

University of Applied Sciences Berlin



Laboruntersuchung Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk

Labor für konventionelle und erneuerbare Energien

Datum: 10. Januar 2007

Laborleiter: PROF. DR.-ING. THEO BRACKE
Versuchsleiter: DIPL.-ING. VOLKER MANK

Projektbearbeiter: Mario Fritzsche

Zusammenfassung

Es wurde ein Blockheizkraftwerk untersucht, das mit einer PEM-Brennstoffzelle betrieben wurde. Die Berechnungen beziehen sich auf eine Solltemperatur von 34°C und einer Nutzstromstärke von 21 A.

Die Untersuchungen der Brennstoffzelle ergaben:

- einen Elektrochemischen Wirkungsgrad von $\eta_u(t) = 56,3\%$,
- einen Umsatzwirkungsgrad von $\eta_{UM} = 75,4\%$ und
- einen Systemwirkungsgrad von $\eta_{sys} = 73,2\%$.

Die Untersuchungen des Gesamtsystems ergaben:

- einen Kraftwerkswirkungsgrad von $\eta_{el,KW} = 29,3\%$,
- einen energetischen Wirkungsgrad von $\eta_{energetisch} = 62,69\%$
- und eine Stromkennzahl von $\sigma = 0,8795$

Des Weiteren wurde der Graphische Nachweis des 2. Faradayschen Gesetzes erbracht sowie die Kennlinie des Systems erstellt.

Laboruntersuchung Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk

Fachbereich VIII Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik • Labor für konventionelle und erneuerbare Energien

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Inhaltsverzeichnis	2
Tabellen- und Abbildungs- und Diagrammverzeichnis.....	3
1 Aufgabenstellung	4
2 Einleitung	5
2.1 Allgemein	5
2.2 Die Reaktionsgleichungen	6
2.3 Die PEM-Brennstoffzelle	6
2.4 Der Versuchsaufbau	8
3 Berechnungen.....	9
3.1 Maximaler (idealer) Wirkungsgrad	9
3.1.1 Unter chem. Standardbedingungen.....	9
3.1.2 Betriebsbedingungen ($t > t_0$)	10
3.2 Reversible Spannung	10
3.2.1 Unter chem. Standardbedingungen.....	10
3.2.2 Betriebsbedingungen	11
3.3 Elektrochemischer- bzw. Spannungswirkungsgrad	11
3.3.1 Unter chem. Standardbedingungen.....	11
3.3.2 Unter Betriebsbedingung	11
3.4 Strom-, Umsatz- oder auch Faraday-Wirkungsgrad	12
3.5 Brennstoffzellen-Wirkungsgrad	13
3.6 Systemwirkungsgrad der Brennstoffzellenanlage	14
3.7 Gesamtwirkungsgrad der Brennstoffzellenanlage	14
4 Vergleich mit fossil beheizten Kraftwerk	14
4.1 Elektrischer Wirkungsgrad (Kraftwerkswirkungsgrad).....	14
4.2 Stromkennzahl	15
4.3 Koppel-, BHKW- oder auch energetischer Wirkungsgrad	15
5 Auswertung	16
5.1 Sankey-Diagramm.....	16
5.2 Nachweis des 2. Faradayschen Gesetzes	17
5.3 Spannungs-Strom Kennlinie	18
Literaturverzeichnis	20
Anhang	21

Tabellen- und Abbildungs- und Diagrammverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Brennstoffzelle, Bild: Quaschnig	5
Abbildung 2: Versuchsaufbau des Laborversuchs	8
Abbildung 3: Sankey-Diagramm zum Berechneten Messpunkt	16
Tabelle 1: Brennstoffzellentypen.....	5
Tabelle 2: Standardwerte Tabelle	9
Tabelle 3: Versuchsmesswerte	21
Tabelle 4: Versuchsauswertung	22
Diagramm 1: Wasserstoffmengestrom über theoretischer Stromstärke	17
Diagramm 2: Spannungs-Strom Kennlinie	18
Diagramm 3: Stromstärke über elektrischer Leistung	19

1 Aufgabenstellung

In diesem Laborversuch wird ein Brennstoffzellen betriebenes Blockheizkraftwerk untersucht.

Das Brennstoffzellen BHKW wird für eine Solltemperatur von 34°C und einer Nutzstromstärke von 21 A nachgerechnet und ausgewertet. Dies entspricht dem 1. Messpunkt der Auswertung. Die berechneten Messwerte sollen in einem Energieflussbild dargestellt werden und in mindestens zwei weiteren Diagrammen sinnvoll demonstriert werden.

2 Einleitung

2.1 Allgemein

Eine Brennstoffzelle wandelt die chemisch gebundene Energie des Brennstoffs, hier im Versuch Wasserstoff, direkt in elektrischen Gleichstrom um. Die Brennstoffzelle arbeitet nach dem umgekehrten Prinzip der Elektrolyse. Sie besteht aus zwei Elektroden, die durch einen ionendurchlässigen Elektrolyten getrennt sind. An der Anode wird kontinuierlich Wasserstoff, an der Kathode Sauerstoff als oxidationsmittel zugeführt. Die bei der Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser frei werdenden Elektroden fließen über den äußeren Stromkreis, der die Elektroden mit einander verbindet. Das Funktionsprinzip der Brennstoffzelle wird auch kalte Verbrennung genannt.

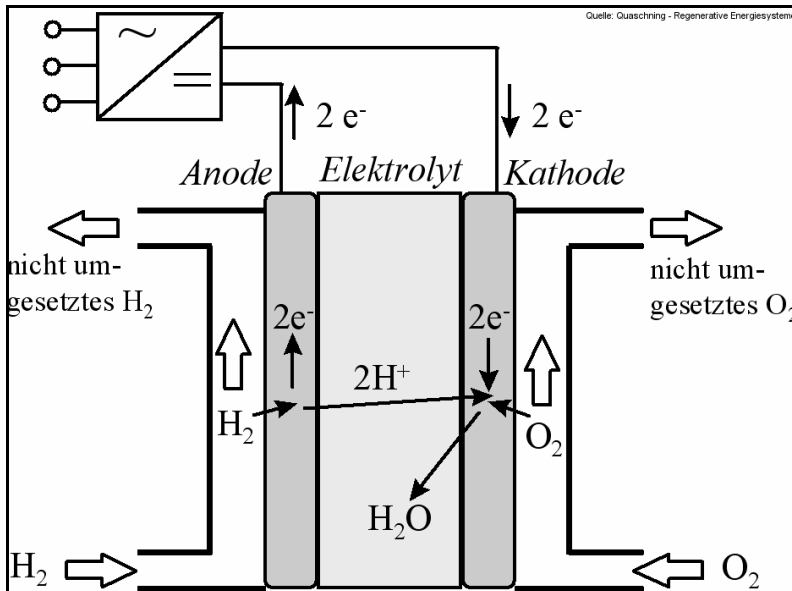


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Brennstoffzelle, Bild: Quaschnig

Entsprechend dem verwendeten Elektrolyten arbeitet die Brennstoffzelle bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen.

