

Hauptfach- und APMB-Versuch

**Blockheizkraftwerk**





**Inhaltsverzeichnis**

<b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>	<b>III</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>1</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>1</b>
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2 GRUNDLAGEN DER KRAFT-WÄRME-KOPPLUNG .....</b>	<b>2</b>
2.1 Motivation für die Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung.....	2
2.1.1 Betriebsweise von KWK-Anlagen.....	3
2.1.2 Lastregelung.....	4
2.2 Freiheitsgrade .....	5
2.3 Systembedingte Probleme .....	5
<b>3 PHYSIKALISCHE UND THERMODYNAMISCHE GRUNDLAGEN.....</b>	<b>6</b>
3.1 Exergie bei der Wärme und Stromerzeugung.....	6
3.2 Kennzahlen.....	8
<b>4 DAS VERSUCHS-BHKW .....</b>	<b>9</b>
4.1 Maschinentechnik.....	9
4.2 Wärmetauscher.....	9
4.3 Emissionsminderung .....	10
4.4 Brennstoffversorgung.....	11
4.5 Heißwasserkreislauf .....	11
4.6 Elektrische Verbraucher.....	11
4.7 Stromversorgung .....	11
<b>5 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG .....</b>	<b>12</b>
5.1 Vorbereitungen .....	12
5.1.1 Sicherheitsvorkehrungen.....	12

5.1.2	Kühlwasserdurchfluss bestimmen.....	12
5.1.3	Starten des Motors.....	13
<b>5.2</b>	<b>Messungen .....</b>	<b>13</b>
5.2.1	Temperatur .....	13
5.2.2	Elektrische Leistung.....	14
5.2.3	Kraftstoffmenge .....	14
<b>5.3</b>	<b>Datenblatt .....</b>	<b>14</b>
<b>Messung 1.....</b>		<b>15</b>
<b>6</b>	<b>AUSWERTUNG .....</b>	<b>17</b>
6.1	Brennstoffleistung.....	17
6.2	Thermischer Wirkungsgrad.....	17
6.3	Elektrischer Wirkungsgrad .....	19
6.4	Leistungsbezogene Stromkennzahl.....	19
6.5	Leistungsbezogene Wärmekennzahl .....	19
6.6	Gesamtwirkungsgrad .....	20
6.7	Verluste.....	20
<b>Verluste im Generator .....</b>		<b>20</b>
<b>Wärmeverluste durch das Abgas.....</b>		<b>21</b>
6.8	Zusammenfassung.....	22
6.9	Stoffkennwerte: .....	22
<b>7</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>23</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Voraussichtliche Entwicklung des Strombedarfs bis 2020 [VGB].....	2
Abb. 2.2:	Funktionsschema eines BHKWs [IER Esys2].....	3
Abb. 2.3:	Möglichkeiten der Lastregelung für ein BHKW [IER Esys2].....	4
Abb. 3.1:	Warmwasserbereitung aus Brennstoffen mit hohen Exergieverlusten [VDI4608] .....	6
Abb. 3.2:	Energiefluss für gekoppelte und getrennte Wärme- / Stromerzeugung [VDI4608].....	7
Abb. 4.3:	Wärmetauscher am Zylinderkopf .....	9
Abb. 4.4:	Veränderung der Abgaszusammensetzung durch den Einsatz eines Katalysators.....	11

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Klassifizierung von KWK-Anlagen [IER Esys2].....	5
Tab. 3.1:	Kennzahlen von KWK-Anlagen [IER Esys2] .....	7



## 1 Einleitung

In einem Zeitalter das durch die Diskussion über einen steigenden Ressourcenverbrauch, geprägt ist, ist es notwendig, sich Gedanken über die Nachhaltigkeit des Einsatzes von Ressourcen zu machen. Ganz besonders vor dem Hintergrund eines wachsenden CO<sub>2</sub>- Ausstoßes und den damit verbundenen negativen Folgen.

Aktuell werden immer noch große Mengen an fossilen Energieträgern bereitgestellt und umgewandelt um den Bedarf an Energiedienstleistungen zu decken. Die Forderungen aus der Politik aber auch aus der Bevölkerung, die benötigte Endenergie wie zum Beispiel Strom und Wärme möglichst preiswert und klimaschonend zur Verfügung zu stellen, macht die Suche nach Alternativen zu dem heute bestehenden Kraftwerksmix notwendig.

Neben der Nutzung regenerativer Energien besteht auch bei einem sinnvollen Einsatz herkömmlicher Technologien die Möglichkeit der Ressourcenschonung. Eine Möglichkeit ist das Konzept der Kraft-Wärme-Kopplung. Hierbei wird nicht nur eine Energieform wie Wärme oder Strom mit maximalem Wirkungsgrad aus Energieträgern gewandelt, sondern es wird durch die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme ein möglichst hoher Gesamtwirkungsgrad angestrebt. Dieser Gesamtwirkungsgrad liegt in der Regel deutlich über dem der getrennten Erzeugung. Eine Variante der Kraft-Wärme-Kopplungs-Technologien sind Blockheizkraftwerke (BHKW), in denen mit Hilfe eines Verbrennungsmotors Kraft zur Stromerzeugung und die Motor- und Abwärme zur Nutzung für Raumheizung und Warmwassererzeugung bereitgestellt werden. Im Rahmen dieses Praktikumsversuchs soll Wissen über die grundlegenden Baugruppen, Funktionsweisen und thermodynamischen Zusammenhänge eines BKHWS vermittelt werden.

## 2 Grundlagen der Kraft-Wärme-Kopplung

### 2.1 Motivation für die Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung

Der derzeitige durchschnittliche Wirkungsgrad der deutschen Stromerzeugung liegt bei etwa 43 Prozent [UBA 2019], somit gehen fast 60% der in den Primärenergieträgern enthaltenen Energie ungenutzt als Wärme in die Umgebung verloren. Die Prognosen zeigen, dass der Strombedarf wie auch der Energiebedarf insgesamt weiter stark steigen wird, siehe Abb. 2.1.

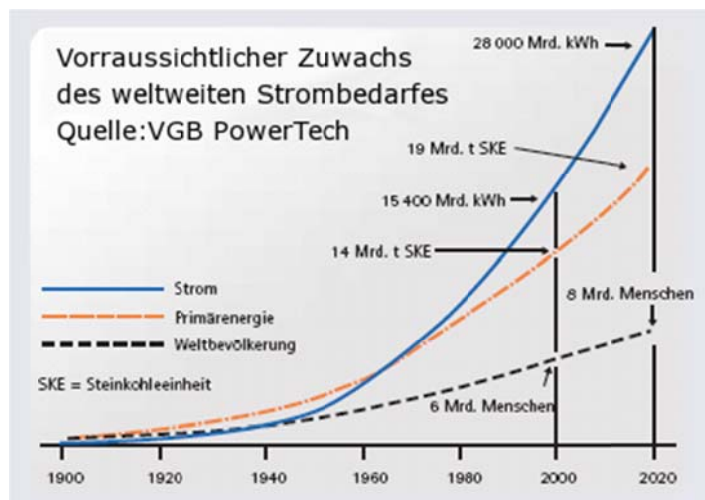


Abb. 2.1: Voraussichtliche Entwicklung des Strombedarfs bis 2020 [VGB]

Eine Möglichkeit, den weiter steigenden Energiebedarf zu decken, ist, die in den Primärenergieträgern enthaltene Energie besser zu nutzen, d.h. den Wirkungsgrad der Umwandlung zu erhöhen. Hier bietet sich das Verfahren der Kraft-Wärme-Kopplung an.

