

# Praktikum

Gesamtbilanzierung und Wirkungsgradbestimmung  
eines erdgasbetriebenen Mini-Blockheizkraftwerks



# Praktikumsversuch

## Gesamtbilanzierung und Wirkungsgradbestimmung eines erdgasbetriebenen Mini-Blockheizkraftwerks

### 1. Einleitung und Grundlagen

Bild 1 zeigt, dass der Energiebedarf eines Wohnhauses hauptsächlich aus Wärme und Elektrizität besteht. Diese beiden Energieformen werden nach heutigem Stand der Technik vorwiegend getrennt bereitgestellt:

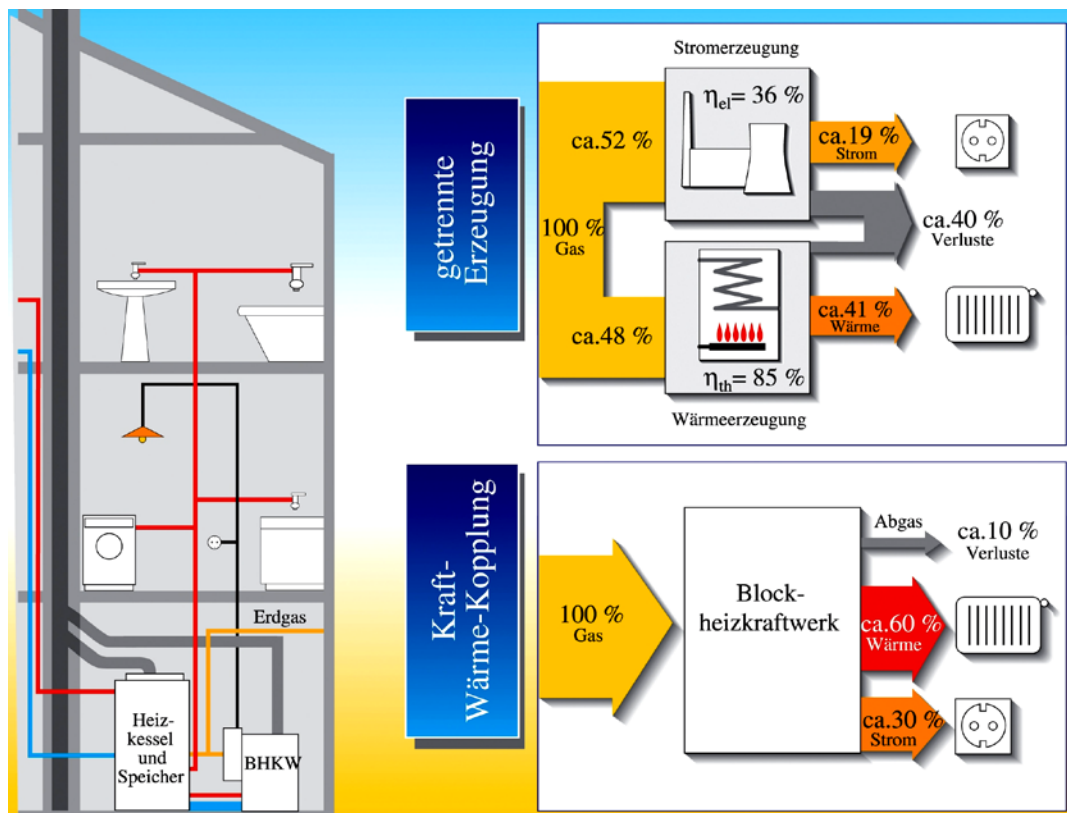


Bild 1: Vergleich des Primärenergieeinsatzes getrennte Erzeugung bzw. KWK (Quelle: asue)

- Leistungsstarke Großkraftwerke produzieren unter Einsatz von Primärenergie Strom, welcher über Hochspannungsnetze verteilt wird (zentrale Versorgung).
- Wärme wird, solange es sich nicht um eine Versorgung mittels Nah-, bzw. Fernwärmenetze handelt, durch die Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Brennstoffen in Heizungsanlagen, welche direkt im Haus installiert sind, erzeugt (dezentrale Versorgung).

Bild 1 zeigt deutlich, dass bei gleichem Primärenergieeinsatz (Menge und Art des Brennstoffes) die Verluste durch die gekoppelte Erzeugung um ca. 30 % geringer sind. Auch die CO<sub>2</sub>-Emission sinkt durch den Einsatz von KWK-Systemen.