Tabelle 1: Brennstoffzellentypen

Typ	Bezeichnung	Elektrolyt	Betriebstemp. in °C
AFC	Alkaline Fuel Cell	Kalilauge	60-100
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell	Polymeremembran	60-100
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell	Phosphorsäure	160-220
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	Schmelzkarbonat	620-660
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	Oxidkeramik	800-1000

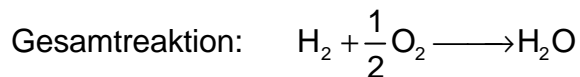
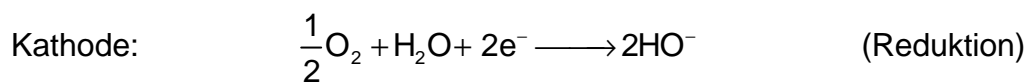
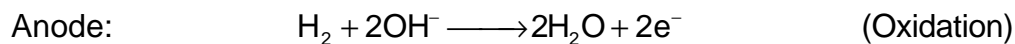
Derzeit am meisten verbreitet ist die PAFC. Sie wird in 250 kW Modulen für den stationären betrieb gebaut. Die Investitionskosten liegen bei etwa 3500 €/kW_{el}. Die PEMFC wird in mobilen und stationären Demonstrationsprojekten eingesetzt. Die Investitionskosten liegen bei etwa 10000 €/kW_{el}. Mehrere Automobilhersteller

Laboruntersuchung Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk

Fachbereich VIII Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik • Labor für konventionelle und erneuerbare Energien

forschen an der PEM-Zelle für den zukünftigen Einsatz im Auto. Zusammen mit einem Elektromotor kann die Brennstoffzelle ein zukunftsweisendes, vor Ort emissionsfreies Fahren ermöglichen. Als Brennstoff ist neben dem Wasserstoff auch Erdgas oder Methanol im Zusammenhang mit einem Reformierungsprozess möglich. Die MFC und SOFC befinden sich noch im Versuchsstadium. Insbesondere bei der SOFC erhofft man sich durch das nachschalten eines herkömmlichen Dampferzeugers mit Turbine einen bisher unerreicht hohen elektrischen Wirkungsgrad zu verwirklichen.¹

2.2 Die Reaktionsgleichungen



Durch Oxidation von Wasserstoff an der Anode entstehen Protonen und Elektronen. Dadurch kommt es zu einem Gleichgewicht zwischen adsorbierten Wasserstoff-Molekülen und hydratisierten Wasserstoff-Ionen. Aufgrund der Eigenschaft des Elektrolyten wandern die Wasserstoff-Ionen durch diesen zur Kathode während die oxidierten Elektronen durch einen äußeren Stromkreis geleitet werden. Die Reduktion der bewegten Teilchen von der Anoden-Seite mit Sauerstoff führt schlussendlich zum Endprodukt Wasser.

2.3 Die PEM-Brennstoffzelle

Der Elektrolyt der PEM-Zelle ist rechts und links eingeschalt mit Kohlenstoffmatten. In diesen Kohlenstoffmatten befindet sich der Katalysator. Auf der Anodenseite der Zelle befindet sich hydrophile Sulfonsäure. In dieser Region werden große mengen an Wasser absorbiert und somit können sich die Wasserstoff Protonen dort frei bewegen. Das macht den Protonentransport erst möglich. Die hydrophobe Kathodenseite ist Wasserstoff abstoßend. Der Elektrolyt der Brennstoffzelle ist eine Folie aus Nafian mit Stärken von 50µm bis 150µm.²

¹ Quelle: Dubbel

² Quelle: Prof. Dr.-Ing. Bracke

Laboruntersuchung Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk

Fachbereich VIII Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik • Labor für konventionelle und erneuerbare Energien

Vorteile einer PEM sind:

- fester Elektrolyt (keine aggressiven Flüssigkeiten die auslaufen könnten)
- weist eine hohe Stromdichte auf
- hat ein gutes dynamisches Verhalten
- Auf der Kathodenseite kann Luft verwendet werden (kein Reingas erforderlich)
- Das Elektrolyt ist CO₂-beständig

Nachteile sind:

- Sehr empfindlich gegen Verschmutzungen durch CO, NH₃ und Schwefelverbindungen im Brenngas
- Aufwändiges Wassermanagement
- Anlagenwirkungsgrad eher niedrig

Des Weiteren ist Kohlenstoffoxid ein starkes Katalysatorgift weil es an Platin, sehr häufig als Katalysator genutzt, adsorbiert und somit Arbeitsfläche abdeckt.

Laboruntersuchung Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk

Fachbereich VIII Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik • Labor für konventionelle und erneuerbare Energien

