

Diplomarbeit

Wirtschaftliche Systemoptimierung der bestehenden Heizungsanlage der
Kaserne Marienberg inklusive Untersuchung des Einsatzes erneuerbarer
Energien

Vorgelegt am: 18.08.2008

Von: **René Jakob**
Untere Angerstraße 36
09394 Hohndorf

Studienrichtung/
Studiengang: Versorgungs- und Umwelttechnik/
Technische Gebäudesysteme

Seminargruppe: VU 05/2

Matrikelnummer: 4050497

Praxispartner: Ingenieurbüro Prof. Dr. Scheibe
Heizung Lüftung Klima Sanitär
Waldblick 30
09131 Chemnitz

Gutachter: Prof. Dr. Scheibe (Ingenieurbüro Prof. Dr. Scheibe)
Dipl. Ing. Tiator (Staatliche Studienakademie Glauchau)

Inhaltsverzeichnis

1.	Projekterläuterungen.....	1
1.1	Allgemeine Berechnungen	3
2.2	Energiepreise Kaserne Marienberg.....	4
2.	Begriffe / Grundlagen.....	5
2.1	Begriffe	5
2.2	Brennstoff Erdgas	7
3.	Förderungen / Vergütungen.....	9
3.1	Förderungen Gas-Wärmepumpen	9
3.2	Ökosteuern.....	9
3.3	Neues KWK-Gesetz 2008	10
3.4	Förderung BHKW	10
3.5	Einspeisevergütung.....	11
4.	Systemvarianten	12
4.1	Gasmotorwärmepumpen (Variante 1)	12
4.1.1	Einsatz von Gasmotorwärmepumpen in Marienberg.....	14
4.1.2	Auslegung Variante 1	15
4.2	Gasbetriebene Absorptionswärmepumpen (Variante 2).....	18
4.2.1	Gas-Absorptionswärmepumpen in Marienberg	20
4.2.2	Ausblick.....	20
4.3	BHKW + warmwasserbetriebene Absorptions-WP (Variante 3)	21
4.4	BHKW + Kompressionswärmepumpe (Variante 4)	22
4.4.1	Einsatz des Wärmetrans in Marienberg	23
4.4.2	Auslegung Variante 4	24
4.5	BHKW ohne Wärmepumpe (Variante 5)	30
4.5.1	Einsatz in Marienberg.....	30
4.5.2	Auslegung Variante 5.....	31

5.	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	39
5.1	Begriffe Wirtschaftlichkeit	41
5.2	Investitionskosten.....	42
5.3	überschlägige Amortisationsberechnungen	43
5.4	Begriffe und Formeln - Annuitätsberechnungen.....	44
5.5	Annuitätsberechnungen	46
5.5.1	Gasmotorwärmepumpe.....	47
5.5.2	Wärmetransbaustein	49
5.5.3	BHKW	51
5.6	Auswertung nach Kosten	54
5.7	Auswertung nach ökologischen Gesichtspunkten	54
6.	Schlussbetrachtungen	57
6.1	Auswertung der Ergebnisse	57
6.2	Auswahl der Vorzugsvariante.....	59

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abb. 1: Größte Erdgasförderer weltweit	8
Abb. 2: Preisentwicklung Baseload-Strom	11
Abb. 3: Schema einer Gasmotor-Wärmepumpe.....	13
Abb. 4: Schema einer Gas-Absorptionswärmepumpe.....	19
Abb. 5: Kraft-Wärme-Kopplung im Vergleich mit getrennter Energieumwandlung	34
Abb. 6: Vergleich der Reduzierung der CO ₂ -Emissionen	57
Abb. 7: Variantenvergleich	58
Abb. 8: Vergleich der Gesamtannuität.....	59
 Tab. 1: Zusammenstellung der Ergebnisse	 53

Abkürzungsverzeichnis

a	- anno (Jahr)
ASUE	- Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.
BAFA	- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
Bh	- Betriebsstunden
BHKW	- Blockheizkraftwerk
bzw.	- beziehungsweise
COP	- coefficient of performance
EEG	- Gesetz zur Neuregelung des Rechts der erneuerbaren Energien im Strombereich
EEX	- European Energy Exchange AG
EVU	- Energieversorgungsunternehmen
Gl.	- Gleichung
GMWP	- Gasmotorwärmepumpe
KWK	- Kraft-Wärme-Kopplung
lt.	- laut
Std.	- Stunden
Vbh	- Vollbenutzungsstunden
WP	- Wärmepumpe
WT	- Wärmetauscher
WTrans	- Wärmetransbaustein
z.B.	- zum Beispiel

Kurzzeichenverzeichnis

a	- Annuitätsfaktor
A_0	- Investitionskosten [€]
$A_{B, Bed}$	- Annuität für Bedienung [€/a]
$A_{B, BrSt}$	- Annuität der Brennstoffkosten [€/a]
$A_{B, Wart}$	- Annuität für Wartung [€/a]
$A_{N, B}$	- Annuität der betriebsgebundenen Kosten [€/a]
$A_{N, E}$	- Annuität der Einnahmen [€/a]
$A_{N, Ges}$	- Gesamtannuität [€/a]
b	- Barwertfaktor
ba	- preisdynamischer Annuitätsfaktor
$B_{E, BrSt}$	- Brennstoffenergiebedarf [kWh/a]
B_{RW}	- Barwert des Restwertes [€]
E	- Einsparungen [€/a]
E_{BrSt}	- Einsparungen durch Brennstoffeinsparungen [€/a]
E_E	- Einsparungen durch Einspeisung [€/a]
E_{ges}	- Gesamteinsparungen [€/a]
E_{KWK}	- Einsparungen durch KWK-Bonus [€/a]
$E_{KWK, anteilig}$	- Einsparungen durch KWK-Bonus, bezogen auf Nutzungsdauer [€/a]
E_M	- Einsparungen durch Mineralölsteuer [€/a]
E_S	- Einsparungen durch selbstverbrauchten Strom [€/a]
E_W	- Einsparungen durch Eigennutzung der Wärme [€/a]
f_K	- Instandsetzungsfaktor [%]
H_i	- Heizwert [kWh/m³]
i	- Zinssatz [%]
j	- Preisänderungssatz [%]
k_{el}	- Kosten - Netzbezug Elektroenergie [€/kWh]
k_{Gas}	- Kosten Gasbezug [€/kWh]

k_{Wart}	- Wartungskosten [€/kWh]
$k_{W, HK}$	- Wärmepreis Heizkessel [€/kWh]
P_{el}	- elektrische Leistung [kW]
q	- Zinsfaktor
Q_{ab}	- abgegebene Wärmemenge [kWh/a]
$\dot{Q}_{Absorber}$	- abgegebene Wärmeleistung am Absorber [kW]
$\dot{Q}_{Austreiber}$	- benötigte Wärmeleistung für Austreibevorgang [kW]
\dot{Q}_{BHKW}	- thermische Leistung BHKW [kW]
\dot{Q}_{BrSt}	- Brennstoffverbrauch [kW]
\dot{Q}_C	- abgegebene Wärmeleistung am Verflüssiger [kW]
\dot{Q}_{ges}	- Gesamtwärmeleistung [kW]
Q_{ges}	- Gesamtwärmebedarf [kWh/a]
\dot{Q}_{HK}	- thermische Leistung Heizkessel [kW]
\dot{Q}_{WP}	- thermische Leistung der Wärmepumpe [kW]
r	- Preisänderungsfaktor
T	- Betrachtungszeitraum [a]
t_{Bed}	- Bedienzeit [h/a]
t_{Bh}	- Betriebsstunden pro Jahr [h/a]
T_N	- Nutzungsdauer [a]
t_{Wart}	- Wartungszeit [h/a]
W_{el}	- elektrische Energie [kWh/a]
β	- Arbeitszahl
φ	- Heizzahl
η_{el}	- Wirkungsgrad elektrisch [%]
η_{ges}	- Gesamtwirkungsgrad [%]
η_{HK}	- Wirkungsgrad Heizkessel
η_{th}	- Wirkungsgrad thermisch [%]
ζ	- Wärmeverhältnis

- Leerseite -

1. Projekterläuterungen

Auf Grund der ständig steigenden Betriebskosten in der Wärmeerzeugung der Kaserne in Marienberg ist zu überprüfen, ob eine eventuelle Systemumstellung möglich bzw. wirtschaftlich realisierbar ist. Dazu sollen verschiedene Systemvariationen entwickelt und anschließend miteinander verglichen werden.

Die dabei zu betrachtende Anlage besteht aus drei Standard-Heizkesseln der Firma Weißbach mit Anschlussleistungen von 1,2 MW, 1,7 MW und 2,4 MW, die über Gasbrenner mit Gebläse betrieben werden. Die Rauchgasabführung erfolgt über eine freistehende, wärmegedämmte 3- zügige Schornsteinanlage in Ganzstahlkonstruktion.¹ Dabei werden laut Betreiber Abgastemperaturen von 100°C bis 150°C erreicht. Die Rücklauftemperatur muss laut Hersteller 70°C betragen, wodurch ein Teil der Kesselleistung zur Rücklauftemperaturanhebung benötigt wird. Die realen Rücklauftemperaturen betragen laut Betreiber im Winter durchschnittlich 45°C. Der Teil der Kesselleistung zur Rücklauftemperaturanhebung beträgt in etwa 25%.

Die Wärmeversorgung der Kaserne wird durch ein eigenes Fernheiznetz realisiert, welches in zwei Zonen untergliedert ist. Die erste Zone wird direkt über die Wärmeerzeugeranlage betrieben. Zone zwei wird über Wärmetauscher versorgt. Die Untergliederung in zwei Zonen resultiert aus dem sehr stark fallenden und steigenden Gelände. Die Trinkwarmwasserbereitung erfolgt dabei teilzentral.

Zur Systemoptimierung soll nur die Heizzentrale betrachtet werden, das weiterführende Netz bleibt dabei unbeachtet.

