



**Modul II: KWK
Wirkungsgradmessung BHKW
Teststände**

Dipl. Ing. (FH) Peter Pioch
5.3.2015

Weiterbildungszentrum für
innovative Energietechnologien der
Handwerkskammer Ulm (WBZU)



Versuch HP 300

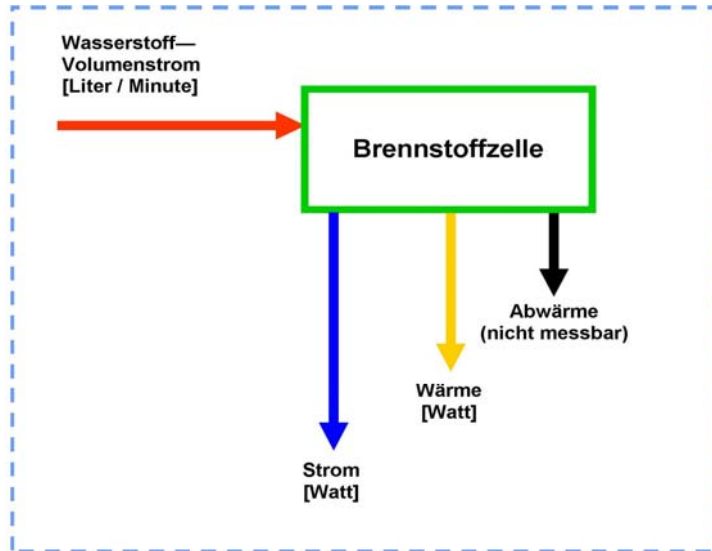


Quelle: WBZU



Energieumwandlung

Energie wird in Exergie und Anergie umgewandelt.



Quelle: WBZU
3



Auswertung der Versuche



Volumenstrom $H_2 \rightarrow 3 \text{ kWh/m}^3$



$$2,5 \text{ l /min} * 60 \text{ min/h} = 150 \text{ l/h}$$

$$\frac{3 \text{ kWh} * 150 \text{ l}}{1000 \text{ l} * \text{h}} = 450 \text{ W}$$

4



Wirkungsgrad

Bei einem H₂ Verbrauch von 2,5 l / min produziert die Brennstoffzelle 216 Watt elektrische Leistung, der Wirkungsgrad berechnet sich aus:

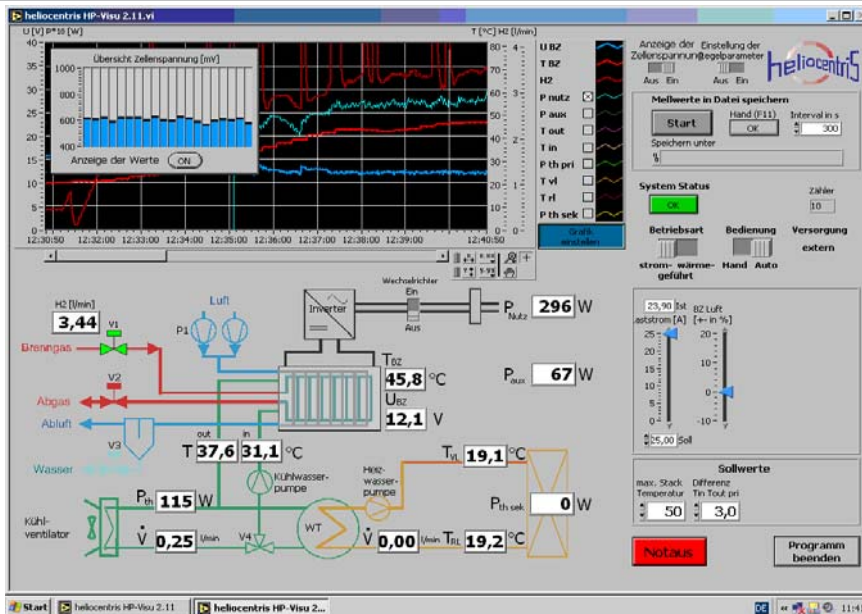
$$\frac{\text{Nutzenergie}}{\text{eingeführte Energie}} = \text{Wirkungsgrad}$$