2.4 Der Versuchsaufbau

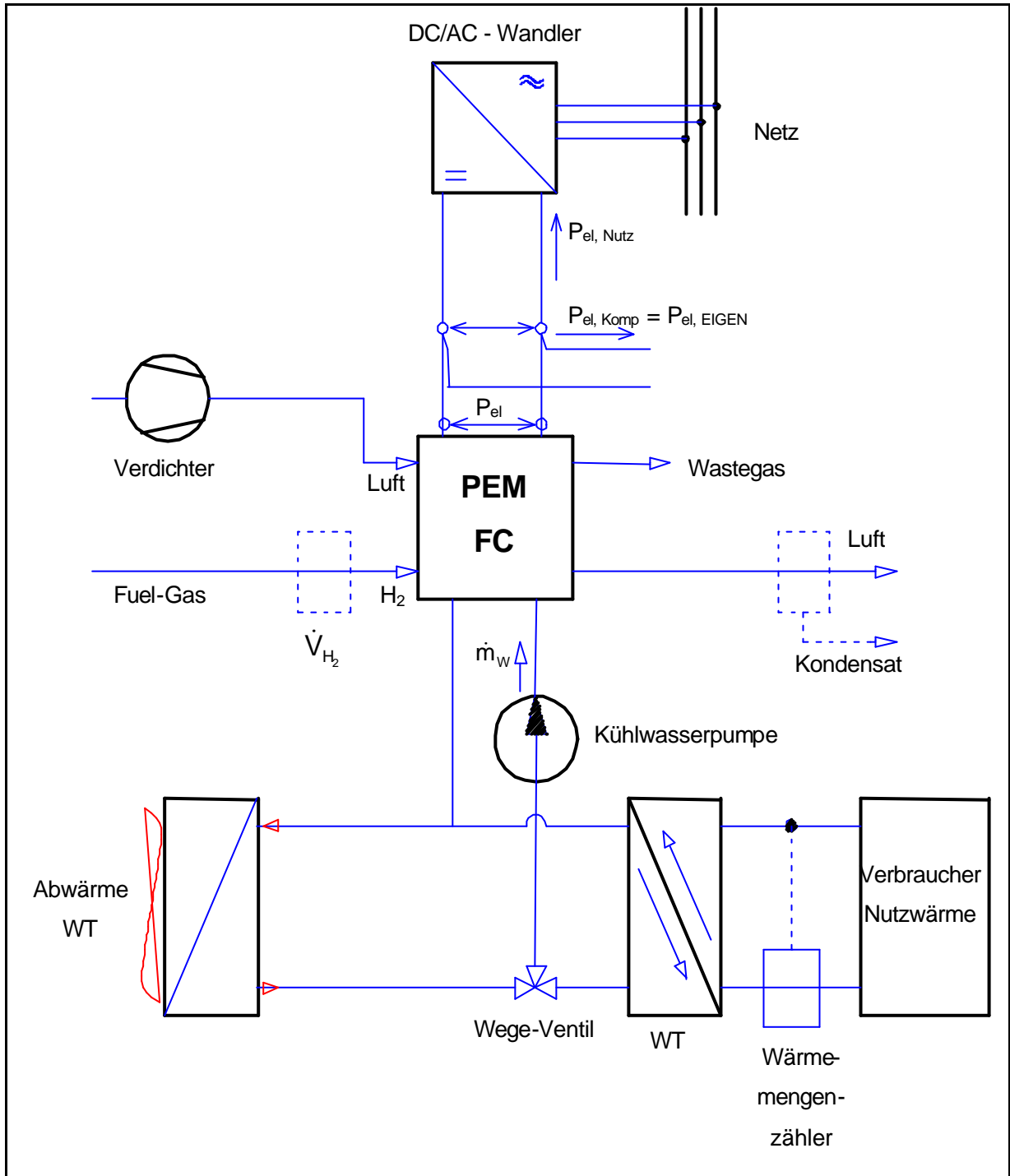


Abbildung 2: Versuchsaufbau des Laborversuchs

Laboruntersuchung Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk

Fachbereich VIII Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik • Labor für konventionelle und erneuerbare Energien

3 Berechnungen

T in K	298,15	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
ΔG_u in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$	-228,58	-228,50	-223,90	-219,05	-214,01	-208,81	-203,50	-198,08	-192,59	187,03	-181,43
ΔH_u in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$	-241,83	-241,84	-242,85	-243,83	-244,76	-245,63	-246,44	-247,19	-247,86	-248,46	-249,00
ΔG_o^0 in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$	-237,15	$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ "u" : gasförmiges Produktwasser "o" : flüssiges Produktwasser									
ΔH_o^0 in $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$	-285,83										

Tabelle 2: Standardwerte Tabelle

3.1 Maximaler (idealer) Wirkungsgrad

3.1.1 Unter chem. Standardbedingungen

Chemische Standardbedingung: Index ⁰; p = 1 atm; t = 25°C

$$\eta_{\max_o}^0 = \frac{\Delta G_o^0}{\Delta H_o^0} \quad \text{für flüssiges Produktwasser}$$

$$\Delta G_o^0 = -237,15 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad \text{Freie- Gibbs'sche- Energie}$$

$$\Delta H_o^0 = -285,83 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad \text{Reaktionsenthalpie}$$

$$\eta_{\max_o}^0 = \frac{-237,15 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}{-285,83 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}} = 0,8297 \hat{=} \underline{\underline{83\%}}$$

$$\eta_{\max_u}^0 = \frac{\Delta G_u^0}{\Delta H_u^0} \quad \text{für Gasförmiges Produktwasser}$$

$$\Delta G_u^0 = -228,58 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad \text{Freie- Gibbs'sche- Energie}$$

Laboruntersuchung Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk

Fachbereich VIII Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik • Labor für konventionelle und erneuerbare Energien

$$\Delta H_u^0 = -241,83 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad \text{Reaktionsenthalpie}$$

$$\eta_{\max_u}^0 = \frac{-228,58 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}{-241,83 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}} = 0,945 \hat{=} \underline{\underline{94,5\%}}$$

3.1.2 Betriebsbedingungen ($t > t_0$)

$$\eta_{\max}(t) = \frac{\Delta G_u(t)}{\Delta H_u(t)} \quad \text{für Gasförmiges Produktwasser}$$

$$t = 35,175^\circ\text{C} \hat{=} (273,15 + 35,175)\text{K} = \underline{\underline{308,325\text{K}}}$$

$$\Delta G_u(t) = -228,12 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad \text{nach Interpolation}$$

$$\Delta H_u(t) = -241,93 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\eta_{\max}(t = 308,325\text{K}) = \frac{-228,12 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}{-241,93 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}} = 0,943 \hat{=} \underline{\underline{94,3\%}}$$

3.2 Reversible Spannung

3.2.1 Unter chem. Standardbedingungen

$$U_{\text{rev}_o}^0 = -\frac{\Delta G_o^0}{z \cdot F} \quad \text{für flüssiges Produktwasser}$$

$$z = 2 \quad \text{Valenzelektronen des Reaktionsmoleküls (hier H}_2\text{)}$$

$$F = 96487 \frac{\text{As}}{\text{mol}} \quad \text{Faraday- Konstante}$$

$$U_{\text{rev}_o}^0 = -\frac{-237,15 \text{kJ} \cdot \text{mol}}{2 \cdot 96487 \text{As} \cdot \text{mol}} \cdot \frac{1000 \text{J}}{1 \text{kJ}} \cdot \frac{1 \text{W} \cdot \text{s}}{1 \text{J}} \cdot \frac{1 \text{A} \cdot \text{V}}{1 \text{W}} = \underline{\underline{1,229 \text{V}}}$$

$$U_{\text{rev}_u}^0 = -\frac{\Delta G_u^0}{z \cdot F} \quad \text{für gasförmiges Produktwasser}$$

$$U_{\text{rev}_u}^0 = -\frac{-228,58 \text{kJ} \cdot \text{mol}}{2 \cdot 96487 \text{As} \cdot \text{mol}} \cdot \frac{1000 \text{J}}{1 \text{kJ}} \cdot \frac{1 \text{W} \cdot \text{s}}{1 \text{J}} \cdot \frac{1 \text{A} \cdot \text{V}}{1 \text{W}} = \underline{\underline{1,185 \text{V}}}$$

Laboruntersuchung Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk

Fachbereich VIII Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik • Labor für konventionelle und erneuerbare Energien

3.2.2 Betriebsbedingungen

$$U_{\text{rev}}(t = 308,325\text{K}) = -\frac{\Delta G_u(t)}{z \cdot F}$$

$$U_{\text{rev}}(t = 308,325\text{K}) = -\frac{-228,12\text{kJ} \cdot \text{mol}}{2 \cdot 96487\text{As} \cdot \text{mol}} \cdot \frac{1000\text{J}}{1\text{kJ}} \cdot \frac{1\text{W} \cdot \text{s}}{1\text{J}} \cdot \frac{1\text{A} \cdot \text{V}}{1\text{W}} = \underline{\underline{1,182\text{V}}}$$

