

- Bemerkungen:**
- Die Prüfungsdauer beträgt 4 Stunden.
 - Beginnen Sie jede Aufgabe mit einem neuen Blatt.
 - Stellen Sie die Lösungswege übersichtlich und korrekt dar.
 - Die einzelnen Aufgaben hängen zusammen.
- Hilfsmittel:**
- Taschenrechner TI89/92 und Formelsammlung.

Punkteverteilung

1	2	3	4	5	6	Σ
2+2+1	2+4+2+4+2	1+3	1+1	1+4+6+2 +1.5	2+3+(1+4)	49.5

1. Wasserstoff als Energieträger der Zukunft ? Energetische Betrachtungen

Durch Elektrolyse soll soviel Wasserstoffgas (H_2) erzeugt werden, dass damit das derzeit importierte Erdöl ersetzt werden kann. Wir gehen von folgenden Zahlen aus:

Wirkungsgrad η_1 einer Solarzelle: 10%	Sonneneinstrahlung auf eine waagrechte Fläche in den Subtropen 2300 kWh/Jahr und pro m^2	Heizwert H_1 von Erdöl 43 MJ/kg	Dichte von Wasserstoff bei 1013 mbar Druck, $0^\circ C$ 0.0899 kg/m^3 .	Jährliche Erdölimporte Schweiz 2003 11.8 Millionen Tonnen
Wirkungsgrad η_2 eines Elektrolytors 85%		Heizwert H_2 von Wasserstoffgas 120 MJ/kg		

- Drücken Sie die jährlichen Erdölimporte in Joule aus. Wie viele kg Wasserstoffgas haben den gleichen Brennwert?
- Wie viele m^2 Solarzellen sind unter Berücksichtigung der angegebenen Wirkungsgrade in tropischen Regionen nötig, um diesen Wasserstoff durch Elektrolyse aus Wasser zu gewinnen? Wie gross ist die Kantenlänge einer quadratischen Solarfarm, wenn 50% der Fläche für Solarzellen, der Rest für Wege etc. verwendet werden?
- Dieser Wert sieht nicht allzu gross aus, wenn man bedenkt, dass die Sahara allein schon eine ungenutzte Fläche von 9 Millionen km^2 darstellt. Diskutieren Sie, welche zwei wesentlichen technisch/physikalischen Schwierigkeiten bei einem solchen Projekt berücksichtigt werden müssen.

2. Wasserstoff als Energieträger der Zukunft ? Herstellung und Transport

- Wie viele H_2 Moleküle entspricht die Gasmenge aus Aufgabe 1a? Nach der Reaktionsgleichung $2H_2O \rightarrow 4H^+ + 2O_2^- \rightarrow 2H_2 + O_2$ müssen für jedes H_2 Molekül zwei Elektronen „verschoben“ werden. Welche Stromstärke ist im Elektrolytator nötig, wenn er rund um die Uhr läuft?
- Wie viele m^3 Gas (V_1) unter Normalbedingungen ($0^\circ C$) entspricht die Gasmenge aus Aufgabe 1a? Falls Sie den exakten Wert nicht finden können, dürfen Sie mit $V_1 = 5 \cdot 10^{10} m^3$ weiterrechnen. Wir behandeln es als ideales Gas, welches bei Normaldruck $p_2 = 1.013$ bar und $35^\circ C$ entsteht. Wie gross ist das Volumen V_2 des Gases bei dieser Temperatur? Es wird nun durch Turbinen adiabatisch auf $p_3 = 31$ bar komprimiert. Auf welchen Wert V_3 schrumpft dabei das Volumen Auf welchen Wert T_3 steigt die Temperatur? In der Pipeline kühlt sich das Gas isochor wieder auf $35^\circ C$ ab. Wie gross ist nun der Druck p_4 ?
- Wie viele m^3 Gas (Volumen V_3) fliessen pro Sekunde durch die Pipeline? Wie schnell muss das Gas in einer Pipeline mit 220 cm Durchmesser fliessen? (Reibung vernachlässigt)
- Wie viel Arbeit muss bei der Kompression des Gases (siehe b) total verrichtet werden? Leiten Sie ausgehend von $W = - \int_{V_2}^{V_3} p dV$ mit Integralrechnung selbst die Formel her. Welchem Bruchteil der als Brennwert enthaltenen Energie wird für die Kompression verwendet?
- Alternativ könnte man das Gas auch auf seinen Kondensationspunkt abkühlen und dann verflüssigen. Wie viel Energie wird dazu bestenfalls benötigt? (Verdampfungswärme = 899 kJ / mol H_2 , Wärmekapazität ca. 14300 J / (kg $^\circ C$))

3. Wasserstoff als Energieträger der Zukunft ? Die Turbine zur Kompression

- Zur Kompression des Wasserstoffgases (siehe oben) werden riesige Turbinen eingesetzt. Wir modellieren den Rotor der Turbine als einen Vollzylinder mit 18 Tonnen Masse und 120 cm Radius. Wie gross ist ihr Trägheitsmoment?