$$\frac{216 \text{ Watt}}{450 \text{ Watt}} = 0,48 = 48 \%$$



Microsoft Excel - Auswertung HP 300 Wirkungsgrade Beispiel.xls

	A	B	C	D	E	F
1	Versuch BHKW HP 300 Heliocentris					
2						
3						
4	Strom (A)	Verbrauch (l)		H2 Leistung (W)	Leistungen (W)	
5						
6	list	H2/min	H2/h	3 kWh/1000 l	1000 Liter H2 enthalten 3 kWh H2 l * 3 kWh ----- = n kWh h * 1000 l	aux
7						
8	5,85	1,08	64,80	194,40		
9	7,75	1,16	69,60	208,80		
10	9,50	1,44	86,40	259,20	137	
11	11,50	1,73	103,80	311,40	161	



Quelle: WBZU

7

Im Labor darf nicht geraucht werden.

Im gesamten WBZU übrigens auch nicht

Jedes Labor hat eine eigene Überwachung der Raumluft auf

- Sauerstoffmangel
- CO (Kohlenmonoxid)
- CO₂ (Kohlendioxid)

Sollte ein Wert nicht mehr der Vorgabe entsprechen, gibt es einen Alarm. In diesem Fall müssen alle das Labor verlassen.

Dann gibt es eine Überwachung auf Wasserstoff im Labor, sowie einen Feuermelder.

Bei Wasserstoffalarm oder Feueralarm (sehr laute Hupen) muss das Gebäude sofort verlassen werden. Im Falle eines Brandes ist das Fenster als Notausgang vorgesehen.

8



Messungen im Labor 7

Im Labor 7 haben wir 2 BHKW

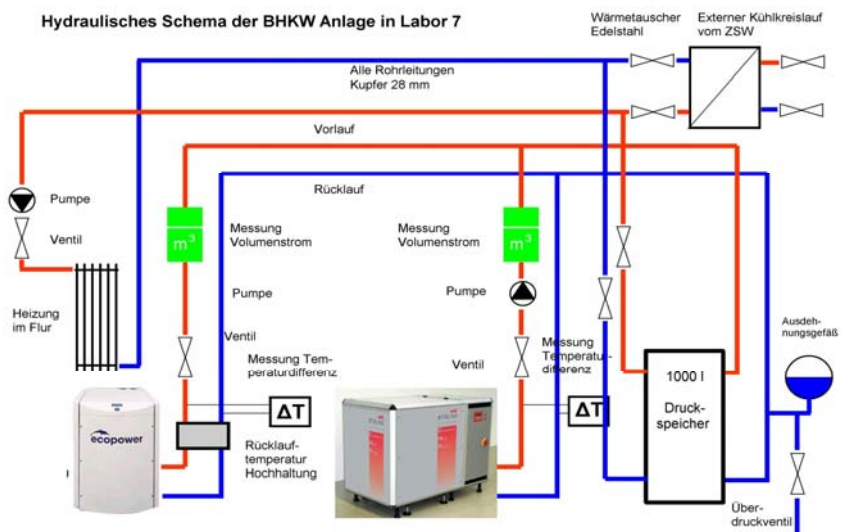
ecopower 4,7 kW_{el}; 12,5 kW_{th}

SOLO Stirling 9,5 kW_{el}; 26 kW_{th} (gedrosselt, wegen Leitungsquerschnitt)