3.3 Elektrochemischer- bzw. Spannungswirkungsgrad

3.3.1 Unter chem. Standardbedingungen

$$\eta_u = \frac{U_{K_{\text{Zelle}}}}{U_{\text{rev}_0}^0} = \frac{U_K}{U_{\text{rev}_0}^0 \cdot a}$$

$$U_{K_{\text{Zelle}}} = \frac{U_K}{a} \quad \text{Klemmspannung der einzelnen Zelle}$$

$U_K = 13,3\text{V}$ gemessene Klemmspannung (am Stack)

$a = 20$ Anzahl der Zellen im Stack

$$U_{K_{\text{Zelle}}} = \frac{13,3\text{V}}{20} = \underline{\underline{0,665\text{V}}}$$

$$\eta_u = \frac{0,665\text{V}}{1,229\text{V}} = 0,541 \hat{=} \underline{\underline{54,1\%}}$$

3.3.2 Unter Betriebsbedingung

$$\eta_u(t) = \frac{U_K}{U_{\text{rev}}(t) \cdot a}$$

$$\eta_u(t) = \frac{13,3\text{V}}{1,182\text{V} \cdot 20} = 0,563 \hat{=} \underline{\underline{56,3\%}}$$

Laboruntersuchung Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk

Fachbereich VIII Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik • Labor für konventionelle und erneuerbare Energien

3.4 Strom-, Umsatz- oder auch Faraday-Wirkungsgrad

$$\eta_I = \eta_{UM} = \frac{I}{I_{th}} = \frac{\eta_{Bz} \cdot U_{rev}}{U_k} = \frac{\dot{n}_{UM}}{\dot{n}}$$

Das Ergebnis gibt an, wie viel des zugeführten (theoretischen) Substanzmengenstromes \dot{n} , tatsächlich in der BZ umgesetzt wird (\dot{n}_{UM})!

$(1 - \eta_I)$ Verluste durch Rekombination, Permeation und Nebenreaktionen

$$P_{el} = U_K \cdot I = P_{el,Nutz} + P_{el,Komp}$$

$P_{el,Nutz}$ abgegebene „Kraftwerksleistung“

P_{el} elektrische Leistung an den Klemmen der BZ

$P_{el,Komp}$ Eigenbedarf

$$P_{el} = 197W + 72W = 269W$$

Daraus folgt:

$$I = \frac{P_{el}}{U_k} \quad \text{tatsächlicher Strom der Anlage}$$

$$I = \frac{269W}{13,3V} \cdot \frac{1VA}{1W} = \underline{\underline{20,226A}}$$

$$I_{th} \cdot t = n \cdot z \cdot F \quad \text{2. Faraday-Gesetz} \quad \left| \begin{array}{l} 1 \\ \cdot \\ t \end{array} \right.$$

$$I_{th} = \frac{n}{t} \cdot z \cdot F = \dot{n} \cdot z \cdot F$$

n Substanzmenge

\dot{n} Substanzmengenstrom (zugeführt)

$z = 2$ für Wasserstoff

$F = 96487 \frac{C}{mol}$ Faraday-Konstante

t Messzeit

$$p_{H_2} \cdot V_{H_2} = m_{H_2} \cdot R_{H_2} \cdot T_{H_2} \quad \left| \begin{array}{l} 1 \\ \cdot \\ t \end{array} \right.$$

$$p_{H_2} \cdot \dot{V}_{H_2} = \dot{m}_{H_2} \cdot R_{H_2} \cdot T_{H_2} \quad \left| \dot{m} = \dot{n} \cdot M \right.$$

$$p_{H_2} \cdot \dot{V}_{H_2} = \dot{n}_{H_2} \cdot M_{H_2} \cdot R_{H_2} \cdot T_{H_2} \quad \left| R = M_{H_2} \cdot R_{H_2} \right.$$

Laboruntersuchung Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk

Fachbereich VIII Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik • Labor für konventionelle und erneuerbare Energien

$$\dot{n}_{\text{H}_2, \text{Zelle}} = \frac{p_{\text{H}_2} \cdot \dot{V}_{\text{H}_2, \text{Zelle}}}{R \cdot T_{\text{H}_2}}$$

$$\dot{n}_{\text{H}_2, \text{ges}} = \frac{p_{\text{H}_2} \cdot \dot{V}_{\text{H}_2}}{R \cdot T_{\text{H}_2}}$$

$$\dot{V}_{\text{H}_2, \text{Zelle}} = \frac{\dot{V}_{\text{H}_2}}{a} \quad \text{bei strömungstechnischer Parallelschaltung}$$

$$\dot{V}_{\text{H}_2} = 2,85 \text{ l min}^{-1} \quad \text{Gesamtwasserstoffvolumenstrom Zelle}$$

$$\dot{V}_{\text{H}_2, \text{Zelle}} = \frac{2,85 \text{ l min}^{-1}}{20} = \underline{\underline{0,1425 \frac{\text{l}}{\text{min}}}}$$

$$p_{\text{H}_2} = 1,5 \text{ bar} \quad \text{absoluter Wasserstoffdruck aus Messtabelle}$$

$$M_{\text{H}_2} \quad \text{Molmasse Wasserstoff} \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right] \hat{=} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]$$

$$R = 8,314 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}} \quad \text{allgemeine Gaskonstante}$$

$$T = (273,15 + 35,175) \text{ K} = 308,325 \text{ K} \quad \text{Temperatur in K}$$

$$\dot{n}_{\text{H}_2, \text{Zelle}} = \frac{1,5 \text{ bar} \cdot 0,1425 \text{ l} \cdot \text{mol} \cdot \text{K}}{8,314 \text{ J} \cdot 308,325 \text{ K} \cdot \text{min}} \cdot \frac{0,001 \text{ m}^3}{1 \text{ l}} \cdot \frac{10^5 \text{ N}}{\text{bar} \cdot \text{m}^2} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot \frac{1 \text{ J}}{\text{Nm}} = \underline{\underline{1,39 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{s}}}}$$

$$\dot{n}_{\text{H}_2, \text{ges}} = \frac{1,5 \text{ bar} \cdot 2,85 \text{ l} \cdot \text{mol} \cdot \text{K}}{8,314 \text{ J} \cdot 308,325 \text{ K} \cdot \text{min}} \cdot \frac{0,001 \text{ m}^3}{1 \text{ l}} \cdot \frac{10^5 \text{ N}}{\text{bar} \cdot \text{m}^2} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot \frac{1 \text{ J}}{\text{Nm}} = \underline{\underline{2,7795 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{s}}}}$$

$$I_{\text{th}} = 1,39 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{s}} \cdot 2 \cdot 96487 \frac{\text{As}}{\text{mol}} = \underline{\underline{26,823 \text{ A}}}$$

$$\eta_{\text{l}} = \eta_{\text{UM}} = \frac{20,226 \text{ A}}{26,823 \text{ A}} = 0,754 \hat{=} \underline{\underline{75,4\%}}$$