Doch was genau bedeutet Kraft-Wärme-Kopplung?

Definition: „Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist die gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme.“ [IER Esys2]

Die mechanische Energie, die vom thermodynamischen Prozess abgeführt wird, wird in der Regel direkt mit Hilfe eines Generators in elektrische Energie umgewandelt [Schmitz 1995]. Das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung beruht nun darauf, die Wärme, die als Abwärme in den Kraftwerken entsteht, als Heiz- oder Prozesswärme zu nutzen. Der Gesamtwirkungsgrad lässt sich so erheblich steigern, je nach Art der Anlage bis auf über 90% [Skript Esys2 3.2]. Beachtet werden muss dabei allerdings, dass sich dieser Vorteil nur ausnutzen lässt, wenn Wärme und Strom zeitgleich nachgefragt werden, da ansonsten der Wirkungsgrad einer KWK-Anlage drastisch sinkt. Einer der wichtigsten Punkte bei der Planung einer KWK-



Anlage ist deshalb eine sinnvolle Auslegung der Systemgröße, um eine Überdimensionierung zu vermeiden.

Dazu müssen die benötigten

- Maximalleistungen
- Ganglinien
- Nutzungsparameter (Druck, Temperatur)

genau bestimmt werden.

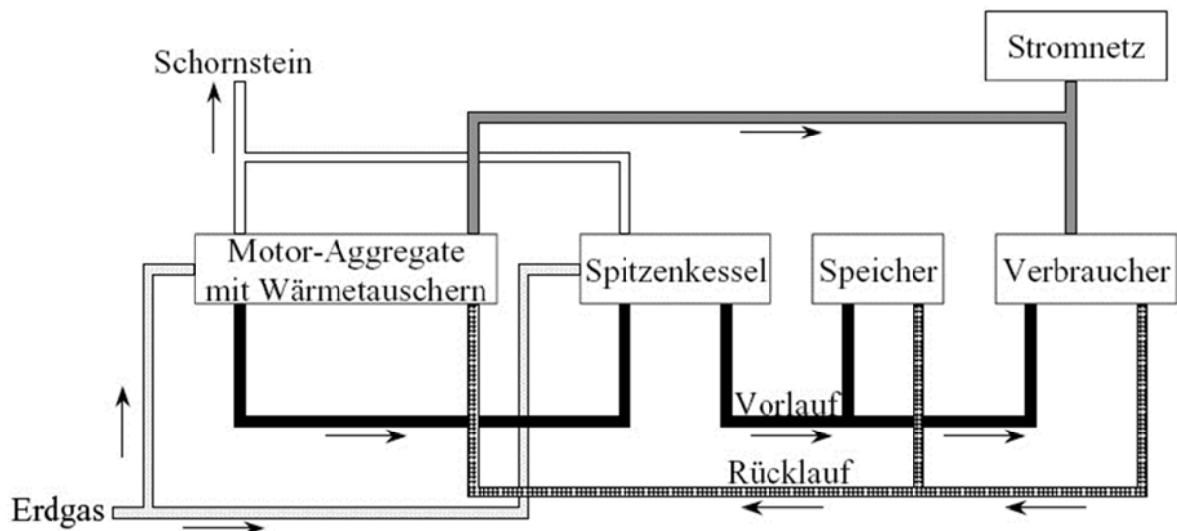


Abb. 2.2: Funktionsschema eines BHKWs [IER Esys2]

In einem BHKW, Funktionsschema siehe Abb. 2.2, wird die vom Motor bereitgestellte mechanische Energie von einem Generator in elektrische Energie umgewandelt.

Die für die Wärmebedarfsdeckung genutzte Wärme wird dem System durch Wärmetauscher entzogen, hauptsächlich dem Kühlwasser, dem Ladeluftkühler, dem Ölkühler und dem Abgas des Motors.

### 2.1.1 Betriebsweise von KWK-Anlagen

#### Stromorientierter Anlagenbetrieb

Auslegung, Auswahl und Betrieb der Anlage richten sich nach den elektrischen Bedarfswerten. Ein Wärmeüberschuss sollte vermieden werden, da er ungenutzt an die Umgebung abgeführt werden muss, was den Wirkungsgrad der Anlage senkt. Eine kurzzeitig zu geringe Wärmeleistung des Blockheizkraftwerks kann durch einen Speicher oder einen Spitzenlastkessel kompensiert werden.

## Wärmeorientierter Anlagenbetrieb

Auslegung, Auswahl und Betrieb der Anlage richten sich nach den thermischen Bedarfswerten. Eine zu hohe oder zu niedrige elektrische Leistung wird durch Einspeisung bzw. Entnahme von Strom aus dem öffentlichen Netz ausgeglichen.

Grundsätzlich gilt: Es ist eine möglichst hohe Volllaststundenzahl anzustreben, damit sich die hohen Investitionskosten schnellstmöglich amortisieren.

### 2.1.2 Lastregelung

Da die Nachfrage nach Strom und Wärme in der Regel nicht konstant ist, muss an der Anlage die Möglichkeit zur Lastregelung bestehen. Zwei unterschiedliche Verfahren finden in der Praxis Anwendung, siehe Abb. 2.3.

Beim **taktenden Betrieb** wird die Anlage entweder mit Nennlast betrieben oder abgeschaltet. Um eine kontinuierliche Versorgung der Verbraucher zu gewährleisten, muss ein Speichersystem vorhanden sein, oder Strom und Wärme müssen aus dem Netz bzw. einem Brenner bezogen werden, was jedoch die Auslastung der Anlage verringert.

Beim **gleitenden Betrieb** wird die Anlage bei geringer Nachfrage nicht mit Nennlast sondern im Teillastbereich betrieben, dies ist aber nur innerhalb bestimmter Grenzen, bei Ottomotoren bis 50% und bei Dieselmotoren bis 70% der Nennlast, möglich und wirtschaftlich sinnvoll. In jedem Fall verringert sich der Wirkungsgrad der Anlage. Für Betriebszustände außerhalb dieser Grenzen empfiehlt sich deshalb auch hier ein Speichersystem.