- b. Die Nenndrehzahl der Turbine beträgt 1200 Umdrehungen/Minute. Mit welcher Geschwindigkeit bewegen sich die schnellsten Teile der Turbine? Welche Rotationsenergie ist in der drehenden Turbine gespeichert? Wie lange braucht ein Elektromotor (1.3 MW, 50% Wirkungsgrad) bestenfalls, um die Turbine aus der Ruhe auf Nenndrehzahl zu beschleunigen?
- 4. Wasserstoff als Energieträger der Zukunft ? Eigenschaften des Gases**
- a. Kurz nach dem Kompressor ist das Wasserstoffgas auf 400 °C erwärmt. Wie gross ist die Schallgeschwindigkeit in diesem Gas?
- b. Die Turbine aus Aufgabe 3 erzeugt Vibrationen der Frequenz 480 Hz. In einem Rohrabschnitt der Länge L treten starke Schwingungen auf, die die Techniker als stehende Welle im Gas interpretieren. Wie gross ist L, wenn es sich um die Grundschiwingung der Gassäule (mit Knoten an den Enden) handelt?
- 5. Wasserstoff als Energieträger der Zukunft ? Verwertung des Gases mit Brennstoffzellen**
- In einer Brennstoffzelle kann das Gas wieder mit Sauerstoff zu reinem Wasser reagieren, wobei elektrische Energie und Wärme entsteht. Mehrere Zellen werden zu einem Modul verbunden und können dezentral „Strom“ (elektrische Energie) und Heizwärme für ein Mehrfamilienhaus liefern.
- a. Das Brennstoffzellenmodell kann elektrisch als eine „Batterie“ mit Innenwiderstand R_i aufgefasst werden. Man misst eine Leerlaufspannung von 350 V und einen Kurzschlussstrom von 81 A. Wie gross ist der Innenwiderstand?
- b. An die Zelle wird ein externer Lastwiderstand von $R_L = 12.5\Omega$ angeschlossen. Skizzieren Sie den Stromkreis und berechnen Sie die Stromstärke, alle Spannungsabfälle und die elektrische Leistung $P_{\text{elektrisch}}$ am Lastwiderstand und die Wärmeleistung P_{innen} am Innenwiderstand. Wie gross ist der elektrische Wirkungsgrad $\eta = P_{\text{elektrisch}} / P_{\text{total}}$?
- c. $P_{\text{elektrisch}}$ ist eine Funktion des Lastwiderstands. Stellen Sie die Funktionsgleichung $P_{\text{elektrisch}}(R_L)$ auf und skizzieren Sie quantitativ den Graphen. Verfahren Sie ebenso für die totale Leistung P_{total} und den elektrischen Wirkungsgrad.
- d. Welchen grossen Vorteil gegenüber herkömmlichen Grosskraftwerken hat eine solche dezentrale Stromproduktion? Welche Nachteile könnte es geben?
- e. Wie gross sind die maximale elektrische Leistung, die maximale totale Leistung und der maximale Wirkungsgrad bei jeweils optimal gewähltem R_L ?
- 6. Wasserstoff als Energieträger der Zukunft ? Kernfusion mit Deuterium**
- Etwa 0.015% des durch Elektrolyse gewonnenen Wasserstoffs (vergleiche Aufgabe 1) ist Deuterium. Es soll in einen zukünftigen Fusionsreaktor mit normalem Wasserstoff gemäss der Reaktion $H+D \rightarrow {}^3\text{He}$ verschmolzen werden.
- a. Wie viel Energie wird bei der beschriebenen Reaktion pro D Atom frei? Bestätigen Sie den Wert aus der Formelsammlung, indem sie den Massendefekt ausnützen. Erläutern Sie die Einheit „MeV“ in einigen Worten.
- b. Wie viel Energie steckt im gesamten Deuterium? Der zukünftige Fusionsreaktor habe einen elektrischen Wirkungsgrad von 5%. Wie gross ist die elektrische Leistung eines Reaktors, der 11 Monate pro Jahr läuft und in dieser Zeit das gesamte Deuterium verwertet? Vergleichen Sie mit einem konventionellen Kernkraftwerk.
- c. Neben der Idee, den Fusionsbrennstoff in starken Magnetfeldern einzuschliessen (ITER), gibt es auch den Ansatz, ein gefrorenes Deuteriumkugelchen von allen Seiten mit extrem starken Laserstrahlen zu beschiessen. Ein Laser ($\lambda=633\text{nm}$) schickt einen kurzen Laserblitz ($t=1\text{ns}$) der Energie $4 \cdot 10^8 \text{J}$ auf die Kugel ($m=100\text{mg}$).
- i. Um wie viele °C könnte man die Kugel idealerweise erwärmen, wenn man Schmelz- und Verdampfungswärme vernachlässigt und eine spezifische Wärmekapazität des Deuteriums von $15000\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ annimmt?
- ii. Wie viele Photonen sendet der Laser pro Blitz aus? Welchen Impuls haben diese zusammen? Welche Kraft wirkt auf das Kugelchen, unter der Annahme, dass alle Photonen verschluckt werden. Mit welcher Geschwindigkeit fliegt das Kugelchen nach dem Laserblitz davon?

In Wirklichkeit ist natürlich geplant, dass der Laserstrahl gleichmässig von allen Seiten auf das Target trifft, damit es nicht davonfliegt, sondern sich im Inneren durch den Laser ein enormer Druck aufbaut und dann Fusion möglich wird.

Viel Erfolg wünscht U. Dammer