3.5 Brennstoffzellen-Wirkungsgrad

$$\eta_{\text{Bz}} = \eta_{\text{U}} \cdot \eta_{\text{l}} = \frac{P_{\text{el}}}{P_{\text{rev}}}$$

$$P_{\text{rev}} = \dot{n}_{\text{H}_2, \text{ges}} \cdot \Delta G_{\text{o}}^0 = 2,7795 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{s}} \cdot \left(-237,15 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) \cdot \frac{1000 \text{ Ws}}{1 \text{ kJ}} = \underline{\underline{-659,158 \text{ W}}}$$

$$P_{\text{el}} = 269 \text{ W}$$

$$\eta_{\text{Bz}} = \frac{269 \text{ W}}{|-659,158 \text{ W}|} = 0,449 \hat{=} \underline{\underline{44,9\%}}$$

Laboruntersuchung Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk

Fachbereich VIII Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik • Labor für konventionelle und erneuerbare Energien

3.6 Systemwirkungsgrad der Brennstoffzellenanlage

Bei der Betrachtung eines Brennstoffzellensystems muss noch der Systemwirkungsgrad η_{sys} berücksichtigt werden, der den Energiebedarf der Peripherie berücksichtigt.

$$\eta_{\text{sys}} = \frac{P_{\text{el,Nutz}}}{P_{\text{el}}} =$$
$$\eta_{\text{sys}} = \frac{197\text{W}}{269\text{W}} = 0,732 \hat{=} \underline{\underline{73,2\%}}$$

3.7 Gesamtwirkungsgrad der Brennstoffzellenanlage

$$\eta_{\text{ges}} = \eta_{\text{Bz}} \cdot \eta_{\text{sys}} =$$
$$\eta_{\text{ges}} = 0,449 \cdot 0,732 = 0,329 \hat{=} \underline{\underline{32,9\%}}$$

4 Vergleich mit fossil beheizten Kraftwerk

4.1 Elektrischer Wirkungsgrad (Kraftwerkswirkungsgrad)

$$\eta_{\text{el,KW}} = \frac{|P_{\text{el,Nutz}}|}{\dot{Q}_{\text{H}_2}} = \eta_{\text{max}} \cdot \eta_{\text{Bz}} \cdot \eta_{\text{sys}}$$
$$\dot{Q}_{\text{H}_2} = \dot{m}_{\text{H}_2} \cdot h_u = \dot{n}_{\text{H}_2\text{gesamt}} \cdot H_u$$
$$\dot{n}_{\text{H}_2\text{gesamt}} = 2,7795 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$
$$\Delta H_u(t) = -241,93 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$
$$\dot{Q}_{\text{H}_2} = 2,7795 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{s}} \cdot \left(-241,93 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) \frac{1000\text{Ws}}{1\text{kJ}} = \underline{\underline{-671,57\text{W}}}$$
$$\eta_{\text{el,KW}} = \frac{-197\text{W}}{-671,57\text{W}} = 0,293 \hat{=} \underline{\underline{29,3\%}}$$

Laboruntersuchung Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk

Fachbereich VIII Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik • Labor für konventionelle und erneuerbare Energien

4.2 Stromkennzahl

$$\sigma = \frac{|P_{\text{el,Nutz}}|}{|\dot{Q}_{\text{Nutz}}|}$$

$$\dot{Q}_{\text{Nutz}} = m_w \cdot c_{\text{pw}}(t) \cdot \Delta t = -224 \text{ W}$$

m_w Massenstrom Nutzwasser (Verbraucher)

$$\Delta t = t_{\text{aus}} - t_{\text{ein}}$$

$$P_{\text{el,Nutz}} = -197 \text{ W}$$

$$\sigma = \frac{|-197 \text{ W}|}{|-224 \text{ W}|} = \underline{\underline{0,8795}}$$

4.3 Koppel-, BHKW- oder auch energetischer Wirkungsgrad

$$\eta_{\text{energetisch}} = \eta_{\text{Koppel}} = \eta_{\text{BHKW}} = \frac{|P_{\text{el,Nutz}} + \dot{Q}_{\text{Nutz}}|}{|\dot{Q}_{\text{H}_2}|}$$

$$\eta_{\text{energetisch}} = \frac{|-197 \text{ W} - 224 \text{ W}|}{|-671,57 \text{ W}|} = 0,6269 \hat{=} \underline{\underline{62,69\%}}$$

5 Auswertung

5.1 Sankey-Diagramm

Dieses Diagramm zeigt alle Leistungen auf, die durch die Reaktion des Wasserstoffs entstanden sind.

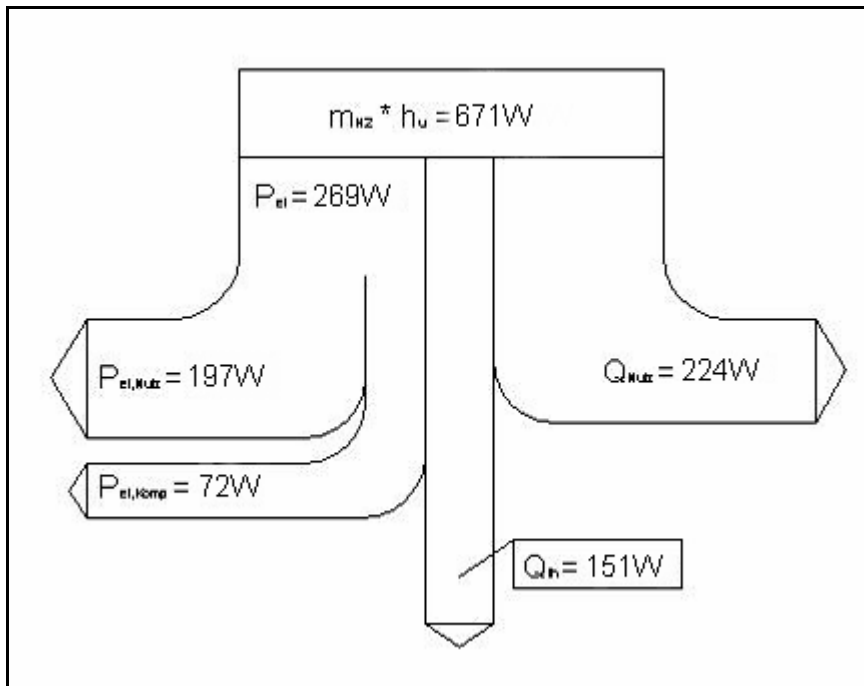


Abbildung 3: Sankey-Diagramm zum Berechneten Messpunkt

Da es sich um ein Blockheizkraftwerk handelt werden sowohl die elektrische als auch thermische Leistung genutzt zur Energieerzeugung.