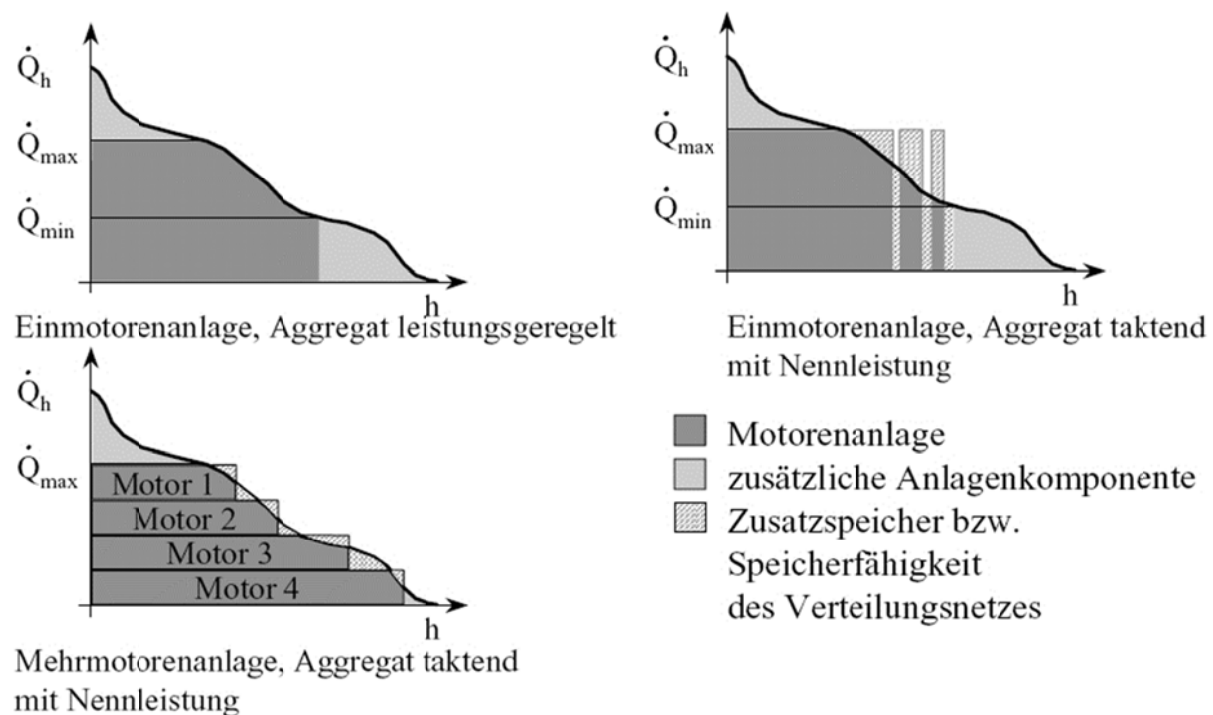


Abb. 2.3: Möglichkeiten der Lastregelung für ein BHKW [IER Esys2]

## 2.2 Freiheitsgrade

Es gibt, je nach verwendeter Technik unterschiedliche Freiheitsgrade bei den Kraft-Wärme-Kopplungstechniken, siehe Tab 2.1. Beim Freiheitsgrad 1 ist das Verhältnis von Strom- und Wärmeerzeugung in jedem Betriebszustand der Anlage annähernd gleich, was sich in konstanten Strom- und Wärmekennzahlen äußert. Ein zweiter Freiheitsgrad ist vorhanden, wenn sich nicht nur die Menge an abgegebener Wärme und Strom variieren lässt, sondern auch das Verhältnis zwischen Strom und Wärme. Dies ist dann besonders interessant, wenn eine hohe Auslastung des Kraftwerks auch in Zeiten eines Strom- oder Wärmeverbrauchsminimums gewährleistet sein soll. Systeme mit zwei Freiheitsgraden finden sich aber nur bei den Dampfkraftprozessen mit Anzapfkondensation-, Entnahmekondensation- und Entnahmegegendruck-Technik sowie bei GuD-Prozessen. Verbrennungsmotoren, wie sie in den meisten BHKWs zur Anwendung kommen, haben nur einen Freiheitsgrad, sie können jedoch zwischen Teillast und Vollast gefahren werden.

Aggregat	Prozess	Technik	Freiheitsgrad
Dampfturbine	Dampfkraftprozess	Gegendruck	1
		Anzapf-Kondensation	2
		Entnahme-Kondensation	2
		Entnahme-Gegendruck	2
Gasturbine	Gasturbinenprozess		1
Verbrennungsmotor	Diesel / Otto		1
Gas- und Dampfturbine (GuD)	Gas- und Dampfkraftprozess		2

Tab. 2.1: Klassifizierung von KWK-Anlagen [IER Esys2]

## 2.3 Systembedingte Probleme

Bei BHKWs lässt sich, wie oben erklärt, das Verhältnis zwischen abgegebenem Strom und abgegebener Wärme nicht wesentlich verändern. Dieses feste Verhältnis führt bei den jahreszeitlichen Schwankungen des Wärmebedarfs zu Problemen. Im Winter ist der Wärmebedarf durch die Raumheizung deutlich größer als im Sommer, in welchem Wärme in der Regel lediglich zur Erhitzung von Brauchwasser benötigt wird. Das BHKW wird also entweder nur für den minimalen Wärmebedarf ausgelegt und fällt deshalb sehr klein aus, wobei als Ergänzung ein relativ großer Spitzenlastkessel benötigt wird. Oder das BHKW wird größer ausgelegt und es muss eine längere Zeit im Jahr im Teillastbetrieb betrieben werden, was einen schlechteren Nutzungsgrad zur Folge hat. Bei größeren BHKW-Anlagen, die aus mehreren Modulen bestehen, wird ein Teil der Module bei Wärmebedarfsminima nicht betrieben, was wiederum die Volllaststundenzahl senkt.

### 3 Physikalische und thermodynamische Grundlagen

#### 3.1 Exergie bei der Wärme und Stromerzeugung

Exergie ist der Teil der Gesamtenergie eines Systems, der Arbeit verrichten kann, wenn er in das thermodynamische Gleichgewicht seiner Umgebung gebracht wird. Für die Exergie gilt kein Erhaltungssatz, Exergie kann nur vernichtet, nicht aber erzeugt werden.

Anergie ist der Teil der Gesamtenergie eines Systems, der keine Arbeit verrichten kann, Anergie kann im Gegensatz zur Exergie nicht vernichtet sondern nur erzeugt werden. Um den Anteil an Anergie in einem System zu verringern muss diese über die Systemgrenze aus dem System geführt werden.

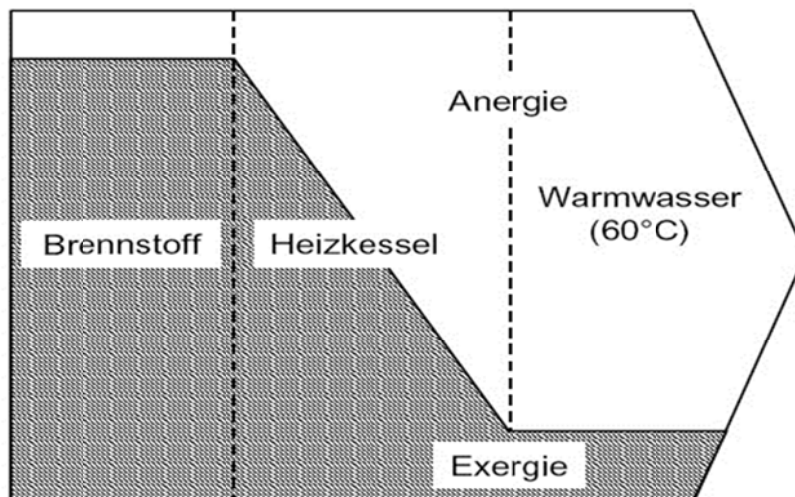


Abb. 3.1: Warmwasserbereitung aus Brennstoffen mit hohen Exergieverlusten [VDI4608]

Die Umwandlung von Energieträgern in Wärme zu Heizzwecken ist mit großen Exergieverlusten behaftet, da die Wärme nur auf einem niedrigen Temperaturniveau benötigt wird, siehe Abb. 3.1. Energetisch sinnvoll ist es einen Teil der Exergie des Brennstoffs zur Erzeugung von elektrischem Strom zu nutzen, der einen Exergiegehalt von 100% hat und die in dem thermodynamischen Prozess anfallenden Temperaturen zu Heizzwecken zu nutzen. Dies wird durch die KWK ermöglicht.