Die Kraft-Wärme-Kopplung beschreibt die gleichzeitige Umwandlung von eingesetzter Primärenergie in elektrische Energie und Nutzwärme in einer dezentralen technischen Anlage.

Im Fall der Kraft-Wärme-Kopplung wird die Brennstoffenergie im Vergleich zum Heizkessel nicht einfach nur in Nutzwärme umgewandelt, sondern durch das Auskoppeln von mechanischer Energie auch noch Strom gewonnen. Das Temperaturniveau der dabei entstehenden Wärme ist jedoch immer noch hoch genug um Heizzwecke zu erfüllen. Energieumwandelnde Systeme können Verbrennungsmotoren, Stirlingmotoren, Gasturbinen, Dampfturbinen oder auch Brennstoffzellen sein.

Bild 2 zeigt den allgemeinen Aufbau von Systemen bei denen die Energieumwandlung mittels Verbrennungsmotoren vollzogen wird. Sie bestehen aus einer Antriebseinheit, einem Generator, Wärmeübertragern und gegebenenfalls Katalysatoren bzw. Dampferzeugern für Prozesswärme (industrielle Anwendungen).

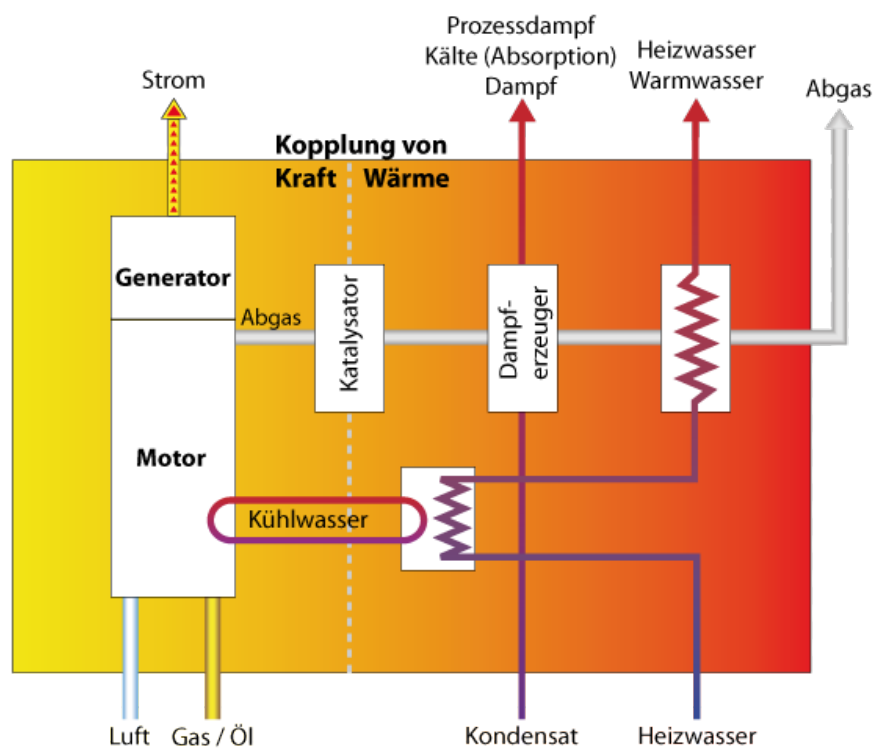


Bild 2: Prinzipskizze KWK (Quelle: BHKW-Infozentrum GbR)

Die Effizienz solcher Systeme kann durch Wirkungsgrade näher beschrieben und beurteilt werden. Ein Wirkungsgrad beschreibt allgemein das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand.

### Elektrischer Wirkungsgrad:

Der elektrische Wirkungsgrad stellt das Verhältnis von abgegebener elektrischer Leistung zur zugeführten Feuerungswärmeleistung dar:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{FWL}} = \frac{P_{el}}{\dot{V}_{B, Norm} \cdot H_{U, Norm}} \quad (1.1)$$

mit:

$P_{el}$	abgegebene elektrische Leistung
$\dot{Q}_{FWL}$	zugeführte Feuerungswärmeleistung
$\dot{V}_{B, Norm}$	zugeführter Volumenstrom an Brenngas im Normzustand
$H_{U, Norm}$	Heizwert des Erdgases im Normzustand (36273 kJ/Nm <sup>3</sup> )