Die verschiedenen Optimierungskonzepte sehen dabei die Einsparung des 1,7 MW Kessels vor. Da bei der Planung der Einsatz von alternativen Energiesystemen und eine daraus folgende maximale Primärenergieausnutzung angestrebt werden, wird der Einsatz von Wärmepumpen untersucht. Als Wärmequelle dieser Anlagen sollen sowohl die Abgaswärme der Heizkessel, als auch Außenluft genutzt werden. Die gesamte Anlage wird dabei so konzipiert, dass der Betrieb der Heizkessel nur in den Wintermonaten erforderlich wird. Die Alternativanlage soll demnach die Grundlastversorgung während des gesamten Jahres gewährleisten.

¹ vgl. Anlage 1

Der Grundlastbedarf beträgt laut Betreiber 400-500 kW. Zu Spitzenlastzeiten werden zwischen 1,5 und 3,0 MW Heizleistung benötigt. Um eine gewisse Sicherheit zu gewährleisten wird die Alternativanlage mit einem Zuschlag von 20% versehen und somit auf etwa 600 kW ausgelegt.

Weiterhin soll überprüft werden, ob durch die neue Anlagenkomponente die in der Kaserne installierte, teilzentrale Warmwassererzeugung versorgt werden kann.

Um den vorhandenen Gasanschluss nutzen zu können und den benötigten Anlagenaufwand so gering wie möglich zu halten wird in erster Linie der Einsatz von gasbetriebenen Wärmepumpen analysiert. Diese können als Gasmotorwärmepumpen oder als gasbetriebene Absorptionswärmepumpe ausgeführt sein. Durch die Nutzung kostenloser Ab- bzw. Umweltwärme wird der benötigte Primärenergieeinsatz im Vergleich zu der bestehenden Kesselanlage wesentlich reduziert. Im Vergleich zu strombetriebenen Wärmepumpen wird der benötigte Bezug von Elektroenergie minimiert. Ein weiterer Vorteil ist die Nutzung der Gasmotorabwärme, wodurch höhere Wirkungsgrade erzielt werden können. Durch den Einsatz von Wärmepumpen kann ebenfalls die CO₂-Emission im Vergleich zur Bestandsanlage reduziert werden.

Eine weitere Systemvariante sieht eine Kombination einer Absorptionswärmepumpe mit einem BHKW (Blockheizkraftwerk) vor.

Lediglich als Vergleichsvariante wird die Kombination aus BHKW und strombetriebener Kompressionswärmepumpe betrachtet, der so genannte Wärmetransbaustein.

Ziel dieser Erarbeitung ist es, eine wirtschaftliche Systemvariante zur bestehenden Anlage zu ermitteln. Dabei wird der mögliche Einsatz von alternativen Energiesystemen analysiert. Es werden die verschiedenen Konzepte erarbeitet, erläutert und gegebenenfalls ausgelegt, wenn ein sinnvoller Einsatz möglich ist. Anschließend erfolgen die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der verschiedenen Konzepte sowie die Auswahl der Vorzugsvariante.

1.1 Allgemeine Berechnungen

Es wird vorgesehen, den mittleren Kessel (1,7 MW) entfallen zu lassen. Weiterhin werden 25% der Kesselleistung zur Rücklauf temperaturanhebung benötigt. Die jeweilige Alternative zum Bestandskessel wird mit ca. 600 kW ausgelegt, was der Grundlast des gesamten Jahres entspricht.

Wärmeleistung Heizkessel:

$$\dot{Q} = 0,75 \times (2,4 \text{ MW} + 1,2 \text{ MW}) = 2,7 \text{ MW} \quad (1)$$

zuzüglich Alternative zur Grundlastdeckung:

$$\dot{Q} = 2,7 \text{ MW} + 0,6 \text{ MW} = 3,3 \text{ MW} \quad (2)$$

Die nun vorhandene Wärmeleistung, abzüglich der Leistung zur Rücklauf temperaturanhebung, beträgt demnach 3,3 MW. Die maximal benötigte Wärmeleistung laut Betreiber beträgt 3,0 MW. Das entspricht einem Sicherheitszuschlag von 10%. Würde stattdessen der 2,4 MW Kessel entfallen, wäre die mögliche Maximalleistung von 3 MW nicht mehr realisierbar.

Laut Betreiber liegt der jährliche Wärmebedarf bei ca. 5.000 MWh. Um die verschiedenen Varianten untereinander vergleichen zu können, wird eine einheitliche, maximale Deckung des Jahreswärmebedarfs von 75% angenommen.

$$Q = 5.000 \text{ MWh} / a \times 0,75 = 3.750 \text{ MWh} / a \quad (3)$$

Daraus resultieren unterschiedliche Betriebsstunden pro Jahr, auf Grund unterschiedlicher Maximalleistungen der verschiedenen Varianten.

Der Strombedarf des Heizhauses liegt bei etwa 35 MWh/a und der gesamten Kaserne bei etwa 1.200 MWh/a. Bei entsprechender Anlage soll ermöglicht werden, den gesamten Bedarf zu decken, um den Netzbezug zu minimieren. Da der vorhandene Netzanschluss bestehen bleibt, ist es möglich eventuell auftretende Leistungsspitzen abzusichern. Die je nach Variante darüber hinaus produzierte elektrische Leistung soll ins öffentliche Netz eingespeist werden.

1.2 Energiepreise Kaserne Marienberg

Strompreis Bezug – Kaserne Marienberg: 10,84 ct/kWh (brutto)
9,11 ct/kWh (netto)

Gaspreis Bezug – Kaserne:	6,67 ct/kWh (brutto)
	5,60 ct/kWh (netto)

Leistungspreise: entfallen

Wärmepreis Heizkessel (Bestand - $\eta = 90\%$):

Der Wärmepreis entspricht hier dem Preis für eine kWh Wärme bei Erzeugung durch die bestehende Kesselanlage mit einem Wirkungsgrad von 90% bei einem Gaspreis von 5,60 ct/kWh.

$$k_{w,HK} = \frac{5,60 \text{ ct} / kWh}{0,9} = 6,222 \text{ ct} / kWh \text{ (netto)} \quad (4)$$

2. Begriffe / Grundlagen

2.1 Begriffe

a. Leistungszahl

Die Leistungszahl ε oder auch COP (coefficient of performance) ist beim Betrieb von Kompressionswärmepumpen das Verhältnis der nutzbaren Wärmeleistung zur Antriebsenergie des Verdichters in einem bestimmten Betriebspunkt. Eine Leistungszahl von 3 bedeutet also, dass das Dreifache der eingesetzten Antriebsleistung in nutzbare Wärmeleistung umgewandelt wird.

Die Berechnung der realen Leistungszahl erfolgt über die Beziehung:

Leistungszahl:
$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_C}{P} = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{Q}_C - \dot{Q}_0} \quad (5)$$

\dot{Q}_C - Wärmeleistung in kW

\dot{Q}_0 - über Wärmequelle zugeführte Leistung in kW

P - Antriebsleistung des Verdichters in kW

b. Jahresarbeitszahl

Die Jahresarbeitszahl β beschreibt das Verhältnis der jährlich bereitgestellten Wärmemenge zur zugeführten Antriebsenergie. Somit wird eine gemittelte Bewertung der Anlage über ein Jahr gesehen möglich. Je höher demnach die Jahresarbeitszahl, desto höher ist der Wirkungsgrad der Wärmepumpe.

Jahresarbeitszahl:
$$\beta = \frac{Q_C}{W} \quad (6)$$

Q_C - Wärmemenge in kWh/a

W - Antriebsenergie des Verdichters in kWh/a

c. Heizzahl

Die Heizzahl φ steht bei gas- oder ölbetriebenen Wärmepumpen an Stelle der Leistungszahl und beschreibt das Verhältnis von Nutzwärmemenge zur Brennstoffenergiebedarf.

Heizzahl:
$$\varphi = \frac{Q_C}{H_i * \dot{m}_{BrSt}} \quad (7)$$

Q_C - Wärmemenge in kWh/a

H_i - Heizwert des Brennstoffes in kWh/m³

\dot{m}_{BrSt} - Brennstoffmassenstrom in m³/a

d. Wärmeverhältnis

Das Wärmeverhältnis ζ dient zur Bewertung der energetischen Effizienz bei Absorptionswärmepumpen. Dabei wird die nutzbare Wärmeleistung aus Absorber und Verflüssiger der benötigten Wärmeleistung zur Beheizung des Austreibers gegenüber gestellt.

Wärmeverhältnis:
$$\zeta = \frac{\dot{Q}_C + \dot{Q}_{Absorber}}{\dot{Q}_{Austreiber}} \quad (8)$$

\dot{Q}_C - abgegebene Wärmeleistung am Verflüssiger in kW

$\dot{Q}_{Absorber}$ - abgegebene Wärmeleistung am Absorber in kW

$\dot{Q}_{Austreiber}$ - benötigte Wärmeleistung im Austreiber in kW

e. Jahresnutzungsgrad

Der Jahresnutzungsgrad ist das Verhältnis von genutzter und eingesetzter Energie. Dabei wird nicht nur die Wärmeenergie betrachtet, sondern alle Energien, welche eingesetzt bzw. genutzt werden. Die Ermittlung kann über entsprechende Tabellen oder über eine Berechnung erfolgen. Da die Berechnung sehr aufwendig ist und in dieser Erarbeitung nicht betrachtet wird, wird diese hier nicht weiter erläutert.

2.2 Brennstoff Erdgas

Definition:

Unter Erdgas versteht man alle gasförmigen Kohlenwasserstoffverbindungen, welche aus der Erde gewonnen werden und brennbar sind.

Zusammensetzung:

Bei Erdgas handelt es sich um ein Gasgemisch. Die Zusammensetzung schwankt je nach Gewinnungsort. Der Hauptbestandteil mit 70-98% ist Methan (CH_4). Darüber hinaus enthält Erdgas auch Anteile höherer Kohlenwasserstoffe, wie Ethan (C_2H_6), Propan (C_3H_8), Butan (C_4H_{10}) oder Ethen (C_2H_4). Weitere Bestandteile sind Inertgase und verschiedene Verunreinigungen.