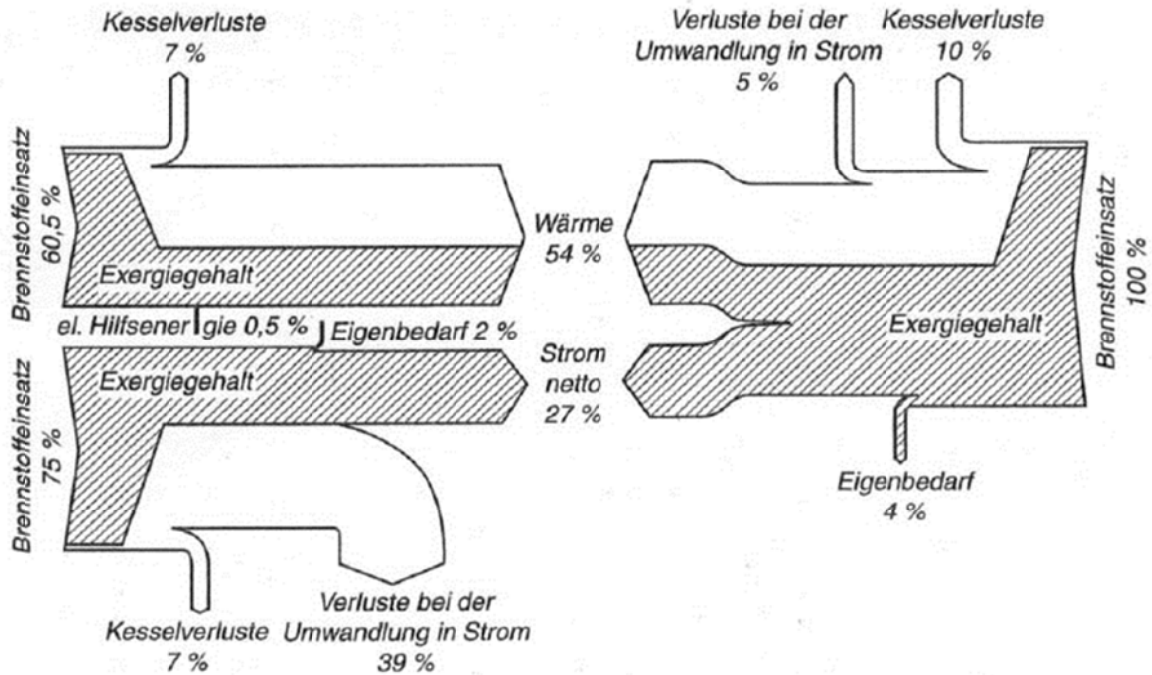


Abb. 3.2: Energiefluss für gekoppelte und getrennte Wärme- / Stromerzeugung [VDI4608]

In Abbildung 3.2 ist ein Vergleich zwischen getrennter und gekoppelter Erzeugung von Strom und Wärme grafisch dargestellt. Bei der jeweils identischen Menge an erzeugtem Strom und erzeugter Wärme ist bei der getrennten Erzeugung 35,5% mehr Brennstoff erforderlich als beim Koppelprozess.

KWK-Anlage	leistungsbezogene Stromkennzahl $s = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{Nutz}}$	elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{W}_{Br}}$	Gesamtwirkungsgrad $\eta_{ges} = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{Nutz}}{\dot{W}_{Br}}$
Blockheizkraftwerk			
-Gasmotor	0,30 bis 0,80	0,25 bis 0,35	0,80 bis 0,95
-Dieselmotor	0,60 bis 1,20	0,40 bis 0,45	0,85 bis 0,98
Gasmotor mit Abhitzenutzung	0,30 bis 0,70	0,15 bis 0,33	0,70 bis 0,85
Dampfheizkraftwerk			
-Gegendruckturbine	0,30 bis 0,60	0,20 bis 0,35	0,82 bis 0,90
-Entnahme-Kondensationsturbine	0,80 bis 2,50	0,32 bis 0,36	0,55 bis 0,65
GuD-Heizkraftwerk			
-Gegendruckturbine	0,70 bis 0,85	0,35 bis 0,40	0,80 bis 0,89
-Entnahme-Kondensationsturbine	1,50 bis 2,70	0,35 bis 0,42	0,60 bis 0,75
Brennstoffzellen	1,50 bis 6,00	0,40 bis 0,60	0,75 bis 0,83

Tab. 3.1: Kennzahlen von KWK-Anlagen [IER Esys2]

### 3.2 Kennzahlen

Die **leistungsbezogene Stromkennzahl** ist das Verhältnis von abgegebener elektrischer Leistung zu abgegebener Nutzwärmeleistung.

$$s = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{Nutz}} = \frac{1}{WZ} \quad [-] \quad (3.1)$$

Die **leistungsbezogene Wärmekennzahl** ist das Verhältnis von abgegebener Nutzwärmeleistung zu abgegebener elektrischer Leistung.

$$WZ = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{P_{el}} = \frac{1}{s} \quad [-] \quad (3.2)$$

Der **thermische Wirkungsgrad** ist das Verhältnis von abgegebener Nutzwärmeleistung zu zugeführter Brennstoffleistung.

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\dot{W}_{Br}} \quad [-] \quad (3.3)$$

Der **elektrische Wirkungsgrad** ist das Verhältnis von abgegebener elektrischer Leistung zu zugeführter Brennstoffleistung.

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{W}_{Br}} \quad [-] \quad (3.4)$$

Der **Gesamtwirkungsgrad** ist das Verhältnis von abgegebener elektrischer Leistung zuzüglich der abgegebenen Nutzwärmeleistung zu zugeführter Brennstoffleistung.

$$\eta_{ges} = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{Nutz}}{\dot{W}_{Br}} \quad [-] \quad (3.5)$$

Mit: Elektrische Nutzleistung:  $P_{el}$  [W]

Nutzwärmeleistung:  $\dot{Q}_{Nutz}$  [W]

Brennstoffleistung:  $\dot{W}_{Br}$  [W]

Gesamtwirkungsgrad:  $\eta_{ges}$  [-]

## 4 Das Versuchs-BHKW

Das für den Versuch verwendete BHKW ist ein ottomotorbetriebenes BHKW mit einem Freiheitsgrad und gleitendem Betrieb, es wird stromorientiert betrieben.

