

EnLab Energie-Labor
Entdeckungsreise in die Welt der Energietechnik

Basic Erweiterungsmodul / Postenlauf

Blockheizkraftwerk (BHKW)



Gruppennummer:

Datum des Projektes:

Namen:

Vorbereitungsfragen zum Postenlauf BHKW

Die folgenden Fragen zum Postenlauf BHKW müssen **vor der Labordurchführung** von allen Teilnehmenden bearbeitet werden.

1. Zählen Sie drei Möglichkeiten auf, aus welchen Komponenten Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlagen aufgebaut sein können.
2. Im BHKW des Labors werden die heissen Abgase genutzt, um Wasser für einen Heizkreislauf in einem Wärmetauscher zu erwärmen. Skizzieren Sie schematisch einen Wärmetauscher und beschriften Sie eindeutig die ein- und austretenden Ströme. (Hinweis: Vergessen Sie nicht, eine Systemgrenze zu definieren).
3. Skizzierend Sie zu den unten aufgeführten (Teil-) Prozessen je ein Energieflussbild und bezeichnen Sie die ein- und austretenden Energieströme (Leistungen). Schätzen Sie grob die prozentualen Leistungsanteile ab.

Verbrennungs-
motor

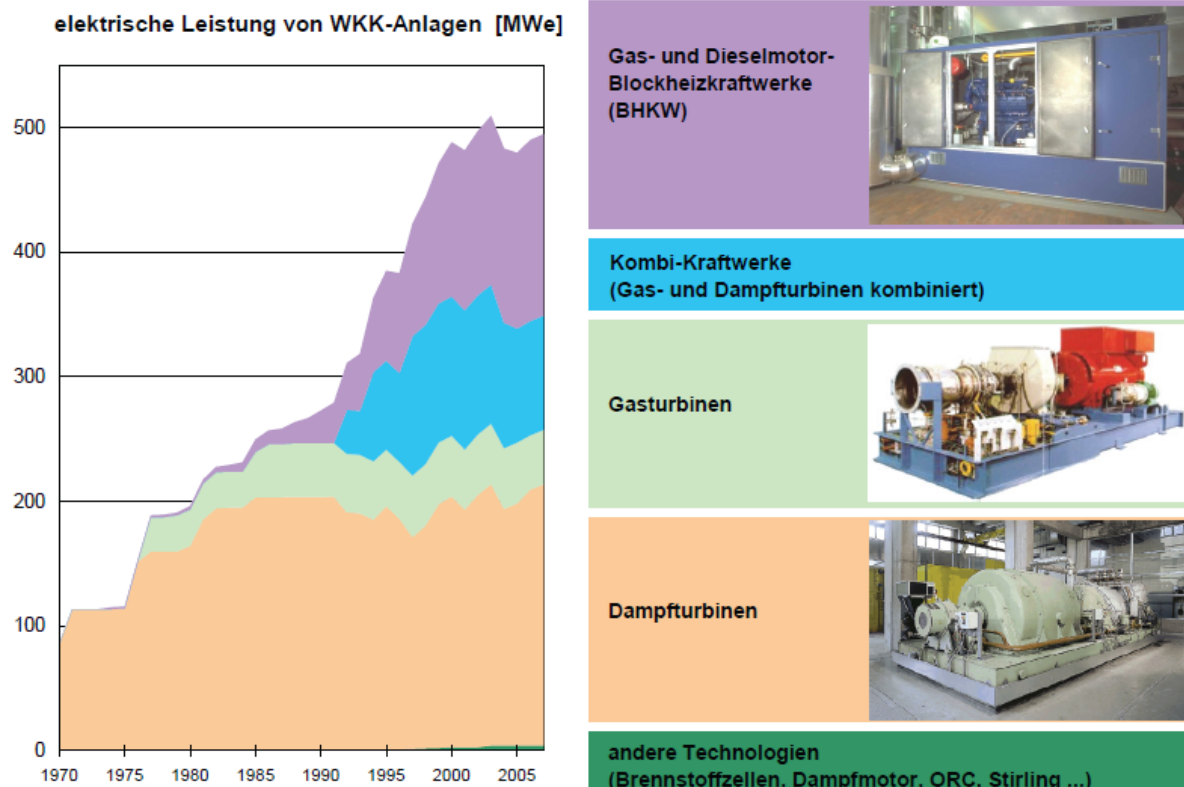
Generator

Gesamtes
BHKW

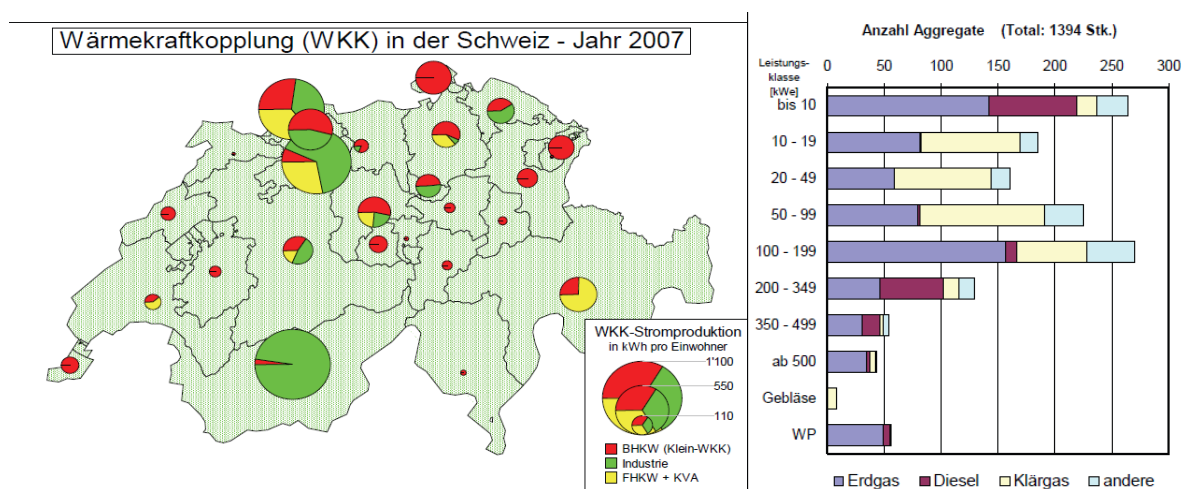
4. Was versteht man unter dem Gesamtwirkungsgrad einer WKK-Anlage und aus welchen Teilen setzt er sich zusammen?

Hintergrundinformation /1/:

Im Jahr 2007 wurden in der Schweiz insgesamt 65'916 GWh Elektrizität erzeugt. Davon stammen 3'244 GWh, also knapp 5 % aus den Generatoren von thermischen Stromerzeugern (Nutzung fossiler oder biogener Energieträger). Werden mindestens 5 % der eingesetzten Energie in Elektrizität umgewandelt und erreicht der Gesamtnutzungsgrad (Wärme und Elektrizität) mindestens 60 %, sprechen wir von Wärmekraftkopplungs-Anlagen (**WKK-Anlagen**).



Technologie-Anteil an der Stromeinspeisung durch WKK-Anlagen in der Schweiz.



Geographische Verteilung der WKK-Anlagen

Leistungsgrößen von BHKWs

Funktionsprinzip: Nutzung der Wellenleistung zum Antrieb eines Generators und gleichzeitige Nutzung der Abwärmeleistung (oder Speicherung des Warmwassers in einem Behälter für späteren Bezug).



The diagram illustrates the energy flow of a Mini-BHKW system. On the left, a power line from the 'öffentliches Stromnetz' (public power grid) passes through a 'Zähler' (meter) to provide 'Haushaltsstrom' (household electricity) to a washing machine and a computer. The power line then enters the 'Mini-BHKW' unit. Inside this unit, 'Gas' is fed into a 'Motor' which is connected to a 'Generator'. The 'Generator' produces 'Strom' (electricity) which is distributed to the household appliances. The 'Motor' also drives a 'Plattenwärmtauscher' (plate heat exchanger). The 'Abgasführung' (exhaust gas duct) leads from the top of the unit. The 'Plattenwärmtauscher' heats 'Kaltwasser' (cold water) from a tank, which then flows into a 'Heizung' (heating system) and a 'Warmwasser' (hot water) tank. The 'Warmwasser' tank also has a direct connection to the heating system. The 'Heizung' is represented by a series of radiators.