Physikalische Eigenschaften:

Erdgas ist ein ungiftiges, brennbares, farb- und geruchsloses Gas, welches leichter ist als Luft. Der bekannte Gasgeruch resultiert aus einem zugesetztem Duftstoff, welcher die Ortung ermöglicht. Die Zündtemperatur liegt etwa bei 600°C und zur Verbrennung von 1 m^3 Erdgas sind ca. 10 m^3 Luft nötig.

Entstehung:

Erdgas entsteht ähnlich wie Erdöl, wodurch dieses meist zusammen mit Erdöl gefunden wird. Die Bildung erfolgt unter Luftabschluss, erhöhtem Druck und hoher Temperatur aus abgestorbenen Kleinstlebewesen. Die Entstehung des Großteils des heute zur Verfügung stehenden Erdgases reicht etwa 15-600 Mio. Jahre zurück.

Gewinnung:

Die Erdgasgewinnung erfolgt durch Bohrungen oder als Nebenprodukt bei der Erdölgewinnung. Erdgas ist leicht gewinnbar, da das unter Druck stehende Gas eine einfache Förderung ermöglicht, sobald die Quelle geöffnet ist.

Aufbereitung:

Vor der Verwendung werden unerwünschte Bestandteile wie Schwefelwasserstoff oder Wasser durch Prozesse wie Trocknung oder Adsorption entfernt.

Ökologie:

Im Vergleich zu anderen fossilen Brennstoffen verbrennt Erdgas auf Grund der geringen Verunreinigungen sowie der geringeren CO₂-Emissionen sauberer. Dennoch wird durch Förderung, Transport und Verarbeitung das Treibhausgas Methan freigesetzt.

Besonders problematisch ist das „Abfackeln“ von Erdgas als Nebenprodukt bei der Erdölgewinnung, wenn dieses nicht gewinnbringend abgesetzt oder zurückgepumpt werden kann.

Weltförderung von Erdgas:

Die größten Erdgasförderer (Abb. 1) der Welt sind Russland, USA, Kanada, Iran und Norwegen. Erdgas deckt etwa 25% des weltweiten Energieverbrauches.

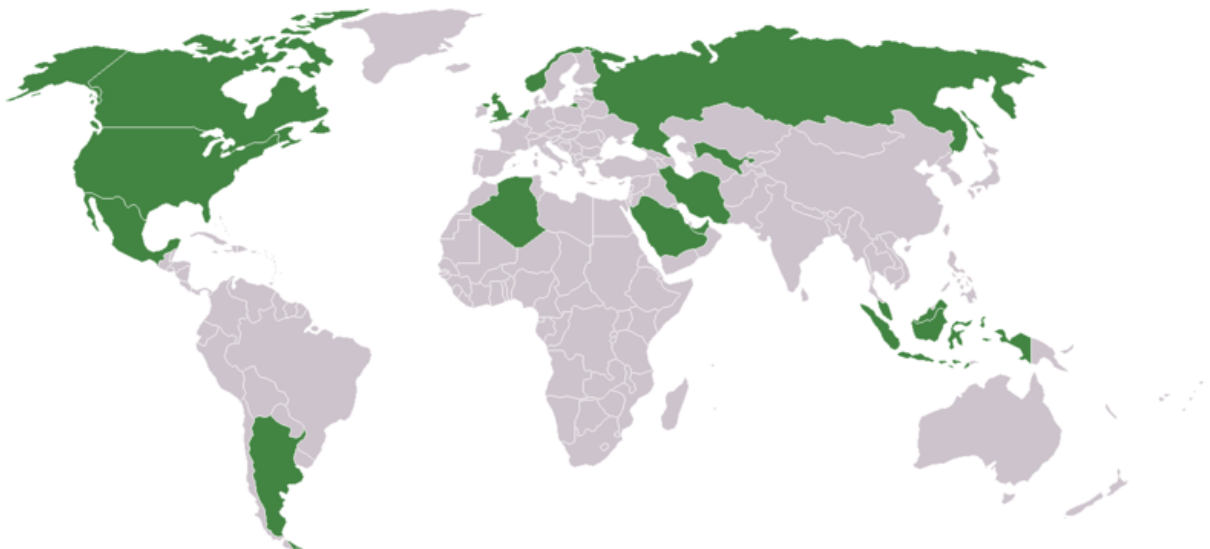


Abb. 1: größte Erdgasförderer weltweit ²

Die statische Reichweite der Erdgasreserven schwankt je nach Quelle zwischen 60 und 65 Jahren.

$$\text{statische Reichweite} = \frac{\text{Re serve}}{\text{gegenwärtige Jahresfördermenge}}$$

² [WIK08]

3. Förderungen / Vergütungen

3.1 Förderungen Gas-Wärmepumpen

Laut BAFA (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle) kann eine gasbetriebene Wärmepumpe je nach Wärmequelle gefördert werden. Im Gebäudebestand beträgt die Förderung in Wohngebäuden mit Ausnahme von Luft / Wasserwärmepumpen 20 €/je Quadratmeter Wohnfläche und bei Nichtwohngebäuden 20 €/je Quadratmeter beheizter Nutzfläche. Bei Wohngebäuden mit mehr als zwei Wohneinheiten und bei Nichtwohngebäuden ist die Förderung allerdings auf 15 % der nachgewiesenen Nettoinvestitionskosten begrenzt.

Bei Luft / Wasserwärmepumpen im Gebäudebestand beträgt die Förderung 10 €/je Quadratmeter Wohnfläche, in Nichtwohngebäuden 10 €/je Quadratmeter beheizter Nutzfläche. Bei Gebäuden mit mehr als zwei Wohneinheiten und bei Nichtwohngebäuden ist die Förderung auf 10 % der nachgewiesenen Nettoinvestitionskosten begrenzt. Der Nachweis der Wohn- und Nutzfläche erfolgt durch geeignete Unterlagen (z.B. Grundrisspläne, Kaufverträge ...).³

3.2 Ökosteuern

Laut Mineralölsteuergesetz sind gasbetriebene Wärmepumpen ab einem Jahresnutzungsgrad von 70 % von der Mineralölsteuer befreit, was einer Verminderung des Arbeitspreises von Erdgas von 0,55 ct/kWh, dem so genannten Heizgassteuersatz, entspricht. Dieser Betrag wird vom Gasversorger beim Hauptzollamt versteuert und dann vom Kunden mitbezahlt. Deshalb ist es möglich, dass der Betreiber einer gasbetriebenen Wärmepumpe eine Vergütung dieses Betrages beim Hauptzollamt beantragt, wenn er den entsprechenden Jahresnutzungsgrad für die Anlage nachweist. Die Vergütung erfolgt dann meist im Folgejahr auf Antrag des Betreibers. Er fügt dabei die letzte Gasrechnung sowie einen Nachweis des Jahresnutzungsgrades bei. Dieser kann per Hand oder mittels Tabellen erfolgen, welche mit dem Antrag erhältlich sind.⁴

³ [BAF08]

⁴ [ASU05]

3.3 Neues KWK-Gesetz 2008

Am 6. Juni 2008 wurde das neue KWK-Gesetz vom Bundestag verabschiedet. Dadurch wurde das bestehende Gesetz von 2002 ergänzt bzw. erweitert. Die neuen Bestimmungen gelten für KWK-Anlagen, welche nach dem 31.12.2008 und vor dem 31.12.2016 in Dauerbetrieb gehen.

Die wichtigsten Änderungen dabei sind, dass KWK-Strom dem EEG-Strom (Gesetz zur Neuregelung des Rechts der erneuerbaren Energien im Strombereich) gleichgestellt wird und vorrangig vom Netzbetreiber abzunehmen ist. Weiterhin wird der KWK-Zuschlag auch für den Strom bezahlt, welchen der Betreiber selbst verbraucht oder über private Netze an seine Kunden liefert. Der KWK-Zuschlag von 5,11 ct/kWh wird für Anlagen mit einer elektrischen Leistung von bis zu 50 kW auf 10 Jahre garantiert. Anlagen von 50 kW bis 2 MW elektrischer Leistung erhalten einen KWK-Zuschlag von 5,11 ct/kWh für 50 kW und 2,1 ct/kWh für die Leistung größer 50 kW für 6 Betriebsjahre, maximal aber für 30.000 Volllastbetriebsstunden. Ab 2 MW erhalten derartige Anlagen einen Zuschlag von 1,5 ct/kWh begrenzt auf 30.000 Volllastbetriebsstunden. Ein Aus- bzw. Neubau von Wärmenetzen wird ebenfalls mit einem Zuschuss von bis zu 60 €/m Trassenlänge gefördert.

3.4 Förderung BHKW

Wie Gasmotorwärmepumpen können BHKW nach Mineralölsteuergesetz ab einem Jahresnutzungsgrad von 70% von der Mineralölsteuer befreit werden, was ebenfalls einer Arbeitspreisminderung von 0,55 ct/kWh Gasbezug entspricht.

Weiterhin erhalten BHKW nach Gliederungspunkt 3.3 einen so genannten KWK-Bonus zusätzlich zur gesetzlich geregelten Einspeisevergütung. Diese Vergütung liegt bei ca. 5-6 ct/kWh.

3.5 Einspeisevergütungen

Die Einspeisevergütung von elektrischer Leistung, welche durch die EVU gezahlt wird, ist abhängig vom durchschnittlichen Preis für Baseload-Strom (Abb.4) an der EEX (European Energy Exchange AG). Im zweiten Quartal 2008 erreichte dieser einen bisher unerreichten Höchststand von 65,54 €/MWh. Um einen realistischen Wert für Planungen zu erhalten und die zeitlichen Schwankungen zu berücksichtigen, wird ein mittlerer Wert angesetzt. Dieser Wert beträgt im zweiten Quartal 2008 54 €/MWh.

