei der Abfahrt. Die Verluste werden um so größer, je länger das Gas flüssig bleibt, was auch im Hafen bei Tanklagerung gilt, wobei dort die Tanks aber möglicherweise weniger Wärme durchlassen, da Gewicht keine Rolle spielt.

Nun muss das Flüssiggas wieder in den gasförmigen Zustand überführt werden. Dazu muss die Verdampfungsenthalpie, die vorher abgeführt wurde, nun wieder zugeführt werden, d.h.  $H_v$  taucht gleich zweimal in der Bilanz auf. Zudem muss das Gas auch wieder auf „angenehme“ Temperaturen gebracht werden.

Außerdem muss noch der Treibstoff für die Schiffe hinzu gerechnet werden. Das ist i.d.R. Schweröl, was den Effekt „sauberes Gas“ wieder teilweise reduziert.

Die Gesamtverluste liegen dann bei

$$H_{ges} = 2 * H + Q + H_{transport}$$

und sind größer als beim Pipelinetransport, da die Verdampfungsenthalpie dort nicht berücksichtigt werden muss, Verluste durch Verdampfen entfallen, am Empfangsort temperaturmäßig nichts getan werden muss und die Temperaturdifferenzen kleiner sind.

## **Materialbilanz**

So eine Pipeline benötigt eine Menge Stahl und Beton. Obendrein muss alles noch verlegt werden. Schiffe sind u.U. günstiger bei der Primärbilanz. Beim Schifftransport muss aber auch der ungleich höhere Aufwand an den Terminals eingerechnet werden: Gasverflüssigung und Lagerung sowie Lagerung und Revertgasung. Ob sich das im Zweifelsfall viel tut, bleibt auszurechnen. Hinzu kommen höhere Unterhaltskosten für Schiffe und Terminals sowie höhere Personalkosten.

## **Fazit**

Flüssiggas, wie es derzeit aufgrund grünen Wahnsinns importiert wird, inzwischen hauptsächlich aus den USA, ist zwangsweise um ein Mehrfaches so teuer wie Pipelinegas. Wie immer bei grünen Projekten wird die Umweltbilanz – das Hauptargument grüner Umweltideologie – durch LNG massiv verschlechtert. Für Stromproduktion wäre Kohle um einiges besser und vermutlich, Fracking eingerechnet, auch nicht so viel CO<sub>2</sub> intensiver wie behauptet.

Noch nicht berücksichtigt sind mögliche Konsequenzen für den Endkunden. Erdgas ist hauptsächlich Methan, kann aber auch Beimischungen von Ethan und Butan enthalten. Je nach Mischung sind u.U. andere Brenner notwendig, d.h. der Aufwand kann weiter steigen.

Das Dokument wurde kurzfristig zusammengestellt und kann Fehler enthalten. Wer einen findet, darf ihn behalten.