### 4.1 Maschinentechnik

#### Verbrennungsmotor

Als Motor des BHKWs dient ein 50ccm Viertakt-Ottomotor, der ursprünglich als Antrieb eines Rollers verwendet wurde, mit einer Maximalleistung von  $P_{\text{mechmax}} = 1,36 \text{ kW}$  bei 7000 U/min.

#### Generator

Als Generator wird eine dem obigen Motor zugehörige, unregelte Wechselspannungs-Lichtmaschine eingesetzt.

### 4.2 Wärmetauscher

#### Wärmetauscher motorseitig

Die Wärmetauscher, zur Entnahme der Nutzwärme sind um den Zylinder und am Zylinderkopf angeordnet, sie geben die Motorwärme an das Kühlwasser ab. Die Wärmetauscher verhindern ein Überhitzen des Motors, deshalb darf der Motor nur mit laufender Wasserpumpe betrieben werden.



Abb. 4.3: Wärmetauscher am Zylinderkopf

### Wärmetauscher verbraucherseitig

Um die ausreichende Kühlung des Motors zu gewährleisten wird die mit dem motorseitigen Wärmetauscher entzogene Wärme an einen weiteren übergeben. Mit diesem kann die vom Motor an das Wasser übertragene Wärme an die Luft abgegeben werden.

## 4.3 Emissionsminderung

### Schadstoffreduktion

Bei der Verbrennung von Kraftstoff im Motor entstehen neben  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  auch Schadstoffe, hauptsächlich unverbrannte Kohlenwasserstoffe  $\text{C}_n\text{H}_m$ , Kohlenmonoxid  $\text{CO}$ , und Stickoxide  $\text{NO}_x$ .

Da im Versuch mit einem benzinbetriebenen Ottomotor gearbeitet wird, findet die Schadstoffreduktion mittels eines kleinen Drei-Wege-Katalysators, der in den Krümmer des Abgassystems integriert ist, statt. Bei einem **Drei-Wege-Katalysator** werden  $\text{CO}$  und  $\text{C}_m\text{H}_n$  oxidiert und gleichzeitig wird  $\text{NO}_x$  reduziert, siehe Abb. 4.4. Da der stöchiometrische Luftbedarf  $L_{St}$  (d.h. das Verhältnis aus der für eine stöchiometrische Verbrennung notwendigen Luftmasse und der zugehörigen Brennstoffmasse) für Benzin  $L_{St} = 14,7 \text{ g}_{Luft} / \text{g}_{Brennstoff}$  beträgt, ist die Voraussetzung für ein effektives Funktionieren des Katalysators, dass für die Verbrennung ein Luft/Kraftstoff-Gemisch mit einer Luftzahl von  $L = L_{St} = 14,7 \text{ g}_{Luft} / \text{g}_{Brennstoff}$  eingesetzt wird. D.h. wenn das Verbrennungsluftverhältnis  $\lambda$  definiert ist als die tatsächlich zur Verfügung stehende Luftmasse im Verhältnis zur mindestens notwendigen Luftmasse für eine stöchiometrisch vollständige Verbrennung, dann muss für einen effektiven Katalysatorbetrieb  $\lambda = 1$  sein.

Dieses Verbrennungsluftverhältnis wird bei modernen Motoren durch die Messung des Sauerstoffgehalts im Abgas mit einer Lambdasonde und einer Regelung an der Kraftstoffzufuhr automatisch konstant bei  $\lambda = 1$  gehalten. In das Versuchsmodell ist keine automatische  $\lambda$ -Regelung integriert, hier erfolgt die Regelung manuell.



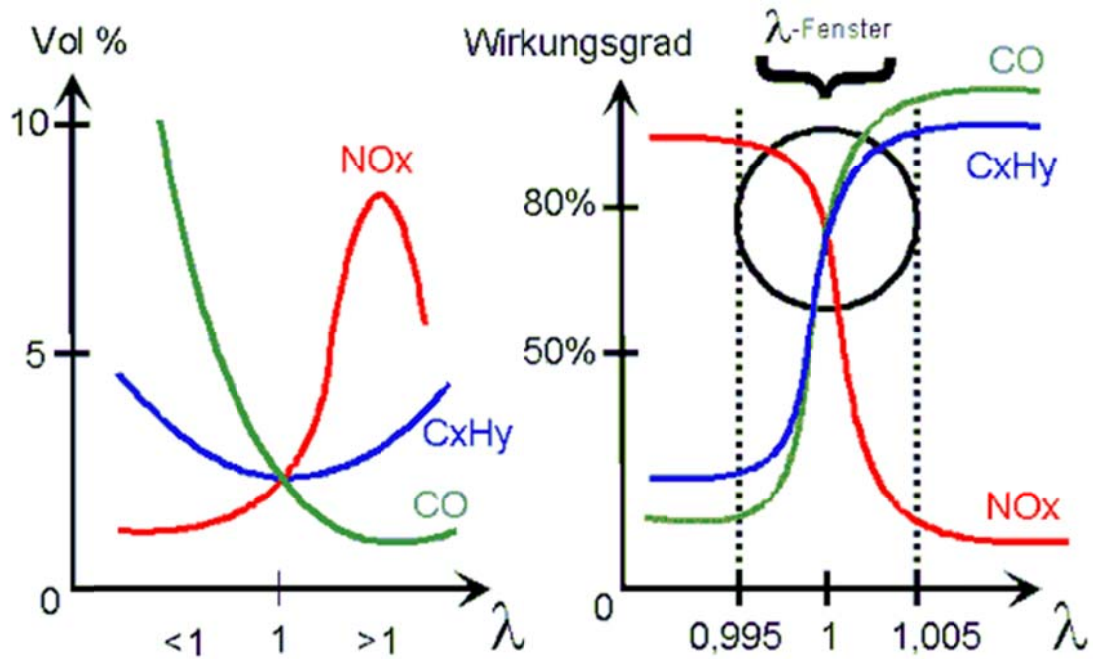


Abb. 4.4: Veränderung der Abgaszusammensetzung durch den Einsatz eines Katalysators

Ein Nachteil des Drei-Wege-Katalysators ist, dass er bei  $\lambda = 1$  betrieben werden muss, der optimale Wirkungsgrad des Motors aber bei einem leichten Luftüberschuss, bei  $\lambda = 1,1$ , liegt.

#### 4.4 Brennstoffversorgung

Der Verbrennungsmotor läuft mit Normalbenzin. Dieses wird in einem 4 Liter fassenden kraftstofffesten Kanister bevorratet und der Motor über eine Kraftstoffleitung mit integriertem Kraftstofffilter mit Benzin versorgt.

#### 4.5 Heißwasserkreislauf

Zur Aufrechterhaltung des Drucks und zur Überwindung der Reibung in den Wärmetauschern und Schläuchen steht eine 12 V Tauchpumpe mit einer Leistung von ca. 20 Watt zur Verfügung.

#### 4.6 Elektrische Verbraucher

Als elektrische Verbraucher dienen 2 Lastwiderstände mit 65 bzw. 6,5 Ohm.

#### 4.7 Stromversorgung

Zur Stromversorgung des Starters dient ein 12 V Bleigelakku. Die restlichen Verbraucher wie Lüftung, Wasserpumpe, Drehzahlmesser und die Elektronik werden aus Netzteilen gespeist.