BHKW – Hydraulisches Schema

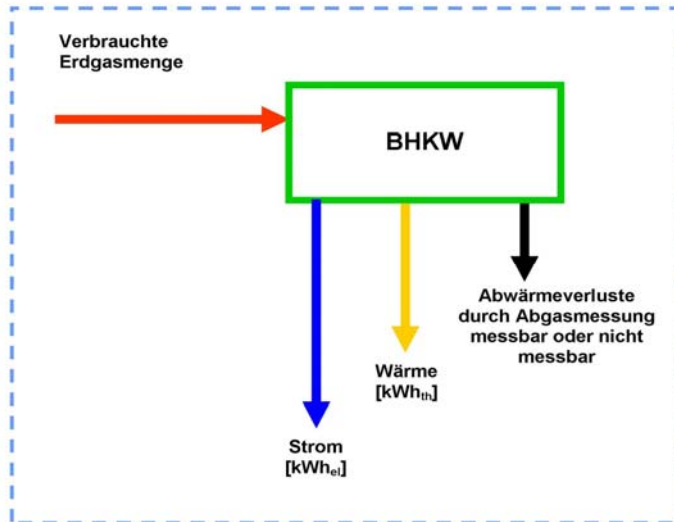
Hydraulisches Schema der BHKW Anlage in Labor 7





Energieumwandlung

Energie wird in Exergie und Anergie umgewandelt.



11



Wirkungsgrad vom BHKW

Eingebrachte Energie:

Der Heizwert (H_U) vom verwendeten Erdgas beträgt: 9,339 kWh/m³ bei Normalbedingungen. Der Brennwert 10,343 kWh/m³.

Die gemessenen Werte müssten um die Gastemperatur und des aktuellen Luftdruckes korrigiert werden.

Das Gas kommt aus Flaschen außerhalb des Gebäudes, wird mit 8 bar in Rohrleitungen zum Labor geleitet und dort auf 50 mbar entspannt.

12



Gewonnene elektrische Energie:

Der **erzeugte Strom** wird mittels eines Drehstromzählers gemessen. Da von der erzeugten Energie der Eigenbedarf der Anlage gedeckt wird, wird die Messung den elektrischen Nettowirkungsgrad ergeben.



Die vom System abgeführte Wärme muss berechnet werden.

Die Wasseruhr zeigt die abgeführte Wassermenge an.

Die Temperaturanzeigen die Vor- und Rücklauftemperatur.

Wird 1 Liter Wasser um 1 Kelvin erwärmt, so ist dazu eine Wärmemenge von 4183 Js (J) nötig.

Die spezifische Wärmekapazität von Wasser ist: $c_p = 4183 \text{ J/kg K}$ (bei 35 °C)





Die vom System abgeführte Wärme berechnet sich also:

$$Q_{\text{therm}} = \text{Wassermenge} * \text{Temperaturdifferenz} * c_p$$

$$Q_{\text{therm}} = I [\text{kg}] * \Delta T [\text{K}] * 4183 [\text{WS/kg K}]$$



Durch Eintragen der Werte in eine Tabelle werden die zu errechnenden Werte von Excel ermittelt.

Als Ergebnis erhalten wir die Wirkungsgrade.

Wichtig beim Versuch ist es wichtig, dass das BHKW thermisch im Gleichgewicht ist. Es darf sich während der Messung nicht aufheizen oder abkühlen. Ansonsten wirkt das BHKW als Wärmespeicher der gefüllt oder geleert wird. Der thermische Wirkungsgrad ist dann verfälscht.



Messung der eingebrachten Gasmenge



Die Gasmenge wird mit einem Balgengaszähler gemessen



Gesetz von Gay-Lussac

Das Gesetz von **Gay-Lussac** besagt, dass das Volumen idealer Gase bei gleich bleibendem Druck und gleich bleibender Stoffmenge direkt proportional zur Temperatur ist. Ein Gas dehnt sich also bei einer Erwärmung aus und zieht sich bei einer Abkühlung zusammen. Dieser Zusammenhang wurde 1787 von Jacques Charles und 1802 von Joseph Louis Gay-Lussac erkannt.

Für $p = \text{const}$ und $n = \text{const}$ gilt:



Quelle: wikipedia.de



Gesetz von Gay-Lussac



$$T \approx V$$

$$\frac{V}{T} = \text{const}$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Die Temperatur ist proportional zum Volumen

Das Verhältnis von Volumen zu Temperatur ist konstant

Daraus folgt, dass man das neue Volumen nach der Temperaturänderung berechnen kann

19



Anwendung auf die Gasmengenberechnung



Angewandt auf die Gasuhr im Labor 7 bedeutet dies:

Die Gasuhr ist auf eine Temperatur von 15°C justiert.