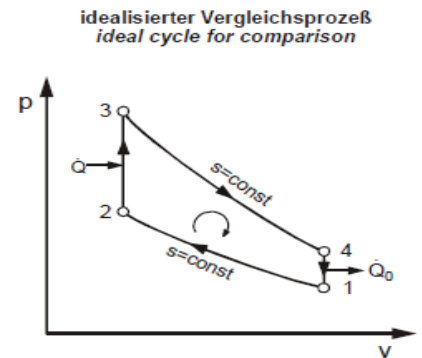
Im Heizwasserkreislauf in der untersuchten Anlage wird anstelle von Wasser ein Wasser/Glykol-Gemisch eingesetzt. Die Dichte ρ und die spezifische Wärmekapazität c_p des Wasser/Glykol-Gemischs (bestehend aus 82%v/v Wasser und 18%v/v Propylenglykol) sind abhängig von der Temperatur. Die in dieser Arbeit benötigten Stoffwerte lauten:

Spez. Wärmekapazität bei 75°C: $c_{p, HW} = 4110 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$

Der (ideale) Otto-Motor Kreisprozess /4/ + /5/:

Es gibt Zwei- und Vier-Takt-Motoren. Ein Takt besteht jeweils aus einem Kolbenhub bzw. einer halben Kurbelwellenumdrehung. Beim 4-Takt-Ottomotor lassen sich die Zustandsänderungen wie folgt den Arbeitstakten zuordnen (der ideale Motor hat weder Reibungs- noch sonstige Dissipationsverluste):

- 1. Takt = Ansaugen: $0 \rightarrow 1$
- 2. Takt = Verdichten: (isentropische Kompression) $1 \rightarrow 2$
- 3. Takt = Arbeitstakt: Wärmezufuhr $2 \rightarrow 3$ im oberen Totpunkt mit anschließender isentroper Expansion $3 \rightarrow 4$. Da sich bei der Wärmezufuhr das Brennraumvolumen nicht ändert, handelt es sich um eine isochore Zustandsänderung, daher der Name Gleichraumverbrennung.
- 4. Takt = Ausblastakt: Durch das Öffnen des Auslassventils expandieren die Abgase im unteren Totpunkt ohne weitere Arbeitsleistung nach außen $4 \rightarrow 1$ und der Rest wird durch den Kolbenhub $1 \rightarrow 0$ nach außen geschoben. Dabei wird die im Abgas enthaltene Wärme Q_{41} (Abgasverlust) an die Umgebung abgegeben.

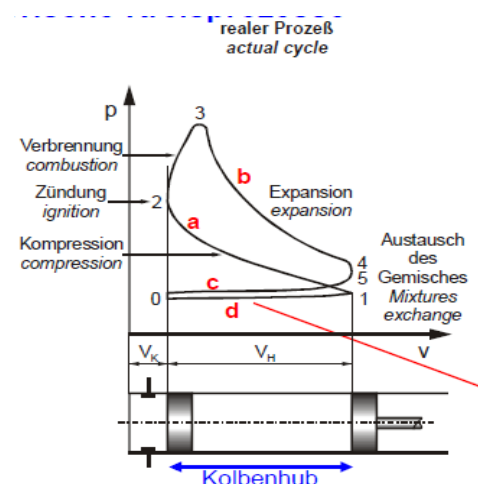


Der reale Otto-Motor

Luft enthält Stickstoff und ist bei höheren Drücken (ab 10 bar) **kein ideales Gas**. Zudem führt die Verbrennung des Treibstoffes zu einer Veränderung der thermodynamischen Eigenschaften.

Gegenüber dem Vergleichsprozess gibt der reale Prozess im Motor insbesondere deshalb eine geringere Arbeit ab, weil

- das Ansaugen und Ausschieben mit Reibungsverlusten verbunden ist,
- die Verbrennung nicht isochor erfolgt, sondern Zeit erfordert, in der sich die Kurbelwelle weiterdreht. Deshalb erfolgt die Zündung vor dem oberen Totpunkt, und die Verbrennung ist erst nach dem o.T. abgeschlossen. Die Spitze im Diagramm bei 3 wird also nach unten abgerundet.
- ein Teil der durch chemische Reaktion zugeführten Energie ohne Arbeitsleistung durch Wärmeübergang an das Kühlmedium (meist Wasser) abgeführt wird. Der Expansionsverlauf liegt unterhalb des idealen Verlaufes.
- das Auslassventil vor dem unteren Totpunkt geöffnet wird. Die Prozessfläche wird im Punkt 4 nach unten abgerundet.