Die im Wasserstoff vorhandene Leistung von 671 W kann zu etwa 44% in elektrische Leistung gewandelt werden und zu etwa 33% in thermische Nutzleistung. Der Rest von fast 23% ist größtenteils Abwärme des Stacks. Von der gewandelten elektrischen Leistung zieht sich das System aber gleich seinen Anteil an Eigenbedarf ab. Dieser Teil liegt bei etwa 10% der Gesamtleistung des Wasserstoffs.

5.2 Nachweis des 2. Faradayschen Gesetzes

Wie schon im Kapitel 3.4 bemerkt lautet das 2. Faradaysche Gesetz:

$$I_{th} = \dot{n} \cdot z \cdot F \quad \text{2. Faradaysche Gesetz}$$

Da die Faradaykonstante F und die Valenzelektronen des Wasserstoffes konstant sind kann man diese auch den Faktor 1 zuweisen und schreiben:

$$I_{th} \sim \dot{n} \quad \text{Strom proportional Wasserstoffmengenstrom}$$

Demnach muss bei graphischer Darstellung ein linearer Graph entstehen. Mit einem Tabellenkalkulationsprogramm nachgeprüft bekommt man das folgende Diagramm:

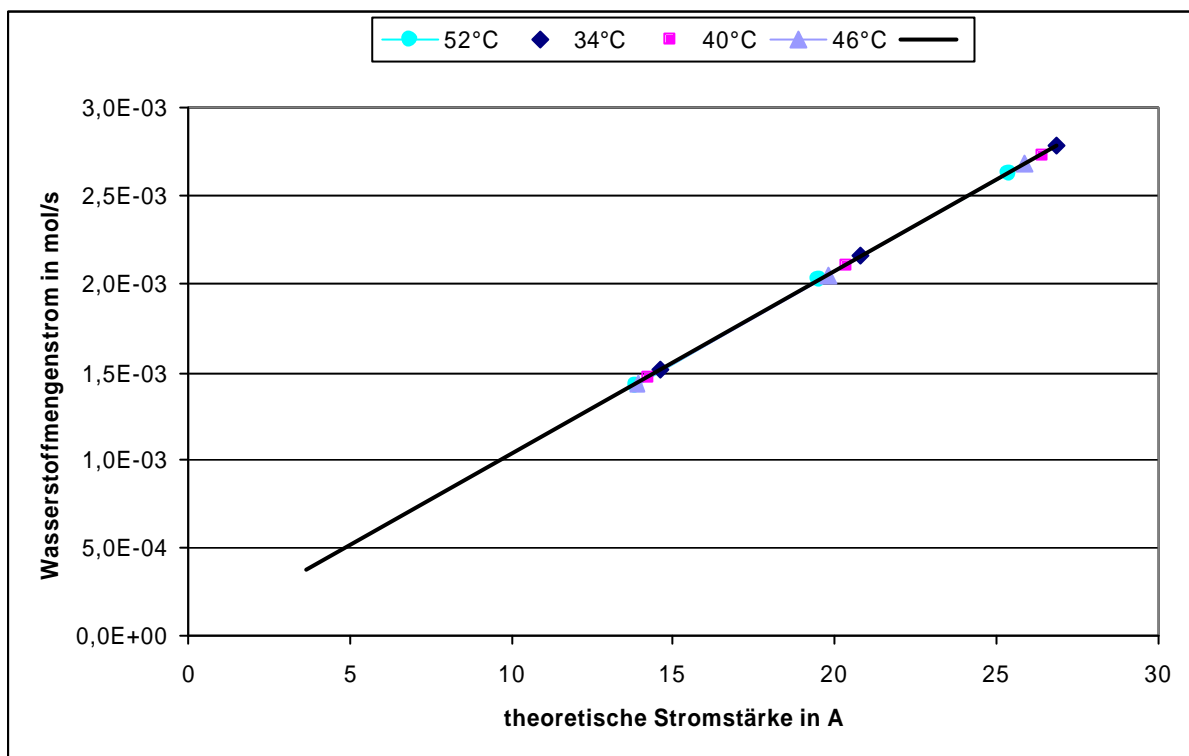


Diagramm 1: Wasserstoffmengenstrom über theoretischer Stromstärke

Wie man sieht ist der Graph wirklich linear und das Gesetz, nach dem eine bestimmte durch Elektronen freigesetzte Masse proportional dem geflossenen Strom ist, nachgewiesen.

5.3 Spannungs-Strom Kennlinie

Das Diagramm zeigt die Messwerte der Klemmspannung am Stack gezeichnet über die wirklich geflossene Strommenge. Die reversible Spannung ist ebenfalls eingetragen um einerseits ihr konstantes Verhalten und andererseits die Potenzialdifferenz einmal graphisch darzustellen.