### Thermischer Wirkungsgrad:

Der thermische Wirkungsgrad stellt das Verhältnis der vom BHKW abgegebenen thermischen Leistung zur aufgenommenen Feuerungswärmeleistung dar und ergibt sich wie folgt:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{th}}{\dot{Q}_{FWL}} = \frac{\dot{Q}_{th}}{\dot{V}_{B, Norm} \cdot H_{U, Norm}} \quad (1.2)$$

Die thermische Leistung beschreibt die vom BHKW abgegebene Nutzwärme an ein Zwischenmedium, meist Wasser, welches in einen Heizkreislauf übertragen wird.

$$\dot{Q}_{th} = \dot{m}_w \cdot c_{p(Wasser)} \cdot (\vartheta_{VL} - \vartheta_{RL}) \quad (1.3)$$

mit:

$\dot{Q}_{th}$	thermisch abgegebene Leistung
$\dot{m}_w$	Massenstrom Heizwasser
$c_{p(Wasser)}$	spezifische Wärmekapazität (4,18 kJ/kg K)
$\vartheta_{VL}$	Vorlauftemperatur
$\vartheta_{RL}$	Rücklauftemperatur

### Gesamtwirkungsgrad:

Bei gleichzeitiger Erzeugung von Strom und Wärme ist der Gesamtwirkungsgrad:

$$\eta_{ges} = \eta_{el} + \eta_{th} \quad (1.4)$$

### Stromkennzahl

Die Stromkennzahl S setzt die elektrische Leistung zur thermischen Leistung ins Verhältnis. Sie kann damit aus dem Quotienten von elektrischem zu thermischem Wirkungsgrad berechnet werden.

$$S = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{th}} = \frac{\eta_{el}}{\eta_{th}} \quad (1.5)$$

### Abgasverlust

Der Abgasverlust  $q_A$  [%] kann mit Hilfe der Siegert'schen Formel bestimmt werden. Dazu müssen mit einem Abgas-Analysegerät die Verbrennungslufttemperatur, die Abgastemperatur und der CO<sub>2</sub>- oder der O<sub>2</sub>-Volumenanteil im Abgas bestimmt werden.

$$q_A = (\vartheta_A - \vartheta_L) \cdot \left( \frac{A_1}{r_{CO_2}} + B \right) \quad (1.6)$$

oder

$$q_A = (\vartheta_A - \vartheta_L) \cdot \left( \frac{A_2}{21 - r_{O_2}} + B \right) \quad (1.7)$$

mit:

- $\vartheta_A$  Abgastemperatur [°C]
- $\vartheta_L$  Verbrennungslufttemperatur [°C]
- $r_{CO_2}$  Volumenanteil CO<sub>2</sub> [%]
- $r_{O_2}$  Volumenanteil O<sub>2</sub> [%]
- A1 = 0,37 für Erdgas
- A2 = 0,66 für Erdgas
- B = 0,009 für Erdgas

Die Abgasverlustleistung ergibt sich durch Multiplikation der Feuerungswärmeleistung mit dem Abgasverlust  $q_A$ :

$$\dot{Q}_A = \dot{Q}_{FWL} \cdot q_A \quad (1.8)$$

## 2. Versuchsdurchführung

### 2.1 Gesamtbilanzierung

Ziel des Praktikumsversuchs ist es, eine energetische Betrachtung des Mini-Blockheizkraftwerks bei zwei unterschiedlichen Betriebspunkten (1400 U/min und 2400 U/min) durchzuführen.

Die dafür notwendigen zu-/ und abgeführten Energieströme sind in Bild 3 dargestellt.