Das Verhältnis von im Motor freigesetzter zu theoretischer Arbeit des Prozesses wird im Gütegrad ausgedrückt (reale Motoren haben zusätzlich eine mechanische Verlustleistung aus Reibung, Neben- und Hilfsantrieben, die ca. 10 % der Nennleistung betragen kann und den Wirkungsgrad weiter vermindert).

Die Eckdaten des Verbrennungsmotors (MWM Dimag G226 B-4) sind:

Bauart:	4-Takt-Fremdzünder (Otto-Motor) mit Erdgas als Brennstoff
Hubvolumen:	4,156 ℓ
Zylinderzahl:	4
Synchrondrehzahl:	1500 min ⁻¹
Regulierung für Lambda =	1
Mech. Nennleistung:	32 kW [Betrieb mit Drosselung für Lebensdauerverlängerung]
Motorkühlung:	mit Glykol/Wasser-Gemisch

Einheiten

Bitte rechnen Sie mit den im Symbolverzeichnis angegebenen Einheiten. Wird eine Grösse in einer anderen Einheit erfasst, muss sie umgerechnet werden.

Gebräuchliche Druckeinheiten: $10^5 \text{ N/m}^2 = 1000 \text{ mbar} = 1 \text{ bar}$
 $1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$

In den Gasgleichungen **muss immer** die Absoluttemperatur eingesetzt werden:

$$T [\text{in K}] = t [\text{in } ^\circ\text{C}] + 273,15$$

Für kalorische (Form von Energie) Grössen wird die Einheit Joule verwendet:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws}$$

Symbolverzeichnis

Bezeichnung	Symbol	Einheiten
Elektrische Leistung	P_{elektr}	[W]
Mechanische Leistung (Wellenleistung)	$P_{\text{mech}} ; P_{\text{Welle}}$	[W]
Drehzahl der Welle	n	[min ⁻¹]
Wärmeleistung	\dot{Q}	[W]
Umgebungsdruck	$p_{\text{umg}} ; p_{\text{Barometer}}$	[mbar=10 ⁻² Pa]
Enthalpiestromänderung	$\dot{m} (h_2 - h_1)$	[W]
Volumenstrom	\dot{V}	[m ³ /s]
Massenstrom	\dot{m}	[kg/s]
Dichte	ρ	[kg/m ³]
Temperatur	t	[°C]
Absoluttemperatur	T	[K]
Spezifische Wärmekapazität	c_p	[J/(kg*K)]
Wirkungsgrad	η	[-]

Lernziele: Sie können

1. das Funktionsprinzip eines BHKW erklären und geeignete Anwendungen zuordnen
2. Energiebilanzen erstellen, hinsichtlich Quantität und Qualität

Zeitaufwand: 4 Lektionen

Verschaffen Sie sich einen Überblick und teilen Sie sich die zur Verfügung stehende Zeit für folgende Aufgaben gut ein:

Aufgaben:

1. Studieren Sie das Anlagenschema, identifizieren Sie die wichtigsten Komponenten und ordnen Sie die für Ihre Untersuchung relevanten Messstellen sowie Messfühler zu.
2. Nehmen Sie die Anlage (mit Messdatenerfassung) unter Anleitung in Betrieb und starten Sie die Messung wenn ein stationärer Zustand erreicht ist.
4. Erfassen Sie für eine Dauer von mind. 5 min die notwendigen Grössen.
5. Werten Sie die Messung sorgfältig aus, stellen Sie ein Energieflussdiagramm zusammen und diskutieren Sie Ihre Ergebnisse mit Ihrem Betreuer.
6. Bearbeiten Sie die folgenden Aufgabenblätter so selbstständig wie möglich. Bei Fragen wenden Sie sich an den zuständigen Betreuer.

Abzugeben sind per e-mail (1 x pro Gruppe):

1. Ein ausgefülltes Titelblatt
2. Beantwortete Vorbereitungsfragen
3. Ausgefüllte Arbeitsblätter mit Ihren Messergebnissen

Die Arbeitsblätter werden korrigiert und wenn nötig, bei der Rückgabe, mit Ihnen besprochen.