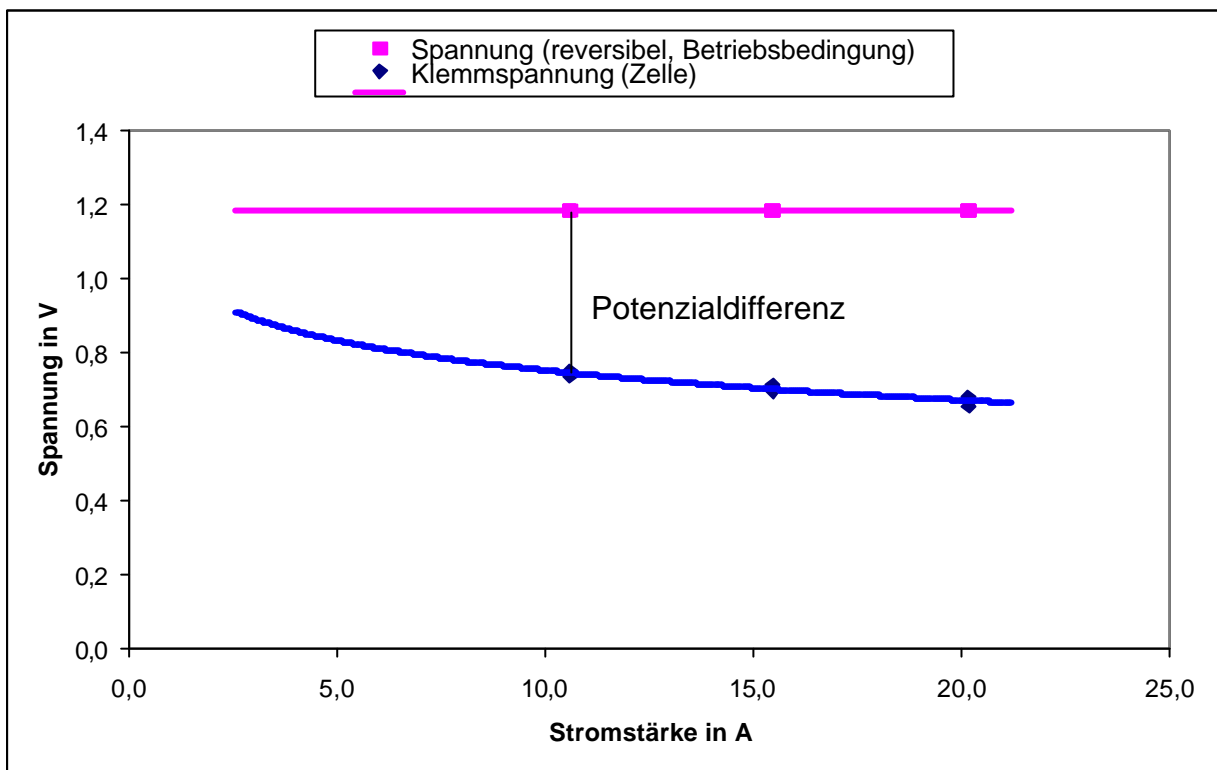


Diagramm 2: Spannungs-Strom Kennlinie

Bei Betrachtung der Spannungs-Strom Kennlinie stellt man schnell fest, dass die Spannung sinkt wenn die Stromstärke steigt. Das erklärt sich wie folgt: An der Anode werden Wassermoleküle adsorbiert und im Verhältnis 1:1 in Protonen und Elektronen gespalten. Während die Protonen ihren Weg durch die Membran hin zur Kathode schneller gehen brauchen die Elektronen durch den äußeren Spannungskreis etwas länger. Dieser Effekt resultiert aus den höheren Widerständen der Leitung und des Verbrauchers. Dadurch entsteht an der Kathode eine leicht positive Ladung (positives Potential) wogegen an der Anode eine leicht negative Ladung (negatives Potential) besteht. Durch diese Potenzialdifferenz sinkt also die Klemmspannung der Zelle.

In Verbindung mit dem Diagramm 3 lässt sich sagen, dass bei steigender Leistung, was einen höheren Widerstand bedeutet, die Klemmspannung sinkt. Die negative Steigung der Klemmspannung nimmt aber mit steigendem Strom ab, denn die Elektronen werden zwar stärker gebremst, jedoch wandern auch Verhältnismäßig weniger Protonen durch die Membran.

Laboruntersuchung Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk

Fachbereich VIII Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik • Labor für konventionelle und erneuerbare Energien

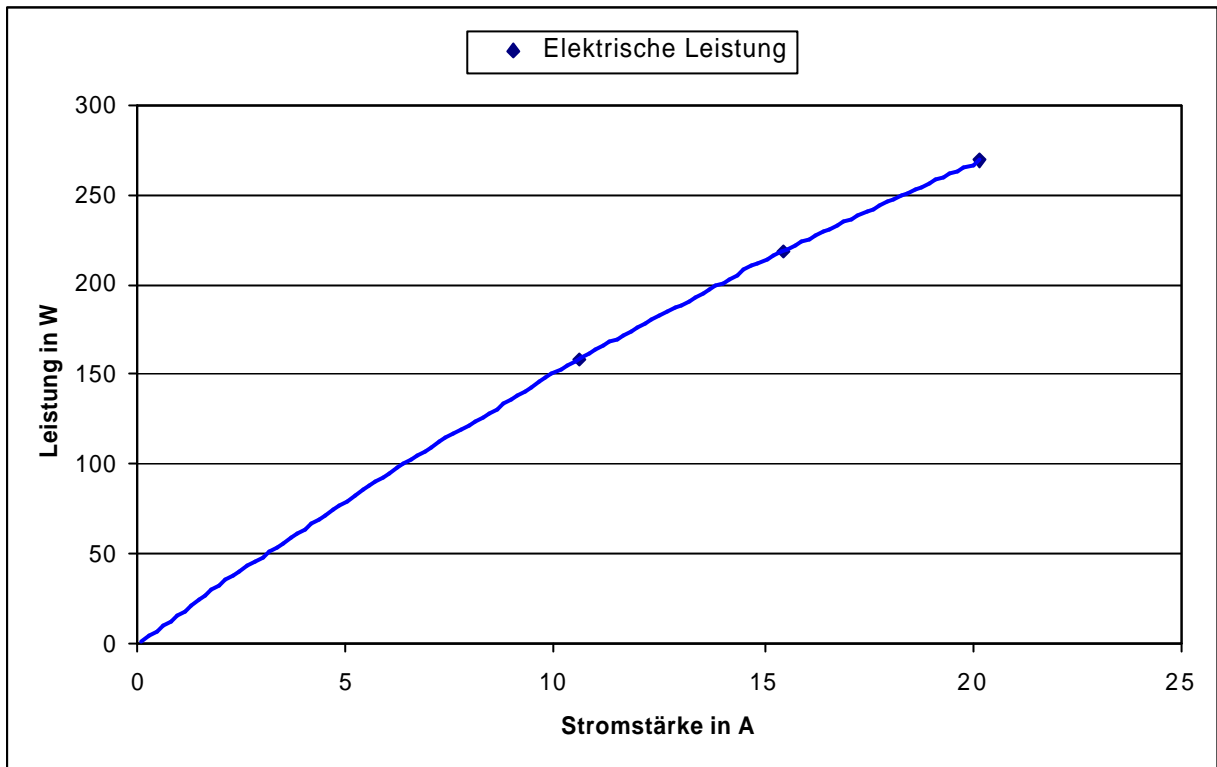


Diagramm 3: Stromstärke über elektrischer Leistung

Möchte man einen Verbraucher, mit einer bestimmten Leistung, durch eine Brennstoffzelle betreiben so muss man diese Leistung erst einmal aufbringen. Das heißt, eine bestimmte Anzahl von Elektronen muss durch den äußeren Spannungskreis geleitet werden. Eine höhere Leistung bedeutet dass mehr Ladungsteilchen pro Zeiteinheit durch den Verbraucher strömen müssen. Man bezeichnet diese Ladungsteilchen pro Zeiteinheit als Strom.

Aus dem Diagramm 3 ist zu entnehmen, dass bei hohem Widerstand an der Anode nicht so viele Elektronen entstehen, so dass die Leistung, die Aufgebracht werden muss, um sie durch den Verbraucher fließen zu lassen, geringer ist als bei hohen Widerständen.