Preisentwicklung für Baseload-Strom 2000-2008

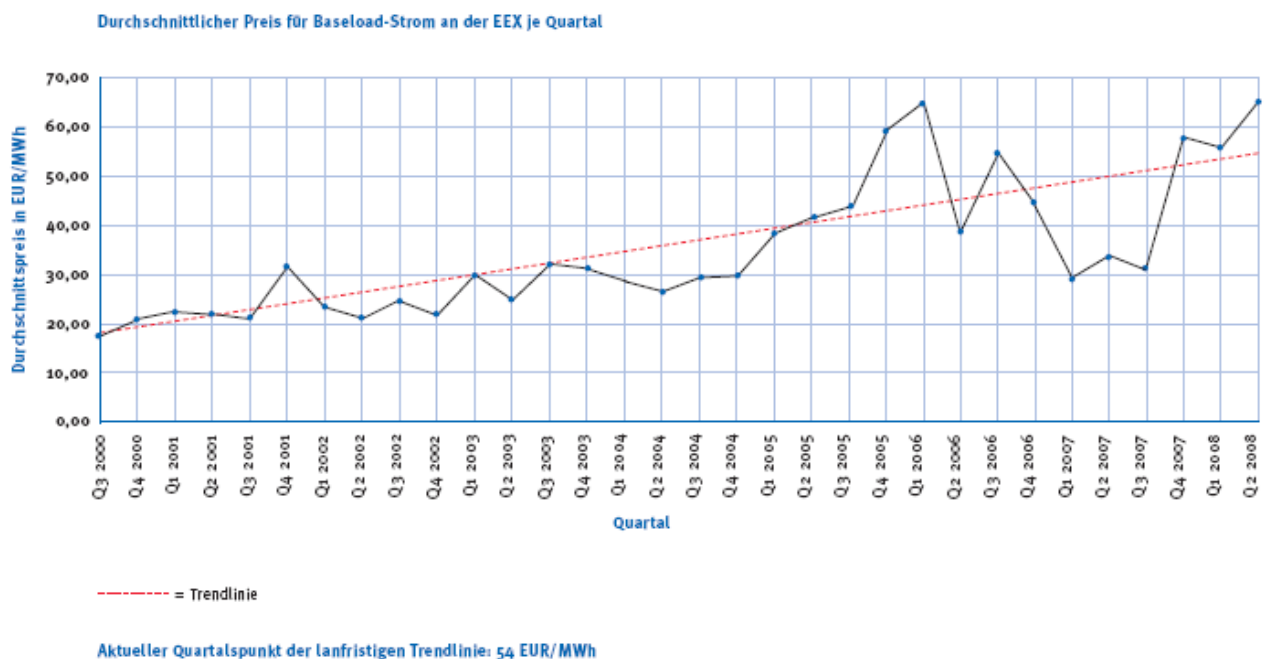


Abb. 2: Preisentwicklung Baseload-Strom⁵

⁵ [SOK08]

4. Systemvarianten

4.1 Gasmotorwärmepumpen (Variante 1)

Eine gasmotorisch betriebene Wärmepumpe (Abb.3) funktioniert gleich einer strombetriebenen Kompressionswärmepumpe. Der einzige Unterschied besteht im Verdichter. Während der Antrieb des Verdichters bei der strombetriebenen Wärmepumpe durch Elektroenergie, meist aus dem öffentlichen Netz, erfolgt, wird der Verdichter einer Gasmotorwärmepumpe durch einen Gasmotor angetrieben. Die anderen Komponenten sind der Strom-Wärmepumpe analog. Die Anlage besteht ebenfalls hauptsächlich aus Verdampfer, Verdichter, Verflüssiger und Expansionsventil. Die Funktionsweise ist ebenso gleich. Durch die Aufnahme von Umweltwärme wird im Verdampfer ein im System zirkulierendes Kältemittel verdampft. Der Kältemitteldampf wird in den Verdichter geleitet und dort komprimiert. Dadurch steigen Druck und Temperatur an. Der somit auf höheres Energieniveau gebrachte Kältemitteldampf wird in den Verflüssiger geleitet und durch Wärmeabgabe über Wärmetauscher kondensiert. Die Wärmeenergie wird meist zu Heizzwecken verwendet. Das verflüssigte Kältemittel wird anschließend über ein Expansionsventil entspannt, wodurch sich Ausgangsdruck und Ausgangstemperatur wieder einstellen. Danach erfolgt die Zuleitung zum Verdampfer wo das Kältemittel erneut verdampft und somit der Kreislauf von neuem beginnt.

Durch die zusätzliche Wärmeenergie, welche über den Kühlkreislauf des Gasmotors gewonnen werden kann, ist es möglich die Primärenergieausnutzung weiter zu steigern. Diese Wärmeenergie kann dem Heizkreis zugeführt werden oder auch zur Warmwasserbereitung genutzt werden. Alternativ dazu kann ein Teil dieser Wärmeenergie auch zur Beheizung des Verdampfers genutzt werden, um zum Beispiel Außenluft vorzuwärmen und Einfrierungen im Winter zu vermeiden. Somit können hohe Wirkungsgrade auch bei niedrigen Außenlufttemperaturen erreicht werden.

Einige Hersteller von Gasmotorwärmepumpe sehen einen Einsatz derzeit, auf Grund der hohen Gaspreise als unwirtschaftlich an, dennoch wird dieses Konzept in dieser Arbeit als eine der Vorzugsvarianten betrachtet und dementsprechend wirtschaftlich bewertet.

Die meisten Hersteller bieten dabei Luft/Wasser-Wärmepumpen in den Leistungen von 20 bis 85 kW an, wobei eine höhere Leistung durch Kaskadenschaltungen erreicht werden kann. Nur wenige Hersteller bieten Luft/Wasser-Wärmepumpen höherer Leistungen an.

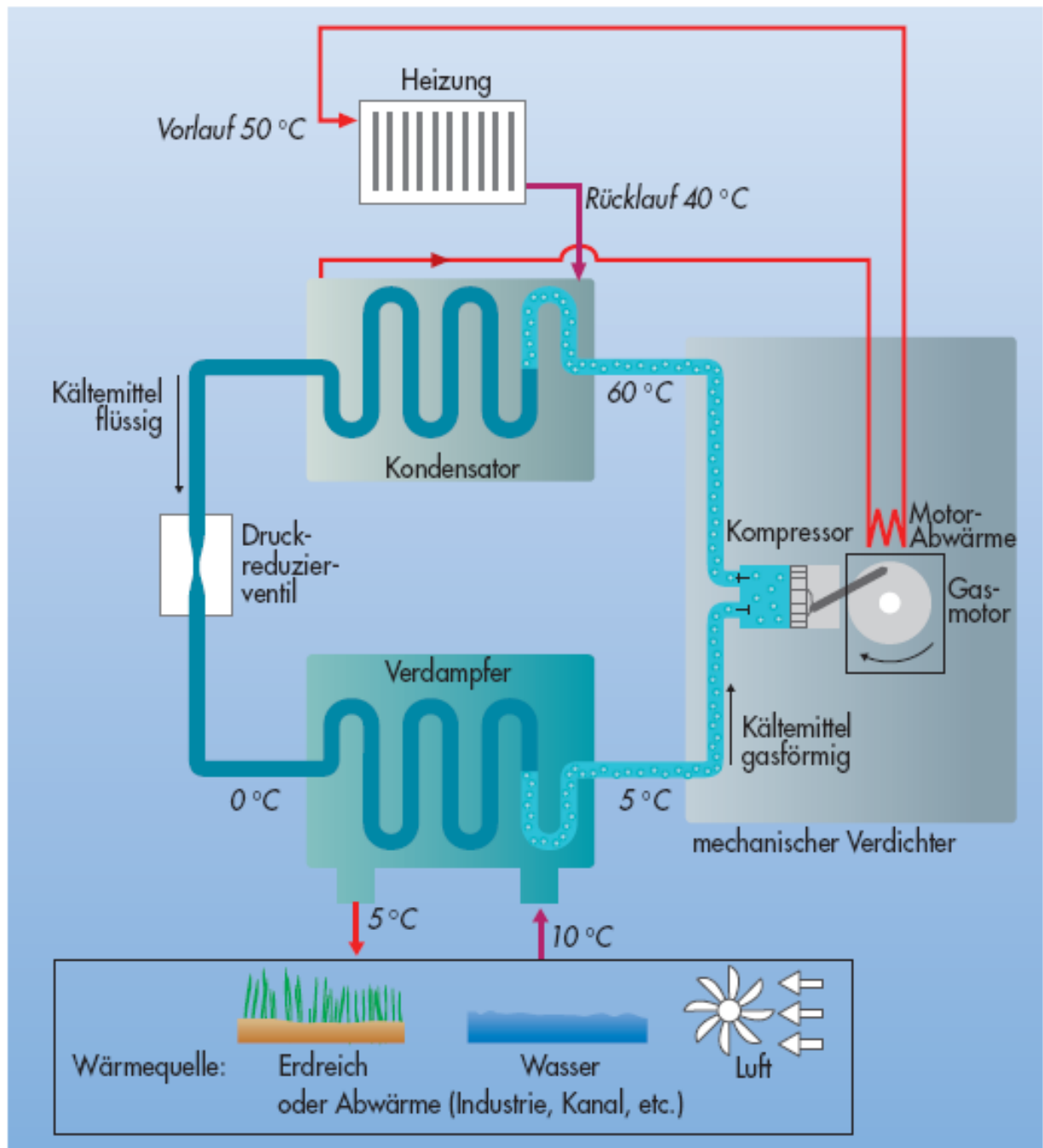


Abb. 3: Schema einer Gasmotor-Wärmepumpe ⁶

⁶ [ASU02]

4.1.1 Einsatz von Gasmotorwärmepumpen in Marienberg

Eine Gasmotorwärmepumpe ist sehr gut für den Einsatz in der Heizzentrale geeignet. Durch herstellereigenspezifische Heizzahlen von 1,6 bis 1,7 ist es möglich im Vergleich zur bestehenden Anlage über 40% Brennstoffenergie bei gleichen Heizleistungen einzusparen. Die dabei betrachteten Wärmepumpen nutzen alle Außenluft als Wärmequelle. Durch die Nutzung der Abwärme des Gasmotors, welche über einen Solekreislauf in den Verdampfer übertragen werden kann, ist es möglich auch bei niedrigen Außentemperaturen hohe Heizleistungen zu erzielen.