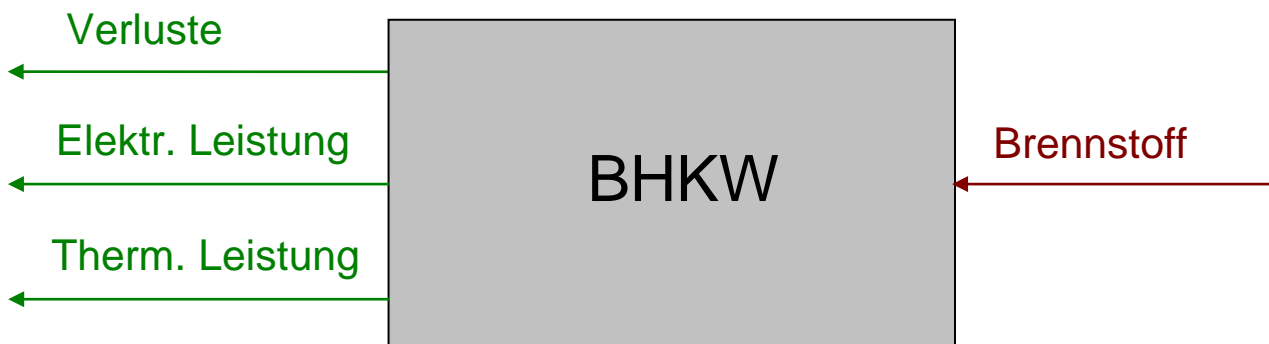


Bild 3: Energieströme am BHKW

Tabelle 1 zeigt, welche Größen zur Berechnung der Energieströme erfasst werden und welche Messinstrumente hierfür eingesetzt werden. Bringen Sie für die Auswertung bitte einen Taschenrechner mit.

Energiestrom	gemessene Größe	Messinstrument
thermische Leistung	Temperatur Vor-/Rücklauf Volumenstrom Heizkreis	PT-100 Widerstandsthermometer magn. induktiver Durchflussmesser
elektrische Leistung	elektrische Leistung	Messwertumformer für Wirkleistung
Brennstoff	Volumenstrom Erdgas	therm. Durchflussmesser
Abgasverlust	Temperatur Abgas / Luft CO <sub>2</sub> oder O <sub>2</sub> -Volumen- anteil	Abgas-Analysegerät

Tabelle1: Energiestöme

## 2.2 Hydraulischer Aufbau

Der Hydraulische Aufbau ist in Bild 4 dargestellt. Über den internen Heizungswärmeübertrager des BHKW (6) wird die erzeugte Wärme in den Heizkreis abgegeben. Zwei PT-100 Temperaturfühler (5,10) erfassen die Temperaturen des Vor- bzw. Rücklaufs. Der Volumenstrom des Heizkreislaufs wird durch einen magnetisch induktiven Durchflussmesser (9) gemessen. Die Mischerguppe des BHKW, bestehend aus einem 3-Wege-Mischventil (3) und einer Umwälzpumpe (4), sorgt für eine Beimischung des wärmeren Vorlaufwassers in den Rücklauf. Diese Temperaturerhöhung des Rücklaufs ist notwendig, um die Motortemperatur in der Warmlaufphase des BHKW auf über 50°C zu erhöhen. Im Versuch ist die Beimischung dann außer Kraft gesetzt.