## 5 Versuchsdurchführung

### 5.1 Vorbereitungen

#### 5.1.1 Sicherheitsvorkehrungen

##### **Achtung!**

##### **Rotierende Teile**

Prüfen Sie ob die Sicherheitsabdeckung über dem Antriebsstrang fest montiert ist. Fassen Sie nicht in den Antriebsstrang oder den Generator.

##### **Heiße Baugruppen**

Der Auspuff, der Auspuffkrümmer und der Katalysator erhitzen sich während des Versuchs stark, auch der Generator und der Motor können sich unter Last erwärmen. Berühren Sie keine heißen Teile.

##### **Brandgefahr**

Der Motor wird mit Benzin betrieben. In Kombination mit den heißen Motorteilen und den elektrischen Verbrauchern besteht Brandgefahr. Aus diesem Grund ist ein Feuerlöscher vor dem Versuch in Reichweite zu bringen und dessen Bedienung zu klären.

Der Benzinhahn ist nach Abschluss des Versuchs zu schließen.

**Bei Problemen während des Versuchs ist der Motor sofort durch das Ausschalten der Zündung am Schaltpult zu stoppen.**

Die Abgasabsaugung sowie die Kühlwasserpumpe sind während des Versuchs eingeschaltet zu lassen.

#### 5.1.2 Kühlwasserdurchfluss bestimmen

Den Wassereimer etwa bis zur Hälfte mit warmem Wasser füllen. Die Tauchpumpe an dem Ende des Schlauchs befestigen, das zum Zylinderkopf führt, danach die Pumpe und das lose Schlauchende in den Wassereimer legen. Prüfen ob der Thermostat an der Heizung auf Maximum steht. Den festen Sitz aller Schläuche am Motor und der Heizung prüfen und danach die Pumpe einschalten. Den Füllstand des Eimers mit Hilfe des Messbechers auf 4 Liter bringen, dies entspricht einer Gesamtwassermenge  $m_{\text{Vorrat}}$  von ca. 5 Litern im System. Anschlie-

ßend mit dem Messgefäß und einer Stoppuhr den Durchfluss  $\dot{m}_{\text{Heizung}}$  bestimmen. Von der thermischen Ausdehnung des Wassers während des Versuchs kann abgesehen werden.

### 5.1.3 Starten des Motors

1. Den Schlauch der Absaugung am Auspuff befestigen
2. Absaugung einschalten
3. Kühlwasserpumpe einschalten
4. Benzinhahn öffnen, Hebel in Schlauchrichtung drehen
5. Choke schließen (Hebel am Vergaser muss waagrecht stehen)
6. Zündung auf "Ein" schalten
7. Startknopf drücken und sobald der Motor läuft wieder loslassen
8. Choke nach Erwärmen des Motors öffnen (Hebel am Vergaser muss senkrecht nach unten zeigen)

## 5.2 Messungen

Eine Messung sollte mindestens 5 Minuten dauern, um eine ausreichende Genauigkeit zu erreichen. Folgende Messungen sind am Modell durchzuführen.

### 5.2.1 Temperatur

#### Kühlwasserkreislauf

Messung der Vorlauftemperatur zum Heizkörper und Messung der Rücklauftemperatur nach dem Heizkörper, sowie die Temperatur des Wassers im Vorratsbehälter. Die Temperaturen müssen jeweils am Beginn und am Ende des Versuchs bestimmt werden.

#### Abgassystem

Messung der Temperatur des Katalysators und des Auspuffkrümmers sowie Messung der Luftzahl.

### 5.2.2 Elektrische Leistung

#### Elektrische Leistung der Verbraucher

Die elektrische Leistung der Verbraucher wird mit Hilfe einer Strom- und Spannungsmessung am Generator bestimmt.

#### Elektrische Leistung der Kühlwasserpumpe

Die elektrische Leistung der Kühlwasserpumpe wird mit Hilfe einer Strom- und Spannungsmessung an der Zuleitung zur Pumpe bestimmt.

### 5.2.3 Kraftstoffmenge

Die Kraftstoffmenge wird mit Hilfe einer Waage am Beginn und am Ende des Versuchs bestimmt.

## 5.3 Datenblatt

Der Thermostat des Heizkörpers bleibt während allen Versuchen voll geöffnet und die Lüfter eingeschaltet.

An den Heizlüftern befinden sich Schalter mit denen zwischen nur Lüftung oder Heizung gewechselt werden kann.

Werte die näherungsweise als konstant angesehen werden.

Wasserpumpe		
Spannung	$U_P$ : [V]	
Strom	$I_P$ : [A]	
Wasserdurchfluss	$\dot{m}_{Heizung}$ : [g/s]	

Die Abgastemperatur und die Luftzahl hängen von der Motordrehzahl und dem Lastzustand ab. Hier werden sie nur für den Betriebszustand aus Messung 1 exemplarisch ermittelt. Die Abgastemperatur wird dabei mit der Temperatur des Auspuffkrümmers bzw. der Temperatur des Katalysators gleichgesetzt. Für die Berechnung ist die höhere Temperatur zu wählen.

<b>Abgastemperatur</b>	
Krümmmer $\theta_{\text{Krümmmer}}$ : [°C]	
Katalysator $\theta_{\text{Katalysator}}$ : [°C]	
<b>Luftzahl</b> $L$ : [ $g_{\text{Luft}}/g_{\text{Brennstoff}}$ ]	

**Messung 1**

Motordrehzahl: 3000 U/min

Elektrischer Verbraucher: 65 Ohm

		Versuchsbeginn	Versuchsende
<b>Wassertemperatur</b>			
Vorlauf $\theta_{\text{Vorlauf1}}$ : [°C]			
Rücklauf $\theta_{\text{Rücklauf1}}$ : [°C]			
Vorratsbehälter $\theta_{\text{Vorrat1}}$ : [°C]			
<b>Generator</b>			
Spannung $U_{G1}$ : [V]			
Strom $I_{G1}$ : [A]			
<b>Kraftstoffmenge</b> $m_{K1}$ : [g]			
<b>Versuchsdauer</b> $t_1$ : [s]			

**Messung 2**

Motordrehzahl: 5000 U/min

Elektrischer Verbraucher: 65 Ohm

		Versuchsbeginn	Versuchsende
<b>Wassertemperatur</b>			
Vorlauf $\theta_{\text{Vorlauf2}}$ : [°C]			
Rücklauf $\theta_{\text{Rücklauf2}}$ : [°C]			
Vorratsbehälter $\theta_{\text{Vorrat2}}$ : [°C]			
<b>Generator</b>			
Spannung $U_{G2}$ : [V]			
Strom $I_{G2}$ : [A]			
<b>Kraftstoffmenge</b> $m_{K2}$ : [g]			
<b>Versuchsdauer</b> $t_2$ : [s]			

**Messung 3**

Motordrehzahl: 5000 U/min

Elektrischer Verbraucher: 6,5 Ohm

		Versuchsbeginn	Versuchsende
<b>Wassertemperatur</b>			
Vorlauf	$\theta_{\text{Vorlauf3}}$ : [°C]		
Rücklauf	$\theta_{\text{Rücklauf3}}$ : [°C]		
Vorratsbehälter	$\theta_{\text{Vorrat3}}$ : [°C]		
<b>Generator</b>			
Spannung	$U_{G3}$ : [V]		
Strom	$I_{G3}$ : [A]		
<b>Kraftstoffmenge</b>	$m_{K3}$ : [g]		
<b>Versuchsdauer</b>	$t_3$ : [s]		

## 6 Auswertung

Für den Auswertungsteil des Praktikums werden 3 Gruppen gebildet, wobei jede Gruppe eine Messung auswertet. Im Anschluss an die Auswertung werden die Ergebnisse der eigenen Gruppe, im Rahmen einer kurzen Präsentation, mit denen der anderen Gruppen verglichen und diskutiert.