Die benötigte Heizleistung von 600 kW kann durch das Zusammenschalten von mehreren Geräten ermöglicht werden.

Beim Einsatz derartiger Anlagen in der Kaserne Marienberg müsste die Wärmepumpe so umgerüstet werden, dass ein Betrieb über einen Solekreislauf ermöglicht wird. Dieser Kreislauf entzieht bei Betrieb der Kesselanlage Wärme aus dem Abgas bzw. in den Sommermonaten aus der Außenluft. Da die Wärmepumpe im Gebäude aufgestellt werden soll, kann die Wärmeleistung über den Gasmotor ganzjährig zur Vorlauftemperaturerhöhung genutzt werden. Dadurch wird es möglich Vorlauftemperaturen bis 70°C zu erzeugen, wodurch die Warmwasserbereitung sichergestellt werden kann.

Die größte erhältliche Luft/Wasser-Gasmotorwärmepumpe GHP-901 der Firma Climaveneta erzeugt im Heizbetrieb 247 kW Wärmeleistung. Weiterhin ist es möglich durch die Nutzung der Abwärme des Gasmotors die verfügbare Wärmeleistung um 103 kW auf 350 kW zu erhöhen.

Zur Abführung der Abgase bei Aufstellung im Gebäude, wird die außen liegende Abgasleitung des entfallenen Kessel genutzt. Die bestehende Abgasleitung des 1,7 MW Kessels innerhalb des Gebäudes wird demontiert.⁷

In die Abgasleitung der bestehenden Heizkessel werden zwei Wärmetauscher integriert. Die erste Stufe wird zur Rücklauftemperaturerhöhung verwendet, die zweite Stufe überträgt Wärme auf den Solekreislauf.

Während des Sommerbetriebes erfolgt die Erwärmung des Solekreislaufes über einen Luft/Sole-Wärmetauscher, welcher hinter dem Gebäude aufgestellt wird. In der Heizperiode erfolgt die Umschaltung auf die Abgaswärmetauscher.⁸

⁷ vgl. Anlage 2

⁸ vgl. Anlage 5 + 6

4.1.2 Auslegung Variante 1

Um die geforderte Grundlast decken zu können, wird der Einsatz von zwei Wärmepumpen überprüft. Der Gesamtwärmebedarf der Kaserne von 5.000 MWh/a soll dabei jedoch maximal zu 75% gedeckt werden.

Fabrikat: Climaveneta GHP 901
thermische Leistung Wärmepumpe: je 247 kW
Leistung über Wärmetauscher Motor: je 103 kW
Leistung pro Aggregat: 350 kW
Gesamtwärmeleistung: $\dot{Q}_{ges} = 700 \text{ kW}$
Brennstoff: Erdgas
Heizzahl nach Herstellerunterlagen: $\varphi = 1,68$

Anzahl Betriebsstunden:

$$t_{Bh} = \frac{Q_{ges,Kaserne} \times 0,75}{\dot{Q}_{ges}} \quad (9)$$

Nach Gl. 9:

$$t_{Bh} = \frac{5.000.000 \text{ kWh/a} \times 0,75}{700 \text{ kW}} = 5.357 \text{ h/a}$$

Wärmemenge pro Jahr:

$$Q_{ab} = \dot{Q}_{ges} \times t_{Bh} \quad (10)$$

Nach Gl. 10:

$$Q_{ab} = 700 \text{ kW} \times 5.357 \text{ h/a} = 3.750 \text{ MWh/a}$$

Brennstoffenergiebedarf:

$$B_{E,BrSt,GMP} = \frac{Q_{ab}}{\varphi} \quad (11)$$

Nach Gl. 11:

$$B_{E,BrSt,GMP} = \frac{3.750 \text{ MWh/a}}{1,68} = 2.232 \text{ MWh/a}$$

Einsparungen

Vergleich mit Heizkessel:

Brennstoffenergiebedarf bei Wirkungsgrad 90%:

$$B_{E,BrSt,HK} = \frac{Q_{ab}}{\eta_{HK}} \quad (12)$$

Nach Gl. 12: $B_{E,BrSt,HK} = \frac{3.750 \text{ MWh}/a}{0,9} = 4.167 \text{ MWh}/a$

Brennstoffeneinsparung:

$$B_{E,BrSt} = B_{E,BrSt,HK} - B_{E,BrSt,GMP} \quad (13)$$

Nach Gl. 13: $B_{E,BrSt} = 4.167 \text{ MWh}/a - 2.232 \text{ MWh}/a = 1.935 \text{ MWh}/a$

Wärmenutzung bei Wärmepreis von 6,222 ct/kWh nach Gliederungspunkt 1.2:

$$E_W = Q_{ges,GMP} \times t_{Bh} \times \text{Wärmepreis} \quad (14)$$

Nach Gl. 14: $E_W = 700 \text{ kW} \times 5.357 \text{ h}/a \times 0,06222 \text{ €/kWh} = 233.319 \text{ €/a}$

Einsparung der Mineralölsteuer von 0,55 ct/kWh:

$$E_M = B_{E,BrSt,GMP} \times 0,0055 \text{ €/kWh} \quad (15)$$

Nach Gl. 15: $E_M = 2.232 \text{ MWh}/a \times 0,0055 \text{ €/kWh} = 12.276 \text{ €/a}$

Die Gesamteinsparungen durch den Betrieb der Gasmotorwärmepumpe ergeben sich aus der Summe der Einsparung durch Wärmenutzung und durch die Vergütung der Mineralölsteuer.

$$E_{ges} = E_W + E_M \quad (16)$$

Nach Gl. 16: $E_{ges} = 233.319 \text{ €/a} + 12.276 \text{ €/a} = 245.595 \text{ €/a}$

Mehrkosten durch Betrieb Gasmotorwärmepumpe

Brennstoffeinsatz (Gaskosten vgl. Gliederungspunkt 1.2):

$$A_{B,BrSt} = B_{E,BrSt} \times k_{Gas} \quad (17)$$

Nach Gl. 17: $A_{B,BrSt} = 2.232 \text{ MWh/a} \times 56,00 \text{ €/MWh} = 124.992 \text{ €/a}$

Wartung (1.500 € pro Quartal und Aggregat – lt. Hersteller):

$$A_{B,Wart} = k_{Wart} \times Anzahl \quad (18)$$

Nach Gl. 18: $A_{B,Wart} = 6.000 \text{ €/a} \times 2 = 12.000 \text{ €/a}$

Die anrechenbaren Einsparungen ergeben sich durch Abzug der Mehrkosten von den Gesamteinsparungen.

$$E = E_{ges} - (A_{B,BrSt} + A_{B,Wart}) \quad (19)$$

Nach Gl. 19: $E = 245.595 \text{ €/a} - (124.992 \text{ €/a} + 12.000 \text{ €/a}) = 108.603 \text{ €/a}$

Gasmotorisch betriebene Wärmepumpen laut BAFA mit maximal 10% der Investitionskosten gefördert. Bei Nettoinvestitionskosten von ca. 473.000 € entspricht das einer Förderung von 47.300 €.

4.2 Gasbetriebene Absorptionswärmepumpen (Variante 2)

Der Aufbau solcher Wärmepumpen (Abb.2) entspricht warmwasserbetriebenen Absorptionswärmepumpen. Sie bestehen ebenfalls aus Verflüssiger, Expansionsventil, Verdampfer, Absorber und Austreiber. Der Austreibevorgang erfolgt jedoch nicht über die Zuleitung von Warmwasser sondern über eine direkte Befeuerung durch einen Gasbrenner.

Ein großer Vorteil von Absorptionswärmepumpen gegenüber anderen Wärmepumpen ist der Einsatz umweltfreundlicher Arbeitsstoffpaarungen. Umweltgefährdende Kältemittel kommen dabei nicht zum Einsatz. Die möglichen Stoffpaarungen dabei sind Ammoniak / Wasser und Wasser / Lithiumbromid. Die meisten Hersteller entsprechender Anlagen nutzen Wasser / Lithiumbromid, wobei Wasser als Kältemittel und Lithiumbromid als Lösungsmittel verwendet wird. Die zweite mögliche Stoffpaarung nutzt Ammoniak als Kältemittel und Wasser als Lösungsmittel. Die Funktionsweise ist allen Absorptionswärmepumpen gleich. Im Verdampfer wird das Kältemittel durch Zufuhr von Umweltwärme verdampft und der Kältemitteldampf wird in den Absorber eingeleitet. Unter Entstehung von Absorptionswärme wird das gasförmige Kältemittel durch das Lösungsmittel absorbiert. Das Kältemittel-/Lösungsmittelgemisch wird durch eine Lösungsmittelpumpe zum Austreiber transportiert. Dort erfolgt die Austreibung des Kältemittels, durch Wärmezufuhr, aus dem Lösungsmittel. Das nun nahezu reine Lösungsmittel wird entspannt und nach eventueller Rektifikation zum Absorber zurückgeleitet, wo erneut die Aufnahme des Kältemitteldampfes erfolgt. Das ausgetriebene Kältemittel wird nach Verlassen des Austreibers dem Verflüssiger zugeleitet und durch Wärmeabgabe kondensiert. Nach anschließender Entspannung durch das Expansionsventil wird das flüssige Kältemittel erneut dem Verdampfer zugeleitet. Mit der Verdampfung startet der Kreislauf von neuem.

Verschiedene Hersteller von gasbetriebenen Absorptionswärmepumpen bieten Systeme mit zweistufiger Austreibung an. Dabei erfolgt die so genannte Hochtemperaturaustreibung über den Gasbrenner. Anschließend erfolgt eine Niedertemperaturaustreibung welche die Funktion der Rektifikation übernimmt. Als Wärmequelle dient der ausgetriebene Kältemitteldampf der ersten Austreibungsstufe. Durch diese zweistufige Austreibung wird eine hohe Reinheit des Lösungsmittels nach der Austreibung erreicht.

