

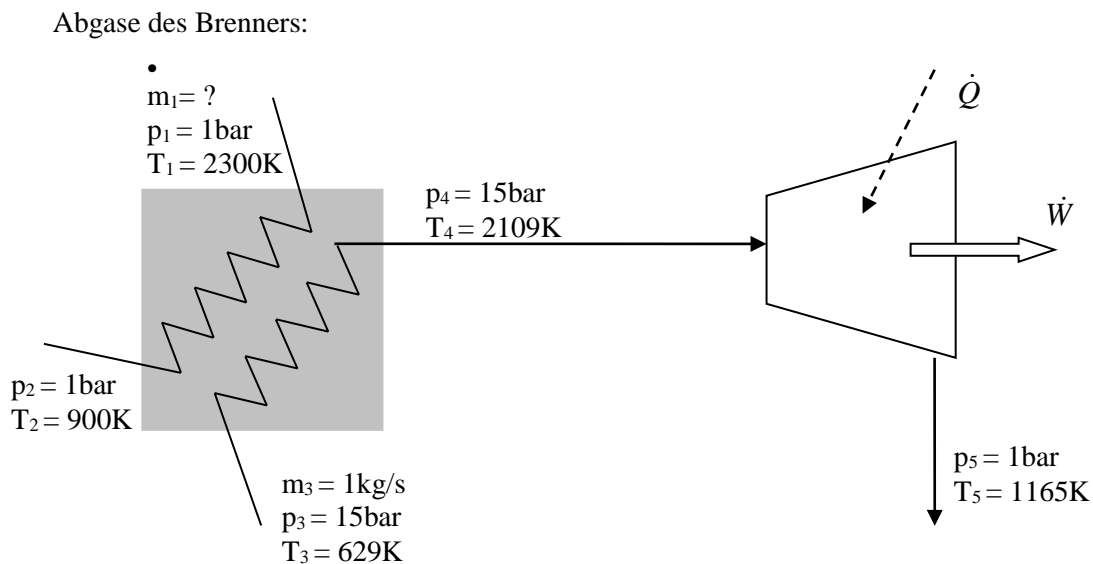
## Übungsserie 3

### Chemisches Gleichgewicht & Exergie

#### Aufgabe 1

In einem Brenner wird der Kraftstoff  $\text{CH}_4$  bei konstantem Druck mit einem Kraftstoff-Luftverhältnis von  $\lambda=1$  vollständig verbrannt. Durch die Verbrennung steigt die Temperatur im Brenner auf 2300 K (Auslass).

Um die Energie der heissen Abgase des Brenners ( $T_1 = 2300 \text{ K}$ ,  $p_1 = 1 \text{ bar}$ ) zu nutzen, wird ein Wärme-Kraft-System (3 bis 5) installiert: Prozessluft wird im Wärmetauscher durch die Abgase erhitzt und expandiert nachher in einer Turbine. Das ganze System operiert in einer Umgebung mit Temperatur  $T_o = 300 \text{ K}$  und Druck  $p_o = 1 \text{ bar}$ .



### Brenner

- Wie viel Abgasmassenstrom produziert der Brenner, wenn pro Sekunde 3 mol Methan verbrannt werden? (unter Vernachlässigung der Dissoziation)
- Wie viele Prozent  $N_2$  sind am Ende der Verbrennung (bei  $p_1 = 1 \text{ bar}$ ,  $p_{\text{ref}} = 1 \text{ bar}$ ,  $T_1 = 2300 \text{ K}$ ) dissoziiert, unter der Annahme chemischen Gleichgewichts? Bestimme die Gleichgewichtskonstante  $K_c$  mit Bezug auf die Molkonzentrationen, basierend auf dem vorher bestimmten  $K_p$  und dem gegebenen Druck und der gegebenen Temperatur.

$$K_p(T) = \prod_k \left( \frac{p_k}{p_{\text{ref}}} \right)^{v_k'' - v_k'}$$
$$K_c(T) = \prod_k (c_k)^{v_k'' - v_k'}$$

### Wärmetauscher

- Wie viel Energie wird zwischen den beiden Gasen ausgetauscht? Wie gross sind die Energieverluste?
- Bestimme die Exergieänderung der beiden Gasströme.
- Bestimme die Exergieverluste anhand
  - einer Exergiebilanz des Wärmetauschers
  - einer Entropiebetrachtung
- und erkläre, woher diese Verluste kommen.

### Turbine

- Berechne die maximale Leistung der Turbine.
- Bestimme die dazugehörigen Exergieverluste.
- Wegen einer Alterung der Isolation verliert die Turbine Wärme zur Umgebung ( $\dot{Q} = -100 \text{ kJ/s}$ ) bei einer mittleren Isolationstemperatur  $T_i = 1500 \text{ K}$ . Berechne die neue Leistung der Turbine unter der Annahme, dass sich die Auslassbedingungen der Turbine nicht ändern.
- Bestimme die Exergieverluste beim Turbinenbetrieb unter den in Punkt c) gegebenen Bedingungen.