### 6.1 Brennstoffleistung

Die Brennstoffleistung  $\dot{W}_{Br}$  berechnet sich aus dem Brennstoffmassenstrom und dem spezifischen unteren Heizwert des Kraftstoffs.

$$\dot{W}_{Br}[W] = \frac{(m_{Br.Beginn}[g] - m_{Br.Ende}[g])}{t[s]} \cdot H_u \left[ \frac{J}{g} \right] \quad (6.1)$$

mit dem unteren Heizwert von Benzin  $H_u = 43,6 \cdot 10^3 \frac{J}{g}$

$$\dot{W}_{Br}[W] =$$

### 6.2 Thermischer Wirkungsgrad

Bei der Temperaturmessung treten systembedingte Fehler auf. Neben dem Wärmeüberträgermedium wird auch die Heizung erwärmt. Außerdem wird Wärme nach außen nicht nur kontrolliert durch den Heizkörper abgeführt, sondern auch durch die Schläuche und den nicht isolierten Vorratsbehälter. Diese Verluste werden jedoch im Folgenden vernachlässigt.

Die Wärmezufuhr durch die elektrische Leistung der Wasserpumpe muss berücksichtigt werden, da der Strom für ihren Betrieb nicht mit dem BHKW erzeugt sondern von außen zugeführt wird.

Die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf ändert sich während der Messung. Es wird von einer linearen Änderung ausgegangen und deshalb zur Berechnung die durchschnittliche Temperaturdifferenz verwendet.

Der Wärmeeintrag  $\dot{Q}_{Pzu}$  durch die Wasserpumpe, die mit Netzstrom angetrieben wird, beträgt, :

$$\dot{Q}_{Pzu}[W] = U_p[V] \cdot I_p[A] \quad (6.2)$$

$$\dot{Q}_{Pzu}[W] =$$

Der Wärmestrom  $\dot{Q}_{Vorrat}$ , der in den Wasservorrat fließt und sich dort durch eine Temperatur Erhöhung bemerkbar macht, lässt sich wie folgt berechnen.

$$\dot{Q}_{Vorrat} [W] = \frac{m_{Vorrat} [g] \cdot c_{Wasser} \left[ \frac{J}{g \cdot K} \right] \cdot \Delta \theta_{Vorrat} [K]}{t [s]} \quad (6.3)$$

$\Delta \theta_{Vorrat}$  ist hierbei die Differenz der Wasservorrats-temperatur zwischen Versuchsbeginn und Versuchsende in Kelvin.

$$\dot{Q}_{Vorrat} [W] =$$

der Wärmestrom  $\dot{Q}_{Heizung}$ , der in das Wasser fließt und durch den Heizkörper aus dem System geführt wird, berechnet sich zu:

$$\dot{Q}_{Heizung} [W] = \dot{m}_{Heizung} \left[ \frac{g}{s} \right] \cdot c_{Wasser} \left[ \frac{J}{g \cdot K} \right] \cdot (\theta_{Vorlauf} - \theta_{Rücklauf}) [K] \quad (6.4)$$

$(\theta_{Vorlauf} - \theta_{Rücklauf})$  ist hierbei die mittlere Differenztemperatur zwischen Vor- und Rücklauf, also

$$(\theta_{Vorlauf} - \theta_{Rücklauf}) [K] = \frac{(\theta_{VorlaufBeginn} - \theta_{RücklaufBeginn}) [K] + (\theta_{VorlaufEnde} - \theta_{RücklaufEnde}) [K]}{2} \quad (6.5)$$

und somit

$$\dot{Q}_{Heizung} [W] =$$

Der Gesamtwärmeeintrag  $\dot{Q}_{zu}$  in das Wärmeüberträgermedium ergibt sich dann aus der Summe:

$$\dot{Q}_{zu} [W] = \dot{Q}_{Vorrat} [W] + \dot{Q}_{Heizung} [W] \quad (6.6)$$

$$\dot{Q}_{zu} [W] =$$

Der vom Motor abgegebene Nutzwärmestrom  $\dot{Q}_{Nutz}$  ist dann:

$$\dot{Q}_{Nutz} [W] = \dot{Q}_{zu} [W] - \dot{Q}_{Pzu} [W] \quad (6.3)$$

$$\dot{Q}_{Nutz} [W] =$$



Der thermische Wirkungsgrad der Anlage ist dann:

$$\eta_{th}[-] = \frac{\dot{Q}_{Nutz}[W]}{\dot{W}_{Br}[W]} \quad (6.4)$$

$$\eta_{th}[-] =$$

### 6.3 Elektrischer Wirkungsgrad

Die abgegebene elektrische Leistung  $P_{el}$  berechnet sich aus der durchschnittlich vom Generator erzeugten Spannung und dem durchschnittlichen Strom.

$$P_{el}[W] = U_G[V] \cdot I_G[A] \quad (6.5)$$

$$P_{el}[W] =$$

und damit ein elektrischer Wirkungsgrad  $\eta_{el}$  von

$$\eta_{el}[-] = \frac{P_{el}[W]}{\dot{W}_{Br}[W]} \quad (6.6)$$

$$\eta_{el}[-] =$$

### 6.4 Leistungsbezogene Stromkennzahl

Als leistungsbezogene Stromkennzahl  $s$  ergibt sich:

$$s[-] = \frac{P_{el}[W]}{\dot{Q}_{Nutz}[W]} = \frac{1}{WZ[-]} \quad (6.7)$$

$$s[-] =$$

### 6.5 Leistungsbezogene Wärmekennzahl

Als leistungsbezogene Wärmekennzahl  $WZ$  ergibt sich:

$$WZ[-] = \frac{\dot{Q}_{Nutz}[W]}{P_{el}[W]} = \frac{1}{s[-]} \quad (6.8)$$

$$WZ[-] =$$

## 6.6 Gesamtwirkungsgrad

Als Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{ges}$  ergibt sich:

$$\eta_{ges} [-] = \frac{\dot{Q}_{Nutz} [W] + P_{el} [W]}{\dot{W}_{Br} [W]} \quad (6.9)$$

$$\eta_{ges} [-] =$$

## 6.7 Verluste

Verluste treten hauptsächlich in drei Bereichen auf:

- Im Verbrennungsmotor als mechanische Verluste
- Im Generator als mechanische und elektrische Verluste
- Im Abgassystem als Wärmeverlust

Diese Verluste sollen hier näherungsweise berechnet werden.