Literatur:

- /1/ Bundesamt für Energie BFE Sektion Analysen und Perspektiven, September 2008 „Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz“
- /2/ Bundesamt für Energie BFE, Abteilung Energieeffizienz und erneuerbare Energien, F. Rognon, November 2008 „Effizientere Nutzung von fossilen Brennstoffen und Reduktion der CO₂-Emissionen bei der Erzeugung von Raumwärme und Elektrizität in der Schweiz“
- /3/ www.bhkw-info.de (Steinborn Innovative Gebäude Energieversorgung)
- /4/ Universität Siegen, Institut für Fluid- und Thermodynamik, Lehrstuhl für Thermodynamik und Verbrennung (www.uni-siegen.de/fb11/thv/lehre/ss08/skript/td2-kreisprozesse2.pdf)
- /5/ www.wikipedia.com – Stichwort: Otto Kreisprozess

Arbeitsblätter**Anlagenschema Blockheizkraftwerk**

Mit der MDEA gemessene Größen

t 01	Temp. Erdgas
t 02	Temp. HW Rücklauf
t 03	Temp. HW nach Motorkühlung
t 04	Temp. HW nach Abgaskollektor
t 05	Temp. HW Vorlauf
t 06	Temp. Abgas Kamin

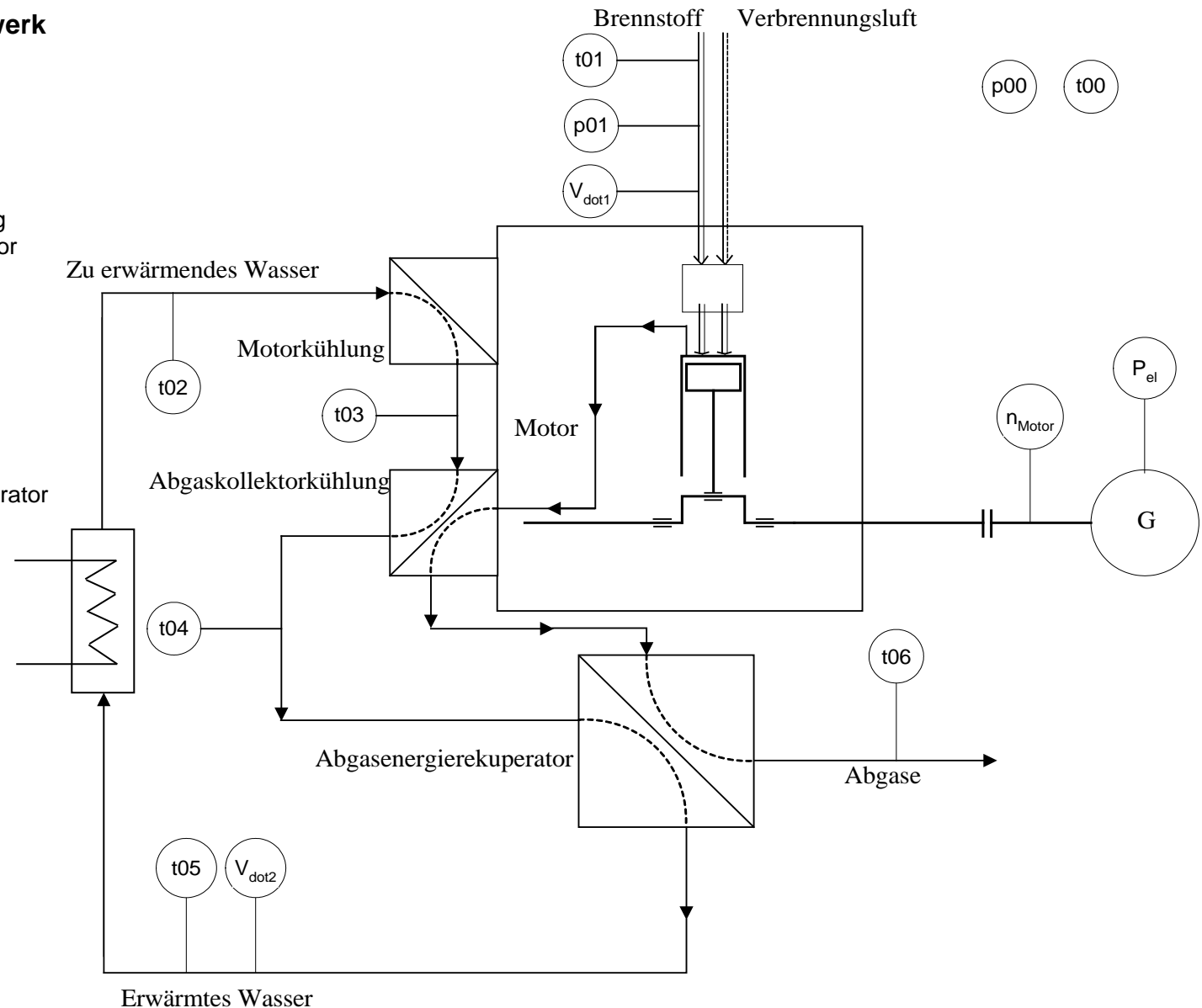
$V_{\dot{01}}$	Volumenstrom Erdgas
$V_{\dot{02}}$	Volumenstrom Heizwasser