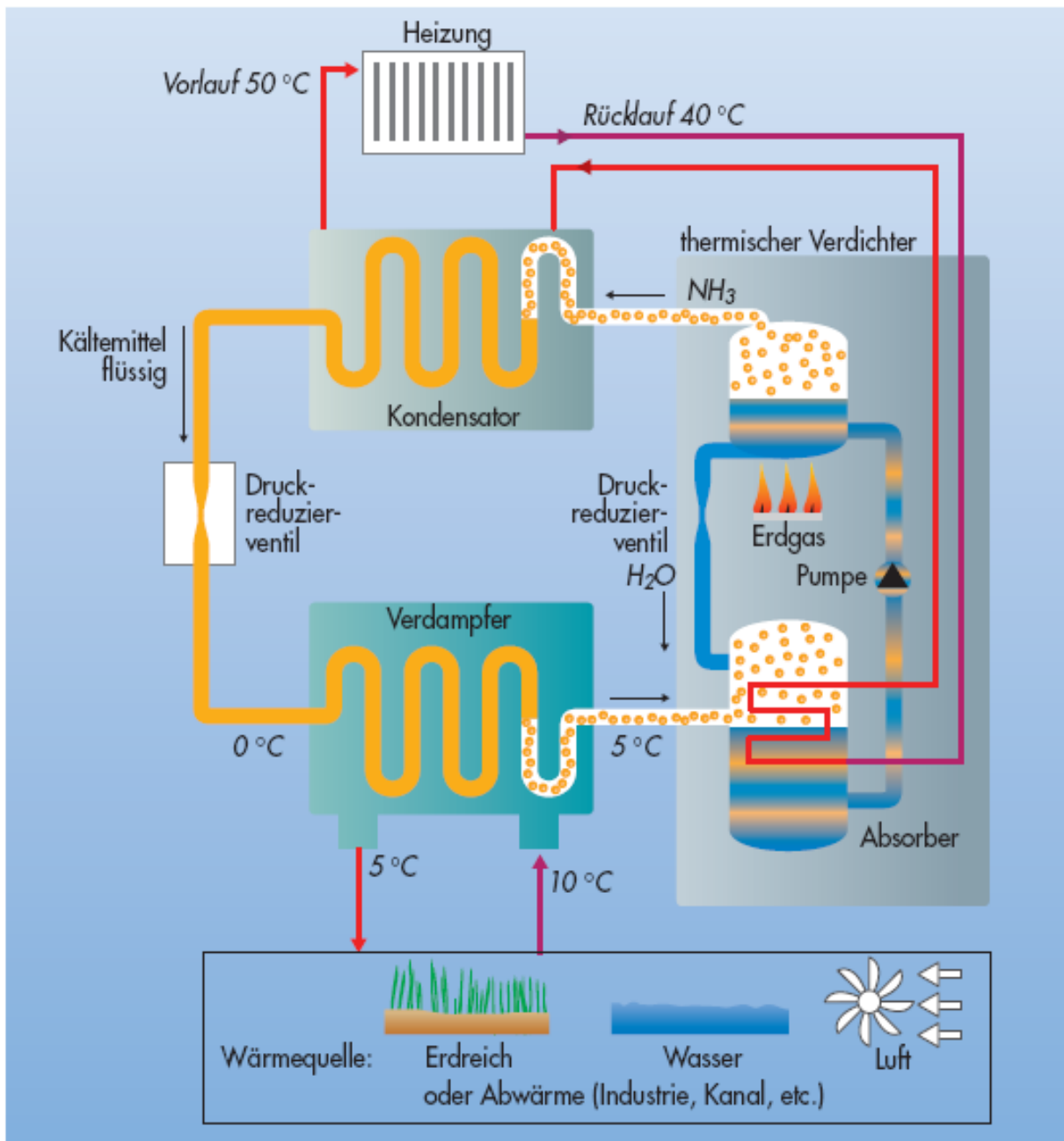


Abb. 4: Schema einer Gas-Absorptionswärmepumpe ⁹

Abbildung 4 zeigt das Funktionsschema einer Gas-Absorptionswärmepumpe mit Ammoniak als Kältemittel. Derartige Wärmepumpen sind mit maximalen Leistungen von 67 kW zu Heizzwecken erhältlich. Größere Anlagen arbeiten ausschließlich mit dem Arbeitstoffpaar Wasser/LiBr.

⁹ [ASU02]

4.2.1 Gas-Absorptionswärmepumpen in Marienberg

Beim Einsatz einer gasbetriebenen Absorptionswärmepumpe in der Heizzentrale der Kaserne Marienberg, ergeben sich jedoch einige Probleme. Um eine entsprechend hohe Vorlauftemperatur (70°C – 75°C) zu gewährleisten, benötigen derartige Anlagen entsprechend hohe und konstante Temperaturen der Wärmequellen. Laut Hersteller werden Temperaturen von mindestens 40°C benötigt. Das würde im vorliegenden Projekt ein ständiges Betreiben eines Heizkessels erforderlich machen. Da dies jedoch besonders in den Sommermonaten vermieden werden soll, ist dies nicht im Sinne des Betreibers. Alternative Wärmequellen, wie Außenluft oder Grundwasser sind demnach ebenfalls unmöglich.

Da der Bedarf solcher Anlagen in Deutschland noch sehr gering ist, werden entsprechende Anlagen speziell auf das Projekt ausgelegt und produziert, woraus sich hohe Investitionskosten ergeben. Auf Grund dieser Tatsachen ist diese Variante im vorliegenden Projekt nicht wirtschaftlich realisierbar, wodurch die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dieser Variante entfällt.

4.2.2 Ausblick

Verschiedene Hersteller bieten Absorptionswärmepumpen ab 600 kW an. Damit können, bei Heizzahlen von 1,65 – 1,7, Vorlauftemperaturen von bis zu 95°C erreicht werden. Als Wärmequellen dienen dabei Abgase mit Temperaturen von über 300°C oder Abwässer höherer Temperaturen. Mit solchen Anlagen lassen sich Heiz- und Kühlleistung von bis zu 11 MW realisieren. Deshalb besteht ein großer Bedarf bei zum Beispiel Heizkraftwerken und Anlagen mit dementsprechenden großen Leistungen nach derartigen, umweltschonenden und primärenergiesparenden Technologien.

Auf Grund der ständig steigenden Energiepreise wird die Nachfrage ebenfalls kontinuierlich ansteigen. Werden Bedarf und Nachfrage größer, so ist zu erwarten, dass die Investitionskosten fallen. Somit besteht für solche Anlagen ein großes Potential in der Zukunft.

Gas-Absorptionswärmepumpen arbeiten am wirtschaftlichsten, wenn die Kälte- und Wärmeleistung des Aggregats genutzt werden kann.

4.3 BHKW + warmwasserbetriebene Absorptions-WP (Variante 3)

Diese Systemvariante sieht die Kombination von BHKW und warmwasserbetriebener Absorptionswärmepumpe vor. Die Funktionsweise der Wärmepumpe sowie deren Aufbau sind gleich dem der gasbetriebenen Absorptionswärmepumpe. Nur, dass bei dieser Variante die Austreibung des Kältemittels durch Warmwasser erfolgt. Durch den Betrieb des BHKW mit dem Brennstoff Erdgas ist es möglich Warmwasser bis zu 90°C zu erzeugen, welches der Wärmepumpe zugeführt wird und dadurch der Austreibungsprozess realisiert werden kann. Dabei wird das BHKW wärmeorientiert auf die benötigte Leistung des Austreibers ausgelegt.

Neben der thermischen Leistung stellt das BHKW auch Elektroenergie zur Verfügung. Diese kann zur Eigenbedarfsdeckung der Heizzentrale genutzt werden oder in das öffentliche Netz eingespeist werden. Durch die dadurch resultierende Einspeisevergütung können sich die hohen Investitionskosten des BHKW schneller amortisieren.

Einsatzmöglichkeit in Marienberg

Um den Betrieb der Heizkessel während der Sommermonate zu vermeiden, kommen zum Betrieb der Wärmepumpe ausschließlich natürliche Wärmequellen in Frage. Nutzt man dabei dieses niedrige Energieniveau, werden die zur Warmwasserbereitung geforderten Vorlauftemperaturen nicht erreicht. Da das BHKW lediglich wärmeorientiert ausgelegt wird, kann eine nachfolgende Vorlauftemperaturerhöhung durch das BHKW nicht realisiert werden. Eine eventuelle Überdimensionierung des BHKW, um die Temperatur des Vorlaufes anzuheben, wäre zwar möglich, aber nicht wirtschaftlich. Im Vergleich zum Wärmetransbaustein (Variante 4), wären sowohl die Kosten für das BHKW als auch für die Wärmepumpe höher anzusetzen.

Um höhere Vorlauftemperaturen durch die Wärmepumpe zu gewährleisten, wären höhere Temperaturen der Wärmequelle nötig, wodurch der Betrieb der Kessel nicht vermeidbar ist (vgl. Gas-Absorptionswärmepumpe).

Da ein wirtschaftlicher Einsatz dieser Variante nicht absehbar ist, wird dieses Konzept ebenfalls nicht weiter betrachtet.

4.4 BHKW + Kompressionswärmepumpe (Variante 4)

Eine weitere Möglichkeit der Systemoptimierung ist die Kombination eines BHKW mit einer strombetriebenen Kompressionswärmepumpe. Aufbau und Funktionsweise dieser Wärmepumpe ist analog der einer Gasmotorwärmepumpe mit dem Unterschied, dass der Antrieb des Verdichters durch Elektroenergie erfolgt.