Ausgehend von der abgegebenen elektrischen Leistung des Generators wird mit dem Wirkungsgrad des Generators die abgegebene mechanische Leistung des Motors ermittelt. Aus der mechanischen Leistung des Motors und der Brennstoffleistung kann der Wirkungsgrad des Motors berechnet werden.

Die Wärmeverluste durch das Abgas sind Teil der Verluste, die durch die Wandlung der im Kraftstoff gespeicherten chemischen Energie in mechanische Energie entstehen. Sie werden mit Hilfe der Abgastemperatur und dem Abgasmassenstrom bestimmt.

### Verluste im Generator

Der Wirkungsgrad des Generators beträgt etwa 65%. Die Verlustleistung im Generator beläuft sich also auf:

$$P_{VerlustGen} [W] = \frac{0,35}{0,65} \cdot P_{el} [W] \quad (6.10)$$

$$P_{VerlustGen} [W] =$$

Die vom Motor abgegebene mechanische Leistung ist somit:

$$P_{mechMotor} [W] = \frac{P_{el} [W]}{0,65} \quad (6.11)$$

$$P_{mechMotor} [W] =$$

### Verluste im Motor

Der mechanische Wirkungsgrad des Motors ist somit:

$$\eta_{mechMotor} [-] = \frac{P_{mechMotor} [W]}{\dot{W}_{Br} [W]} \quad (6.12)$$

$$\eta_{mechMotor} [-] =$$

Die Verlustleistung des Motors ist dann:

$$P_{VerlustMotor} [W] = \frac{1 - \eta_{mechMotor} [-]}{\eta_{mechMotor} [-]} P_{mechMotor} [W] \quad (6.13)$$

$$P_{VerlustMotor} [W] =$$

### Wärmeverluste durch das Abgas

Eine Möglichkeit den thermischen Wirkungsgrad des BHKWs weiter zu erhöhen, ist die Nutzung der im Abgasstrom enthaltenen Wärme. Um die Wärme, die mit dem Abgas ungenutzt das System verlässt, abschätzen zu können, wird der Abgasmassenstrom sowie die Abgastemperatur bestimmt. Der Abgasmassenstrom berechnet sich zu:

$$\dot{m}_{Abgas} \left[ \frac{g}{s} \right] = \dot{m}_{Kraftstoff} \left[ \frac{g}{s} \right] + \dot{m}_{Luft} \left[ \frac{g}{s} \right] \quad (6.14)$$

$$\dot{m}_{Luft} \left[ \frac{g}{s} \right] = \dot{m}_{Kraftstoff} \left[ \frac{g}{s} \right] \cdot L \left[ \frac{g_{Luft}}{g_{Kraftstoff}} \right] \quad (6.15)$$

$$\dot{m}_{Abgas} \left[ \frac{g}{s} \right] =$$

Falls das Abgas bis auf eine Temperatur kurz vor die Kondensationstemperatur des im Abgas enthaltenen Wassers von 100 °C abgekühlt wird, errechnet sich der Wärmeverlust, mit einer

Wärmekapazität des Abgases von ca.  $c_{Abgas} = 1,2 \frac{J}{g \cdot K}$ , näherungsweise zu:

$$\dot{Q}_{VerlustAbgas} [W] = \dot{m}_{Abgas} \left[ \frac{g}{s} \right] \cdot c_{Abgas} \left[ \frac{J}{g \cdot K} \right] \cdot (T_{Abgas} [^{\circ}C] - 100^{\circ}C) \cdot 1 \frac{[K]}{[^{\circ}C]} \quad (6.16)$$

$$\dot{Q}_{VerlustAbgas} [W] =$$

## 6.8 Zusammenfassung

	Messung 1	Messung 2	Messung 3
	el. Last 65 Ohm, 3.000 U/min	el. Last 65 Ohm, 5.000 U/min	el. Last 6,5 Ohm, 5.000 U/min
$\dot{W}_{Br} [W] =$			
$\dot{Q}_{Nutz} [W] =$			
$\eta_{th} [\%] =$			
$P_{el} [W] =$			
$\eta_{el} [\%] =$			
$s [-] =$			
$\eta_{ges} [\%] =$			
$P_{VerlustGen} [W] =$			
$P_{mechMotor} [W] =$			
$P_{VerlustMotor} [W] =$			
$\dot{Q}_{VerlustAbgas} [W] =$			

## 6.9 Stoffkennwerte:

Unterer Heizwert Benzin  $H_u = 43,6 \cdot 10^3 \frac{J}{g}$

Wärmekapazität Wasser  $c_{Wasser} = 4,183 \frac{J}{g \cdot K}$

Wärmekapazität Abgas  $c_{Abgas} = 1,2 \frac{J}{g \cdot K}$

## 7 Literaturverzeichnis

**/Baehr 2002/**

**Thermodynamik** / Baehr 2002, 11. Auflage, Springer, Berlin, ISBN 3540238700

**/UBA 2019/**

**Umweltbundesamt: Konventionelle Kraftwerke und erneuerbare Energien**

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/konventionelle-kraftwerke-erneuerbare-energien#textpart-5>

abgerufen am 09.05.2019

**/IER Esys2/**

**Skript zur Vorlesung Energiesysteme 2** / Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Uni Stuttgart, Stand 2006

**/Fechter 1984/**

**Energetische und exergetische Untersuchungen an einem Blockheizkraftwerk** / Leonhard Fechter 1984 - Berlin, Techn. Univ., Diss., 1984

**/Hahne 2000/**

**Technische Thermodynamik** / Erich Hahne 2000 - 3., überarb. Aufl. München: Oldenbourg, ISBN 3-486-25397-2

**/KWK Gesetz 2002/**

**Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung**

Datum: 19. März 2002

Fundstelle: BGBl I 2002, 1092

Textnachweis ab: 1. 4.2002

Das Gesetz tritt gem. u. nach Maßgabe d. § 13 Abs. 2 am 31.12.2010 außer Kraft.

**/Kriese 1971/**

**Exergie in der Kraftwerkstechnik** Leistungsreaktoren, Dampfkraftwerke, Gasturbinen, Wärme-Kraft-Kopplung / Siegfried Kriese 1971 - Essen : Classen. ISBN 3-8027-2473-9

**/Schmitz 1995/**

**Kraft-Wärme-Kopplung** Anlagenauswahl - Dimensionierung - Wirtschaftlichkeit - Emissionsbilanz / Karl W. Schmitz ; Günter Koch 1995. - Düsseldorf : VDI-Verl., ISBN 3-18-401355-3

**/Sperlich 2002/**

**Übungsaufgaben zur Thermodynamik mit Mathcad** / Volker Sperlich 2002 - Fachbuchverlag Leipzig, ISBN 3-446-21603-0

**/Przychowski 2000/**

**Skript Lambda-Anzeige** / Michael Dunin v. Przychowski 2000

<http://www.taunus-biker.de/~mdvp/Lambda/Lambda.html> aufgerufen am 03.04.2007

**/VDI 4608/**

**VDI-Richtlinie 4608** / VDI-Richtlinie zur Kraft-Wärme-Kopplung

**/VGB/**

**VGB PowerTech** e. V. / Europäischer Fachverband der Strom- und Wärmeerzeuger.

[www.vgb.org](http://www.vgb.org) aufgerufen am 14.05.2007