p 01	Druck Erdgas
n_{Motor}	Motorendrehzahl
P_{el}	Elektrische Leistung am Generator

Laboreingang

t 00	Umgebungstemperatur
p 00	Umgebungsdruck

MDEA Messdatenerfassungsanlage
HW zu erwärmendes Wasser
(Heizwasser)



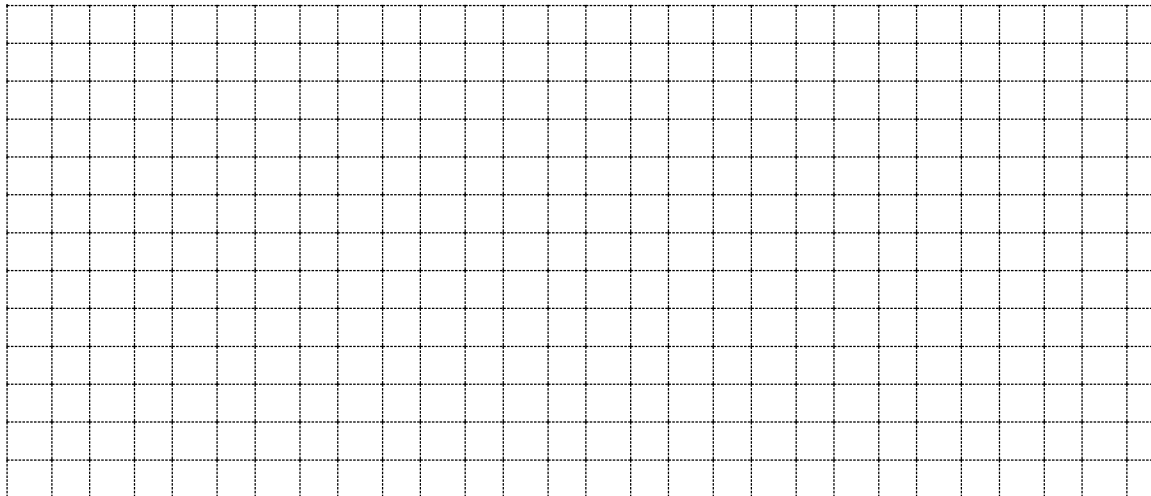
Arbeitsblätter**Messprotokoll Blockheizkraftwerk**

$$1 \text{ mm Hg} = 133,3224 \text{ Pa}$$

		Ablesung		Korrekturen		Umrechnung	
Datum	Zeit	pBarometer	tUmgebung	Temp. Korr.	andere Korr.	pBarometer	pBarometer
yyyy.mm.dd	hh.mm	[mm Hg]	[°C]	[mmHg]	[mm Hg]	[mm Hg]	[Pa]
				-	+ 0,33		

Energieflussbild

Stellen Sie die ermittelten Leistungen in einem Energieflussbild massstäblich dar.



Arbeitsblätter

In den Auswertungen verwendete Indizes:

G	<i>Gas (Erdgas)</i>
L	<i>Luft</i>
N	<i>Norm</i>
(a)	<i>absolut</i>
(g)	<i>relativ</i>

Volumenstrom vom Erdgas (\dot{V}_G)