Hinweise:

- Alle Gase können als ideale Gase betrachtet werden
- $M_{\text{CH}_4} = 16 \text{ g/mol}$ ,  $M_{\text{N}_2} = 28 \text{ g/mol}$ ,  $M_{\text{O}_2} = 32 \text{ g/mol}$ ,  $M_{\text{CO}_2} = 44 \text{ g/mol}$ ,  $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ g/mol}$
- Die Verbrennungsgase haben eine konstante Wärmekapazität  $c_p = 1220 \text{ J/kg K}$ .
- Die Prozessluft hat eine konstante Wärmekapazität  $c_p = 1006 \text{ J/kg K}$  und ein mittleres Molgewicht  $M_{\text{Luft}} = 32.5 \text{ g/mol}$ .
- Das System operiert stationär und alle Systemdrücke und Temperaturen sind in der Figur angegeben.
- Der Wärmetauscher arbeitet ohne Wärme- und Druckverluste.

## Aufgabe 2 – Einfluss von p, T und Konzentration auf das chemische Gleichgewicht

Der qualitative Einfluss einer Temperatur-, Druck- oder Konzentrationsänderung auf die Gleichgewichtszusammensetzung eines Systems kann eingeschätzt werden anhand des *Prinzips von Le Chatelier*, formuliert durch den französischen Chemiker Henri Le Chatelier zwischen 1884 und 1888:

*„Übt man auf ein System, welches sich im chemischen Gleichgewicht befindet, einen Zwang durch Änderung der äusseren Bedingungen aus, so verschiebt sich das Gleichgewicht infolge dieser Störung derart, dass es dem Zwang ausweicht“*

Oder einfacher gesagt:

*„Übt man auf ein Gleichgewichtssystem einen Zwang aus, so reagiert es, indem sich der Zwang verkleinert.“*

„Zwänge“ sind dabei die bereits erwähnten T-, p- oder Konzentrationsänderungen.

Bestimme anhand dieses Gesetzes den Einfluss folgender „Zwänge“ auf die Gleichgewichtszusammensetzung in einem druck- und temperaturgeregelten Reaktor, in welchem reines  $N_2$  zu  $N$  dissoziiert.

- Eine Steigerung der Reaktortemperatur bei konstantem Druck
- Eine Steigerung des Reaktordruckes bei konstanter Temperatur
- Zufügen einer zusätzlichen Menge  $N_2$  bei konstanter Temperatur und konstantem Druck

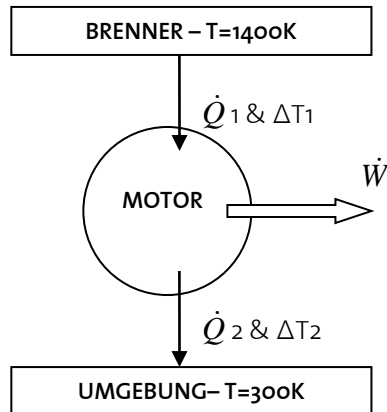
Erkläre die in a) bis c) bestimmten Einflüsse anhand der Gleichung für die Gleichgewichtskonstante  $K_p$

Hinweise:

- Die  $N_2$  Dissoziationsreaktion ist endotherm, die dazugehörige Reaktionsenthalpie kann anhand der Bildungsenthalpien in Tabelle A-30 bestimmt werden.

## Zusatzaufgabe – Exergie - Effizienz eines Wärmestroms

Ein Brenner liefert einen konstanten Wärmestrom  $\dot{Q}_1 = 1000 \text{ MW}$  bei einer konstanten Temperatur  $T_1 = 1400 \text{ K}$ . Der Wärmestrom aus dem Brenner wird in durch einen Carnot-Motor in Arbeit umgewandelt, welcher in einer Umgebung bei  $T_2 = 300 \text{ K}$  arbeitet.



- Berechne die vom Motor gelieferte Arbeit, die Energie- und Exergieverluste
  - falls alle Wärmeaustausche isotherm stattfinden ( $\Delta T = 0 \text{ K}$ ).
  - falls die Wärmeaustausche vom Brenner zum Motor und vom Motor zur Umgebung mit einer Temperaturdifferenz  $\Delta T = 500 \text{ K}$  resp.  $50 \text{ K}$  stattfinden.
- Zeichne für beide Fälle den *Energiefluss* und berechne den dazugehörigen energetischen Wirkungsgrad.
- Zeichne für beide Fälle den *Exergiefluss* und berechne die jeweiligen exergetischen Wirkungsgrade.
- Woher kommt der Unterschied zwischen den beiden Wirkungsgraden? Welche Definition des Wirkungsgrades beschreibt am besten, wie effizient der Wärmestrom angewendet wird?