Literaturverzeichnis

Dubbel

Beitz, Wolfgang; Grote, K.-H. (2001) 20 edn. ed. by Springer Verlag Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. Heidelberg, Berlin, New York: Beitz, W; Grote, K.-H

Kraftwerkstechnik Online

H. Lehmann, S. Wirts (2004) 2 edn. Kraftwerkstechnik Online. Bochum: Lehmann, H.; Wirts, S.

Laborunterlagen Dampfkraft

Mank (2006) TFH-Berlin.de/~laborkee [online] available from < <http://www.tfh-berlin.de/~laborkee/download/>> [5. December 2006]

Regenerative Energiesysteme

Volker Quaschnig (2006) 4 edn. ed. by Volker Quaschnig Regenerative Energiesysteme. München, Wien

Tabellenbuch Metall

Heinzler, M.; Kilgus, R.; Näher, F.; Paetzold, H.; Röhrer, W.; Schilling, K. (1997) 40 edn. ed. by Fischer, U. Tabellenbuch Metall. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel

Internet: www.dieBrennstoffzelle.de

Laboruntersuchung Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk

Fachbereich VIII Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik • Labor für konventionelle und erneuerbare Energien

Anhang

Tabelle 3: Versuchsmesswerte

Technische Fachhochschule Berlin Labor für konventionelle und erneuerbare Energien		Dozent: Prof. Dr. Bracke		Versuch: Brennstoffzellenblockheizkraftwerk Datum: 20.12.2006						
Eingestellte Parameter		System Brennstoffzelle				Gesamtsystem				
Brennstoffzellentemperatur Solwert	Nutzstrom Solwert	Wasserstoffdruck $P_{H_2, abs}$	Wasserstoff Volumenstrom \dot{V}_{H_2}	Brennstoffzellentemperatur T_{Bz}	Spannung U	Strom I_{Bz}	elektrische Leistung P_{el}	elektrische Nutzleistung $P_{el, Nutz}$	elektrische Leistung Komponenten $P_{el, komp}$	Nutzwärmestrom \dot{Q}_{Nutz}
$T_{Bz, Soll}$ °C	I_{Soll} A	$P_{H_2, abs}$ bar	\dot{V}_{H_2} l/min	T_{Bz} °C	U V	I_{Bz} A	P_{el} W	$P_{el, Nutz}$ W	$P_{el, komp}$ W	\dot{Q}_{Nutz} W
34	21	1,5	2,85	35,2	13,3	20,2	269	197	72	224
34	16	1,5	2,20	33,6	14,1	15,5	218	158	59	157
34	11	1,5	1,55	34,0	15,0	10,6	158	122	36	93
40	21	1,5	2,84	40,0	13,1	20,2	264	204	60	172
40	16	1,5	2,19	39,8	13,9	15,5	215	169	46	130
40	11	1,5	1,53	39,9	14,7	10,6	155	121	35	74
46	21	1,5	2,84	46,0	13,3	20,2	269	212	57	156
46	16	1,5	2,18	45,8	14,1	15,4	217	174	44	92
46	11	1,5	1,53	45,5	14,9	10,6	157	125	33	35
52	21	1,5	2,85	52,0	13,5	20,1	273	218	55	114
52	16	1,5	2,18	51,3	14,2	15,5	220	177	43	61
52	11	1,5	1,54	51,0	14,9	10,6	157	124	33	36

Laboruntersuchung Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk

Fachbereich VIII Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik • Labor für konventionelle und erneuerbare Energien

Tabelle 4: Versuchsauswertung

Technische Fachhochschule Berlin Labor für konventionelle und erneuerbare Energien		Dozent: Prof. Dr. Bracke		Versuch: Brennstoffzellenblockheizkraftwerk Datum: 20.12.2006																	
Parameter		System Brennstoffzelle										Gesamtsystem									
Temperatur T _{z, Soll}	Sollwert I _{Soll}	maximaler Wirkungsgrad Bezug: chem. Standarded.	maximaler Wirkungsgrad Bezug: T _z	reversible Spannung U _{rev, 0}	Klemmspannung U _{K, 0,06}	einzelne Zelle	Spannungswirkungsgrad	Wasserstoffmengenstrom gesamt	Wasserstoffmengenstrom einzelne Zelle	theoretischer Strom I _{th}	Stromwirkungsgrad	reversible Leistung P _{rev}	Brennstoffzellen-Wirkungsgrad Bezug: P _{rev}	Brennstoffzellen-Wirkungsgrade Bezug: Einzelwirkungsgrade	Systemwirkungsgrad	Gesamtwirkungsgrad	Wasserstoffwärmestrom Q _{H₂}	elektrischer Wirkungsgrad η _{el, kW}	Kraftwerkswirkungsgrad	Stromkennzahl	energetischer Wirkungsgrad η _{energetisch}
°C	A	η _{max} ⁰	η _{max}	V	V	V	η _U	mol/s	mol/s	A	η _I	W	η _{BZ}	η _{BZ}	η _{sys}	η _{ges}	W	η _{el, kW}	η _{el, kW}	σ	η _{energetisch}
34	21	0,945	0,943	1,185	0,667	1,229	0,54	0,00278	0,00014	26,85	0,75	-660	0,41	0,39	0,73	0,28	-673	0,29	0,88	0,88	0,62
34	16	0,945	0,943	1,185	0,705	1,229	0,57	0,00216	0,00011	20,81	0,74	-512	0,43	0,40	0,73	0,29	-522	0,30	1,01	1,01	0,60
34	11	0,945	0,943	1,185	0,748	1,229	0,61	0,00152	0,00008	14,64	0,72	-360	0,44	0,42	0,77	0,32	-367	0,33	1,31	1,31	0,59
40	21	0,945	0,942	1,185	0,656	1,229	0,53	0,00273	0,00014	26,34	0,77	-647	0,41	0,39	0,77	0,30	-660	0,31	1,18	1,18	0,57
40	16	0,945	0,942	1,185	0,695	1,229	0,57	0,00211	0,00011	20,33	0,76	-500	0,43	0,41	0,79	0,32	-509	0,33	1,29	1,29	0,59
40	11	0,945	0,942	1,185	0,734	1,229	0,60	0,00147	0,00007	14,19	0,75	-349	0,45	0,42	0,78	0,33	-356	0,34	1,63	1,63	0,55
46	21	0,945	0,940	1,185	0,667	1,229	0,54	0,00268	0,00013	25,85	0,78	-635	0,42	0,40	0,79	0,32	-648	0,33	1,36	1,36	0,57
46	16	0,945	0,940	1,185	0,703	1,229	0,57	0,00205	0,00010	19,80	0,78	-487	0,45	0,42	0,80	0,34	-496	0,35	1,88	1,88	0,54
46	11	0,945	0,941	1,185	0,744	1,229	0,61	0,00144	0,00007	13,89	0,76	-341	0,46	0,44	0,79	0,34	-348	0,36	3,59	3,59	0,46
52	21	0,945	0,939	1,185	0,677	1,229	0,551	0,00263	0,00013	25,39	0,79	-624	0,44	0,41	0,80	0,33	-636	0,34	1,91	1,91	0,52
52	16	0,945	0,939	1,185	0,7112	1,229	0,579	0,00202	0,00010	19,51	0,79	-480	0,46	0,43	0,80	0,35	-489	0,36	2,89	2,89	0,49