Durchschnittlicher „Erdgas-Volumenstrom“ über die Messperiode:

$$\dot{V}_G =$$

Normvolumenstrom vom Erdgas

$$\dot{V}_{GN} = \dot{V}_G \cdot \frac{T_N}{T_G} \cdot \frac{p_{G(a)}}{p_N}$$

$$\text{mit } p_{G(a)} = p_{G(g)} + p_{Umg}$$

Physikalischer Normzustand:

$$T_N = 273,15 \text{ K}$$

$$p_N = 1,01325 \text{ bar}(a)$$

Normvolumenstrom von angesaugter Luft

Bemerkung: Luftvolumenstrom bei $\lambda = 1$ ($\Lambda = 1$) (d.h. bei einer stöchiometrischer Verbrennung) wird “minimaler Luftbedarf” genannt.

$$\text{Aus den Erdgasdaten } \frac{\dot{V}_{Lmin}}{\dot{V}_{GN}} =$$

Normvolumenstrom von angesaugter Luft:

$$\dot{V}_{LN} =$$

Leistungs- und Wirkungsgradberechnungen

Mit dem Brennstoff zugeführte Thermische Leistung

(aus Gasvolumenstrom und Brennwert)

$$\dot{H}_{\text{Brennstoff}} = \dot{V}_{GN} \cdot H_{O,N}$$

mit $H_{O,N}$ aus Erdgasdaten:

Elektrische Generatorleistung

Mittelwert über die Messperiode

$$P_{\text{elektr}} =$$

Wellenleistung

(aus elektrischer Leistung und Generatorwirkungsgrad η_{elektr} aus Kennlinie des Generators)

$$P_{\text{Welle}} = \frac{P_{\text{elektr}}}{\eta_{\text{elektr}}}$$

Effektiver Wirkungsgrad des Gasmotors

$$\eta_{\text{Gasmotor}} = \frac{P_{\text{Welle}}}{\dot{H}_{\text{Brennstoff}}}$$

Heizleistung (= Nutzwärme)

(aus Temperaturdifferenz und Durchfluss)

Durchschnittlicher „Heizwasser-Volumenstrom“ über die Messperiode:

Mittelwert der Temperatur „Heizwasser-Vorlauf“ über die Messperiode:

Mittelwert der Temperatur „Heizwasser-Rücklauf“ über die Messperiode:

Dichte ρ_{HW} des Wasserglykols bei mittlerer Heizwassertemperatur:

Spezifische Wärmekapazität $c_{p, \text{HW}}$ des Wasserglykols bei mittlerer Heizwassertemperatur:

Heizleistung

Berechnung gemäss Pkt.2 der Vorbereitungsfragen.

$$\dot{Q}_{\text{HW}} =$$

Wirkungsgrad der Stromerzeugung

$$\eta_{\text{Stromerzeugung}} = \frac{P_{\text{elektr}}}{\dot{H}_{\text{Brennstoff}}}$$

Nutzungsgrad der Anlage

$$\eta_{\text{Nutz}} = \frac{\dot{Q}_{\text{HW}} + P_{\text{elektr}}}{\dot{H}_{\text{Brennstoff}}}$$

Bedienungsanleitung für BHKW (Speicher sind leer)

- ☐ Hauptschalter rechter Steuerschrank auf I stellen
- ☐ Messtechnik einschalten
- ☐ Computer und Messprogramm starten

- ☐ Hydraulische Schaltung mittels Kugelhahnen einstellen
- ☐ Schalter Speicherladepumpe auf 1 stellen

- ☐ Hauptschalter linker Steuerschrank auf EIN
- ☐ Schalter Kühlwasserpumpe auf HAND stellen
- ☐ Voltmeter auf L1L2 stellen

- ☐ Kugelhahn Ergasversorgung öffnen

- ☐ Störung BHKW (falls erleuchtet) mit der RESET taste quittieren
- ☐ Mit Laufbefehl „Hand“ BHKW starten; es vergehen einige Sekunden bis die Maschine startet

- ☐ Während Betrieb relevante Daten regelmässig überwachen

BHKW abstellen

- ☐ Daten speichern
 - ☐ Messtechnik und Computer abstellen
 - ☐ Schalter Laufbefehl auf 0 stellen
 - ☐
- warten
- ☐ BHKW fährt über einige Minuten auf Leerlauf und stellt bei ca. 3 kW automatisch ab

 - ☐ Kugelhahn Ergasversorgung schliessen
 - ☐ Motor-Kühlwasserpumpe noch ca. 10 Minuten laufen lassen um Restwärme abzuführen
 - ☐ Wenn Versuch definitiv beendet ist, beide Hauptschalter auf 0 stellen.