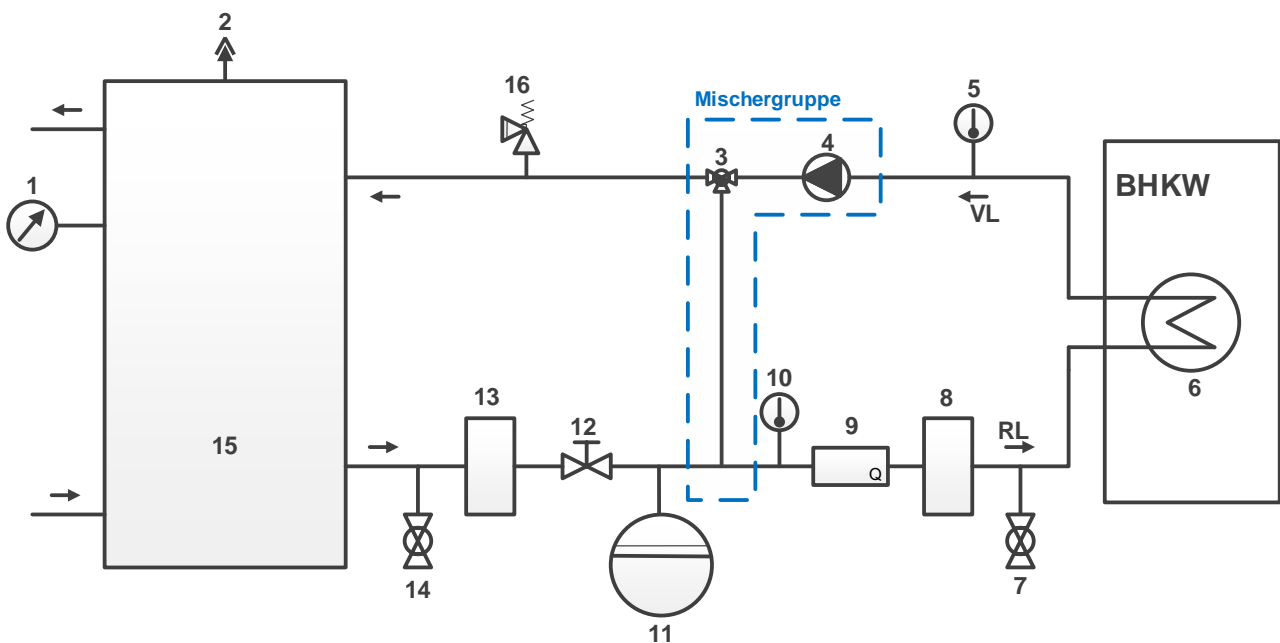


Bild 4: Hydraulischer Aufbau

1	Manometer	9	MID
2	Entlüfter	10	PT-100
3	3-Wege-Mischventil	11	Ausdehnungsgefäß
4	Umwälzpumpe	12	Absperrhahn
5	PT-100	13	Schlammabscheider (grob)
6	Heizungs-WÜ BHKW	14	Kugelhahn
7	Kugelhahn	15	Pufferspeicher
8	Schlammabscheider (fein)	16	Sicherheitsventil

## 2.3 Mini-BHKW

Bei dem im Versuch eingesetzten Mini-BHKW handelt es sich um ein Fabrikat der Firma PowerPlus Technologies GmbH. Der Verbrennungsmotor (4) treibt einen Generator (3) an, welcher Strom erzeugt. Ein großer Teil der Motorabwärme, sowie der Abgasabwärme wird über einen Heizungswärmeübertrager (5) aus dem System in den Heizkreislauf abgeführt. Alle Bestandteile der Antriebs-Einheit sind über schwingungstechnische Komponenten im Gehäuse gelagert, um auftretende Vibrationen zu mindern. Das Gehäuse ist mit einer schall-, bzw. wärmedämmenden Isolierung versehen. Bild 5 zeigt eine Seitenansicht des Mini-BHKW. Der Abgaswärmeübertrager (2) und der Schalldämpfer (6) befinden sich über dem Motor (4). Dieser ist direkt mit dem Generator (3) verbunden. Die Elektroanschlüsse (9) und der Steuerschrank (1) sind durch das Gehäuse abgedeckt. Der Gasanschluss (8) und die Heizungsanschlüsse (7) befinden sich auf der Rückseite.