Um Investitionskosten zu minimieren, sollte das BHKW nur stromorientiert, d.h. auf die elektrische Antriebsleistung der Wärmepumpe, ausgelegt werden. Die erzeugte Wärmeleistung des BHKW kann zusätzlich in das Heizungsnetz eingespeist werden oder zur Warmwasserbereitung genutzt werden. Durch diese Kombination, allein zum Zwecke der Beheizung sind laut Hersteller Brennstoffnutzungsgrade von bis zu 160% erreichbar. Eine Überdimensionierung des BHKW zur Nutzung der Einspeisevergütung ist dabei meist nicht wirtschaftlich.

Diese Systemvariante dient allerdings nur zu Vergleichszwecken, da sie aus kostentechnischen- und patentrechtlichen Gründen voraussichtlich nicht zum Einsatz kommen wird. Das Patent dieses Systems besteht seit 2003 durch das Ingenieurbüro Rasche in Leipzig.

Diese Kombination, welche auch als Wärmetransbaustein bezeichnet wird, wird bereits seit 2005 sehr energieeffizient in der Heizzentrale der Fernwärmeversorgung Frankenberg eingesetzt. Dabei kommt ein BHKW mit 529 kW thermischer- und 357 kW elektrischer Leistung zum Einsatz, welches zwei Kompressionswärmepumpen mit je 486 kW thermischer Leistung antreibt. Die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpen beträgt je 135 kW. Die gesamte erreichte Wärmeleistung beträgt somit ca. 1.500 kW.

Die Wärmepumpen nutzen dabei in den Sommermonaten Außenluft sowie die Abgaswärme des BHKW als Wärmequelle. In den Wintermonaten werden zusätzlich Abgaswärmetauscher der Heizkessel als Wärmequelle genutzt.

Die Anlage bestand vor Nutzung des Wärmetrans aus vier Gaskesseln mit einer Gesamtwärmeleistung von 22,5 MW.

Durch den Einsatz der Wärmetranstechnologie ist es möglich den Grundlastbedarf während des gesamten Jahres ohne zusätzlichen Betrieb der Heizkessel sicherzustellen.

4.4.1 Einsatz des Wärmetrans in Marienberg

Da die Bestandsanlage in Marienberg mit der Anlage in Frankenberg vergleichbar ist, kann eine ähnliche Anlage mit verminderter Leistung projiziert werden. Die Wärmepumpe hebt die Temperatur des Rücklaufes aus dem Heizkreis auf etwa 55°C an. Danach erfolgt die Erhöhung der Temperatur durch das BHKW auf etwa 90°C. Diese zwei Komponenten werden also in Reihe geschaltet.

Bei entsprechender Leistung kann die Grundlastversorgung sowie die Warmwasserbereitung während des gesamten Jahres garantiert werden. Die Wärmepumpe soll wie die Gasmotorwärmepumpen (Variante 1) über einen Solekreislauf versorgt werden. Der Kreislauf ist mit den Abgaswärmetauschern der Heizkessel und des BHKW sowie mit einer Außeneinheit zur Nutzung von Umweltwärme verbunden. Während der Sommermonate soll ausschließlich Außenluftwärme genutzt werden, während der Wintermonate ebenfalls die Wärme der Abgase.

Analog zur Gasmotorwärmepumpe werden ebenfalls zwei Wärmetauscher in die Abgasleitungen der bestehenden integriert. Eine Stufe wird zur Rücklauftemperaturenanhebung verwendet, während die zweite Stufe den Solekreis erwärmt.

Die Leistung des BHKW wird nur auf die Leistung der Wärmepumpe ausgelegt, eine Einspeisung bzw. Eigennutzung ist nicht vorgesehen. Somit steht die gesamte erzeugte Leistung von BHKW und Wärmepumpe zur Wärmeversorgung des Objektes zur Verfügung.

Da der mittlere Kessel entfällt und der kleinere Kessel versetzt wird, erfolgt die Aufstellung der Komponenten im linken Teil des Heizhauses. Dabei wird ein Teil des Podestes entfernt. Die Abgasleitung des 1,7 MW Kessels innerhalb des Heizhauses wird demontiert. Die Abgasführung außerhalb des Gebäudes bleibt bestehen, wobei die Abgasleitung des BHKW in den Schornstein eingezogen wird.¹⁰

Ähnlich dem Einsatz der Gasmotorwärmepumpen erfolgt die Erwärmung des Solekreislaufes in den Sommermonaten über den Luft/Sole-Wärmetauscher, in der Heizperiode über die Abgaswärmetauscher der Heizkessel.¹¹

¹⁰ vgl. Anlage 3

¹¹ vgl. Anlage 7 + 8

4.4.2 Auslegung Variante 4

Die benötigte Wärmeleistung im Sommer beträgt lt. Betreiber ca. 500 kW. Um eine gewisse Sicherheit zu gewährleisten, wird diese um 20% erhöht und der Wärmetransbaustein auf ca. 600 kW ausgelegt.

Die Wärmekennziffer eines BHKW mit Gasantrieb beträgt ca. 1,75.¹² Das entspricht dem Verhältnis von Wärmeleistung zu elektrischer Leistung.

$$\dot{Q}_{BHKW} = 1,75 \times P_{el,BHKW} \quad (20)$$

Gleichung 20 umgestellt:

$$P_{el,BHKW} = \frac{\dot{Q}_{BHKW}}{1,75} = 0,57 \times \dot{Q}_{BHKW} \quad (21)$$

Das BHKW wird nur auf Strombedarf der Wärmepumpe ausgelegt. Somit ist die elektrische Leistung des BHKW gleich dem elektrischen Leistungsbedarf der Wärmepumpe.

$$P_{el,WP} = P_{el,BHKW}$$

Wärmeleistung Wärmepumpe:

$$\dot{Q}_{WP} = P_{el,WP} \times \varepsilon_{WP} \quad (22)$$

Die Gesamtwärmeleistung des Wärmetrans ergibt sich aus der Summe der thermischen Leistung des BHKW und der thermischen Leistung der Wärmepumpe nach Gleichung 22.

$$\dot{Q}_{ges} = \dot{Q}_{BHKW} + \dot{Q}_{WP} = \dot{Q}_{BHKW} + P_{el,BHKW} \times \varepsilon_{WP} \quad (23)$$

Die Leistungszahl der Wärmepumpe wird dabei mit 3,3 angenommen.

¹² [RSS07] S. 654

Nach Gleichungen 21, 23:

$$\dot{Q}_{ges} = \dot{Q}_{BHKW} + 0,57 \times \dot{Q}_{BHKW} \times 3,3 \quad (24)$$

$$600 \text{ kW} = \dot{Q}_{BHKW} + 0,57 \times \dot{Q}_{BHKW} \times 3,3$$

$$\dot{Q}_{BHKW} = \frac{600 \text{ kW}}{2,88} = 208 \text{ kW}$$

Über Gleichung 21 lässt sich daraus die elektrische Leistung des BHKW ermitteln.

Nach Gl. 21: $P_{el,BHKW} = 0,57 \times 208 \text{ kW} = 119 \text{ kW}$

Ermittlung der Wärmeleistung der Wärmepumpe:

Nach Gl. 22: $\dot{Q}_{WP} = 119 \text{ kW} \times 3,3 = 392 \text{ kW}$

Gesamtwärmeleistung:

Nach Gl. 23: $\dot{Q}_{ges} = \dot{Q}_{BHKW} + \dot{Q}_{WP} = 208 \text{ kW} + 392 \text{ kW} = 600 \text{ kW}$

BHKW E 2876 DN 140 und 420 kW Wärmepumpe:

BHKW: thermische Leistung: $\dot{Q}_{ab,BHKW} = 207 \text{ kW}$

elektrische Leistung: $P_{el} = 140 \text{ kW}$

Brennstoffverbrauch: $\dot{Q}_{BrSt} = 392 \text{ kW}$ (Erdgas)

WP: thermische Leistung: $\dot{Q}_{ab,WP} = 420 \text{ kW}$

Aus diesen Werten lässt sich das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand nach Gleichung 25 ermitteln, wobei der Nutzen in der Gesamtwärmeleistung des Wärmetrans besteht und der Aufwand im Brennstoffbedarf des BHKW.

Verhältnis:

$$\frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\dot{Q}_{ges}}{\dot{Q}_{BrSt}} = \frac{207 \text{ kW} + 420 \text{ kW}}{392 \text{ kW}} = \frac{627 \text{ kW}}{392 \text{ kW}} = 1,6 \approx 160\% \quad (25)$$

Betriebsstunden nach Gleichung 9:

$$t_{Bh} = \frac{5.000.000 \text{ kWh/a} \times 0,75}{627 \text{ kW}} = 5.981 \text{ h/a}$$

Jährliche Wärmemenge nach Gleichung 10:

$$Q_{ab} = 0,627 \text{ MW} \times 5.981 \text{ h/a} = 3.750 \text{ MWh/a}$$

Bei einem Verhältnis von 1,6 nach Gleichung 25, ergibt sich ein Brennstoffenergiebedarf, bezogen auf die jährliche Wärmemenge, von:

$$B_{E,BrSt,Wtrans} = \frac{Q_{ab}}{1,6} = \frac{3.750 \text{ MWh/a}}{1,6} = 2.344 \text{ MWh/a} \quad (26)$$

Vergleich mit Kesselanlage bei Wirkungsgrad von 90%

Brennstoffenergiebedarf nach Gleichung 12:

$$B_{E,BrSt,HK} = \frac{3.750 \text{ MWh/a}}{0,9} = 4.167 \text{ MWh/a}$$

Brennstoffenergieeinsparung durch Wärmetransbaustein:

$$B_{E,BrSt} = B_{E,BrSt,HK} - B_{E,BrSt,Wtrans} \quad (27)$$

Nach Gleichung 27:

$$B_{E,BrSt} = 4.167 \text{ MWh/a} - 2.344 \text{ MWh/a} = 1.823 \text{ MWh/a}$$

Einsparungen durch Betrieb des Wärmetrans

Laut neuem KWK-Gesetz (vgl. Gliederungspunkt 3.3) wird auch Elektroenergie vergütet, welche im Objekt verbraucht wird.