Die angezeigte Gasmenge ist dann richtig, wenn das Gas eine Temperatur von 15 °C hat. Das Gas ist jedoch wärmer, da die Gasrohre auf dem Weg ins Labor durch mehrere Heizräume gehen.

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Da das Gas wärmer ist, hat es ein größeres Volumen, die Uhr zeigt mehr Gas an, als bei 15 °C die Uhr durchströmt hätte.

20



$$V_1 = \frac{V_2 \cdot T_1}{T_2}$$

V1 = Volumen des Gases bei 15 °C (288,15 K)

T1 = absolute Temperatur von 15°C

V2 = gemessenes Gasvolumen

T2 = tatsächliche Gastemperatur

21



Das **Gesetz von Boyle-Mariotte** sagt aus, dass der Druck idealer Gase bei gleichbleibender Temperatur und gleichbleibender Stoffmenge umgekehrt proportional zum Volumen ist. Erhöht man den Druck auf ein Gaspaket, zieht sich dieses folglich zusammen. Verringert man den Druck, so dehnt es sich aus. Dieses Gesetz wurde kurz hintereinander und unabhängig von zwei Physikern entdeckt, dem Engländer Robert Boyle (1662) und dem Franzosen Edme Mariotte (1676):



Quelle: wikipedia.de



Quelle: <http://geraldine-pelaez.blogspot.de/>

22



Für $T = \text{const}$ und $n = \text{const}$ gilt:

$$p \approx \frac{1}{V} \quad p \cdot V = \text{const} \quad p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$



Die so genannten **Normalbedingungen** (auch **STP** genannt vom englischen Begriff "**S**tandard **T**emperature and **P**ressure") für die Angabe von Eigenschaften von Gasen sind:

Temperatur $T = 273,15 \text{ K} \triangleq 0 \text{ °C}$ und

Druck $p = 101325 \text{ Pa}$
= 101325 N/m^2
= **1013,25 hPa**
= $101,325 \text{ kPa}$
= $1013,25 \text{ mbar}$



$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

p_1 = Druck des Gases bei Umgebungsbedingungen

V_1 = Volumen des Gases bei Umgebungsbedingungen

p_2 = Druck des Gases bei Standardbedingungen

V_2 = Volumen des Gases bei Standardbedingungen

$$V_2 = \frac{p_1 \cdot V_1}{p_2}$$



	D	E	F	G	H	I	J	K
Versuch am ecopower BHKW / Eingabe Gasmenge								
	Eingebrachte Energie (Erdgas)			Luftdruck	Gastemperatur T_2			Korrigierte Gasmenge
	↓	↓	Differenz:	↓	↓	↓		Gay-Lussac
	m³ Start:	m³ Ende:	m³ [V2]	hPa	°C Start	°C Ende	Ø in K	m³
34	11,569	11,848	0,279	935,0	22,6	22,6	295,75	0,272
56	12,197	12,492	0,295	935,0	22,9	22,9	296,05	0,287
13	12,714	13,027	0,313	935,0	15,0	15,0	288,15	0,313

Aufgrund der eingegebenen Gastemperatur wird die Gasmenge neu berechnet. Bei Temperaturen oberhalb von 15°C wird die korrigierte Gasmenge kleiner sein. Das bedeutet, dass in Wirklichkeit weniger Gas in den Motor strömt als von der Gasuhr angegeben.



Anwendung auf die Gasmengenberechnung



Der Unterschied durch die Korrektur ist erheblich.

Eine Messung **ohne** Korrektur ergab einen:

elektrischen Wirkungsgrad von 21,5 %

thermischen Wirkungsgrad von 61,15 %

mit Korrektur ergaben sich:

elektrischen Wirkungsgrad von 23,7 %

thermischen Wirkungsgrad von 67,46 %

27



**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit !
Haben Sie Fragen ?**

www.wbzu.de



Brennstoffzelle
Anwendungsbereite und
effiziente
Energieerzeugung



Wasserstoff
Energieträger der
Zukunft



Batterie
Leistungsdichte
Energiespeicher



BHKW
Energie durch
Brennwert-Kopplung