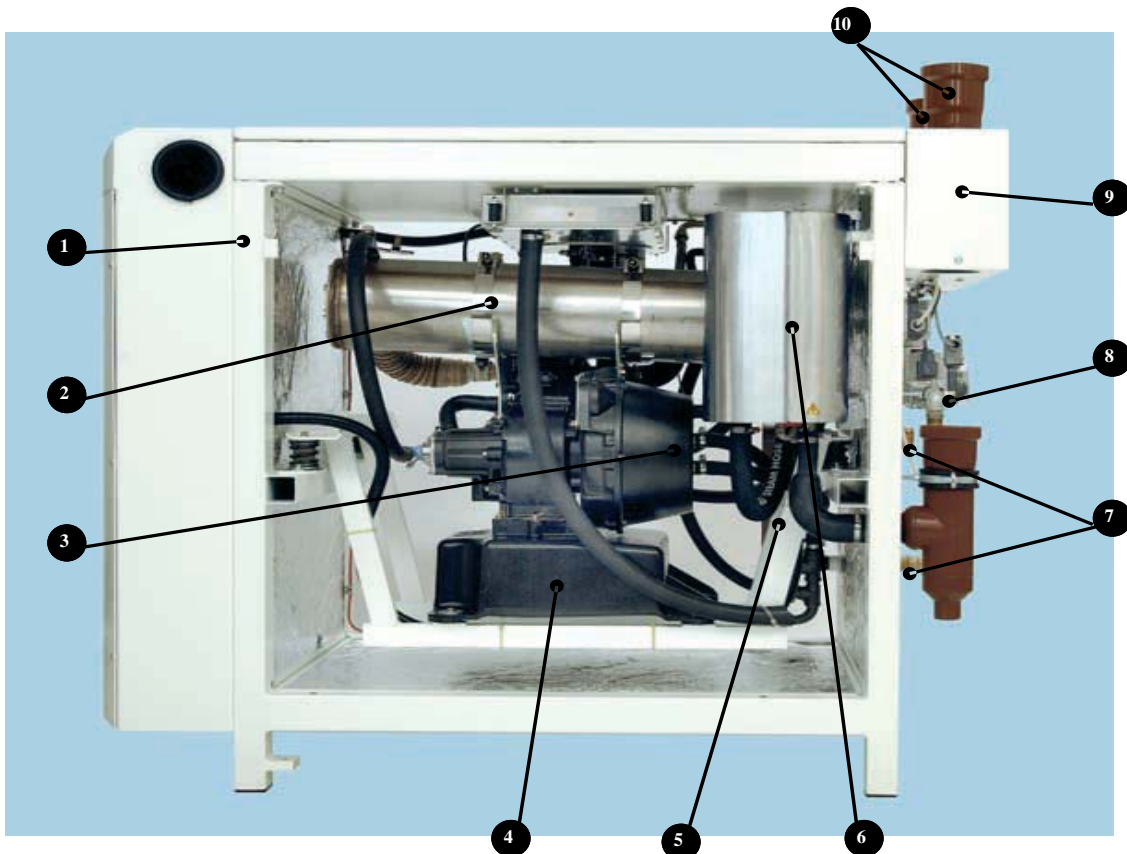


Bild 5: Ecopower e3.0 (Quelle: Ecopower)

1	Steuerschrank	6	Schalldämpfer
2	Abgaswärmeübertrager	7	Heizwasseranschlüsse
3	Generator	8	Gasanschluss
4	Motorblock	9	Elektronikanschlüsse
5	Heizungswärmeübertrager	10	Abluft/Zuluft



Tabelle 2 zeigt die vom Hersteller angegebenen Kenndaten des Mini-BHKW.

Elektrische Leistung (je nach Luftdichte und Gasqualität)	1,5 bis 3,0 kW , modulierend
Thermische Leistung	4,7 bis 8,0 kW , modulierend
Aufgenommene Leistung (Feuerungswärmeleistung)	6,9 - 10 kW
Brennstoffverbrauch	0,70 - 1.3 m³/h
Gesamtwirkungsgrad (bezogen auf den unteren Heizwert H <sub>u</sub> )	circa 90%
Stromkennzahl	0,38
Einzylinder 4-Takt-Hubkolbenmotor	272 cm³
Variable Motordrehzahl	1.400 - 2.400 U/min
Brennstoff	Erdgas (min. Methanzahl: 59)
Emmisionswerte	NOx < 50mg pro Nm³ bei 5% Sauerstoff
	CO < 115mg pro Nm³ bei 5% Sauerstoff
Abgastemperatur	< 90° C
Abgasmassenstrom	10,0 – 18,0 kg/h
Anschlussfertiger Netzparallelbetrieb	3 x 400V, 50Hz cos φ
Abmessungen	8 cm x 76 cm x 137 cm (Höhe x 9eite x Länge)
Gewicht	395 kg

Tabelle 2: Kenndaten (Quelle: ecopower)

## Hinweise zur Ausarbeitung des Hauptfachversuchs „Mini-BHKW“

Die folgenden Punkte sind in knapper Darstellung auszuarbeiten:

1. Beschreibung des Versuchs, der verwendeten Messinstrumente und deren Zweck.  
Was wurde mit welchem Ziel gemacht?
2. Führen Sie eine Gesamtbilanzierung des Mini-BHKW Systems bei den Betriebspunkten mit 1400 U/min und 2400 U/min durch.

Wie groß sind die vom BHKW abgegebenen bzw. aufgenommenen Leistungen (Feuerungswärmeleistung, elektrische Leistung, thermische Leistung)?

Berechnen Sie die Abgasverlustleistung unter Verwendung des Sauerstoff- und des Kohlenstoffdioxidanteils

Berechnen Sie die übrigen Verluste und geben Sie an, wo diese anfallen.

Beachten Sie die Genauigkeit der berechneten Werte.

3. Berechnen Sie den thermischen Wirkungsgrad, den elektrischen Wirkungsgrad, sowie den Gesamtwirkungsgrad für beide Betriebspunkte.  
Verwenden Sie hierzu jeweils Mittelwerte, die Sie aus den Messdaten errechnen.
4. Stellen Sie die Wirkungsgrade in Abhängigkeit von der Drehzahl graphisch dar.  
Diskutieren Sie die Verläufe der Kennlinien.
5. Berechnen Sie die Stromkennzahl für beide Betriebspunkte.  
Was fällt auf?