Elektrische Leistung: $P_{el} = 140 \text{ kW}$

KWK-Bonus:

$$Bonus = \frac{50 \text{ kW} \times 5,11 \text{ ct / kWh} + 90 \text{ kW} \times 2,1 \text{ ct / kWh}}{140 \text{ kW}} = 3,175 \text{ ct / kWh} \quad (28)$$

Da dieser Bonus nicht nur auf die eingespeiste Leistung anrechenbar ist, kann er auf die gesamte erzeugte elektrische Leistung bezogen werden.

$$E_{KWK} = P_{el} \times t_{Bh} \times Bonus \quad (29)$$

Nach Gleichung 29:

$$E_{KWK} = 140 \text{ kW} \times 5.981 \text{ h / a} \times 3,175 \text{ ct / kWh} = 26.586 \text{ €/a}$$

Der Bonus wird jedoch nur auf max. 6 Jahre oder 30.000 Vbh gewährt, d.h. bei einer ermittelten Betriebszeit von 5.981 h/a auf 5 Jahre.

Bei einer Nutzungsdauer eines BHKW von 15 a (lt. VDI 2067-1) kann man die anteiligen, jährlichen Einsparungen ermitteln.

$$E_{KWK, \text{anteilig}} = \frac{E_{KWK} \times 5 \text{ a}}{T_N} = \frac{26.586 \text{ €/a} \times 5 \text{ a}}{15 \text{ a}} = 8.862 \text{ €/a} \quad (30)$$

Wärmenutzung bei Wärmepreis von 6,222 ct/kWh nach Gliederungspunkt 3.5:

$$E_W = \dot{Q}_{ab, WTrans} \times t_{Bh} \times \text{Wärmepreis} \quad (31)$$

Nach Gleichung 31:

$$E_W = 627 \text{ kW} \times 5.981 \text{ h / a} \times 0,06222 \text{ €/kWh} = 233.330 \text{ €/a}$$

Einsparung der Mineralölsteuer von 0,55 ct/kWh:

$$E_M = \dot{Q}_{BrSt} \times t_{Bh} \times 0,0055 \text{ €/kWh} \quad (32)$$

Nach Gleichung 32:

$$E_M = 392 \text{ kW} \times 5.981 \text{ h/a} \times 0,0055 \text{ €/kWh} = 12.895 \text{ €/a}$$

Gesamteinsparungen:

Die Gesamteinsparungen durch den Betrieb des Wärmetransbausteines ergeben sich aus der Summe der Einsparungen durch den KWK-Bonus, der Einsparung durch Wärmenutzung und durch die Vergütung der Mineralölsteuer.

$$E_{ges} = E_{KWK, \text{anteilig}} + E_W + E_M \quad (33)$$

Nach Gleichung 33:

$$E_{ges} = 8.862 + 233.330 \text{ €/a} + 12.895 \text{ €/a} = 255.087 \text{ €/a}$$

Dieser Wert findet bei den Annuitätsberechnungen Anwendung, da alle Zahlungen über einen bestimmten Betrachtungszeitraum auf ein Jahr heruntergerechnet werden. Bei der Ermittlung der überschlägigen Amortisationszeit hingegen soll die kürzeste Amortisationszeit ermittelt werden. Daher wird der KWK-Bonus nicht heruntergerechnet, mit der Annahme, dass sich die Anlage innerhalb der Zahlungsdauer des KWK-Bonus amortisiert.

Gesamteinsparungen:

$$E_{ges} = E_{KWK} + E_W + E_M \quad (34)$$

Nach Gleichung 34:

$$E_{ges} = 26.586 + 233.330 \text{ €/a} + 12.895 \text{ €/a} = 272.811 \text{ €/a}$$

Mehrkosten durch Betrieb Wärmetransbaustein

Brennstoffeinsatz (netto):

$$A_{B,BrSt} = B_{E,BrSt} \times k_{el} \quad (35)$$

Nach Gleichung 35:

$$A_{B,BrSt} = 2.344 \text{ MWh} / a \times 56,00 \text{ €/MWh} = 131.264 \text{ €/a}$$

Wartung (4,95 €/Bh und Aggregat – lt. Hersteller):

$$A_{B,Wart} = k_{Wart} \times t_{Bh} \quad (36)$$

Nach Gleichung 36:

$$A_{B,Wart} = 4,95 \text{ €/Bh} \times 5.981 \text{ Bh} = 29.606 \text{ €/a}$$

Diese Wartungskosten beinhalten die Kosten für Inspektion, Wartung, Instandsetzung und Schmieröl. Die Kosten für diese Arbeiten variieren je nach Hersteller und ergeben einen wesentlichen Anteil an den jährlichen Gesamtkosten.

Die anrechenbaren Einsparungen ergeben sich durch Abzug der Mehrkosten von den Gesamteinsparungen.

$$E = E_{ges} - (A_{B,BrSt} + A_{B,Wart}) \quad (37)$$

Nach Gleichung 37:

$$E = 275.811 \text{ €/a} - (131.264 \text{ €/a} + 29.606 \text{ €/a}) = 114.941 \text{ €/a}$$

4.5 BHKW ohne Wärmepumpe (Variante 5)

Als weitere Alternative kann der Einsatz eines BHKW als Einzelaufstellung betrachtet werden. Durch diese Variante können verschiedene Probleme der anderen Varianten kompensiert werden. Im Gegensatz zu den Wärmepumpen können Blockheizkraftwerke Vorlauftemperaturen bis zu 90°C erzielen, wodurch die Warmwasserbereitung der Kaserne Marienberg ganzjährig ohne zusätzlichen Betrieb der Heizkessel gewährleistet werden kann.

Da das BHKW vorrangig zur Grundlastdeckung eingesetzt werden soll, können lange Betriebszeiten pro Jahr erzielt werden, wodurch eine hohe Wirtschaftlichkeit erreicht werden kann. Der parallel erzeugte Strom kann zur Eigenbedarfsdeckung genutzt werden bzw. ins öffentliche Netz eingespeist werden. Dadurch kann eine geringe Amortisationszeit realisiert werden.

4.5.1 Einsatz in Marienberg

Um die Förderung laut KWK-Gesetz über 6 Jahre zu erhalten dürfen BHKW nicht länger als 5.000 h pro Jahr laufen. Da dies jedoch nicht zur Grundlastdeckung ausreicht, entfällt die Förderung ab einer Betriebsstundenzahl von 30.000 h.

Die durch den Betrieb bereitgestellte Elektroenergie sollte möglichst in der Anlage selbst verbraucht werden, da der Netzbezug mit höheren Kosten verbunden, als die Vergütung durch die Einspeisung. Abweichungen davon sind durch schwankende Strompreise und Einspeisevergütungen möglich.

Der Bedarf an Elektroenergie lag in den letzten Jahren nahezu konstant bei ca. 1200 MWh/a, was durch das BHKW gedeckt werden sollte. Jeglicher darüber hinaus produzierte Strom wird in das öffentliche Netz eingespeist.

Dabei muss geprüft werden, ob der Mehrbedarf an Erdgas durch die Einsparungen bzw. Einspeisungen von elektrischer Energie kompensiert werden können.

Die Aufstellung der BHKW erfolgt im Heizhaus, die Abgase werden über die Abgasleitung des entfallenen Kessels abgeführt.¹³

¹³ vgl. Anlage 4 und 9

4.5.2 Auslegung Variante 5

Um den Grundlastbedarf decken zu können, werden zwei Module eingesetzt. Dabei soll maximal 75% des benötigten Jahreswärmebedarfes gedeckt werden.

Fabrikat: SOKRAtherm Typ: GG 237

Thermische Leistung je 372 kW $\rightarrow \dot{Q}_{ab,BHKW} = 744 \text{ kW}$

Elektrische Leistung je 237 kW $\rightarrow P_{el,BHKW} = 474 \text{ kW}$

Brennstoffverbrauch je 669 kW (Erdgas) $\rightarrow \dot{Q}_{BrSt} = 1.338 \text{ kW}$

Betriebsstunden nach Gleichung 9:

$$t_{Bh} = \frac{5.000.000 \text{ kWh/a} \times 0,75}{744 \text{ kW}} = 5.040 \text{ h/a}$$

Jährliche Wärmemenge nach Gleichung 10 :

$$Q_{ab} = 744 \text{ kW} \times 5.040 \text{ h/a} = 3.750 \text{ MWh/a}$$

Elektr. Energie pro Jahr: $W_{el} = P_{el,BHKW} \times t_{Bh}$ (38)

Nach Gleichung 38: $W_{el} = 474 \text{ kW} \times 5.040 \text{ h/a} = 2.389 \text{ MWh/a}$

Brennstoffenergiebedarf: $B_{E,BrSt} = \dot{Q}_{BrSt} \times t_{Bh}$ (39)

Nach Gleichung 39: $B_{E,BrSt} = 1.338 \text{ kW} \times 5.040 \text{ h/a} = 6.744 \text{ MWh/a}$

Wirkungsgrad thermisch: $\eta_{th} = \frac{Q_{ab}}{B_{E,BrSt}} = \frac{3.750 \text{ MWh/a}}{6.744 \text{ MWh/a}} = 0,556 \approx 55,6 \%$ (40)

Wirkungsgrad elektrisch: $\eta_{el} = \frac{W_{el}}{B_{E,BrSt}} = \frac{2.389 \text{ MWh/a}}{6.744 \text{ MWh/a}} = 0,354 \approx 35,4 \%$ (41)

Gesamtwirkungsgrad: $\eta_{ges} = \eta_{th} + \eta_{el} = 0,556 + 0,354 = 0,91 \approx 91 \%$ (42)

Die Elektroenergie, welche zur Einspeisung ins öffentliche Netz zur Verfügung steht, richtet sich danach, was in der Kaserne selbst verbraucht werden kann bzw. verbraucht werden soll. Um diesen Wert zu ermitteln, wird der Strom zum Eigenverbrauch von der nach Gleichung 38 ermittelten Gesamtenergiemenge abgezogen. Der Verbrauch des Heizhauses liegt bei etwa 35 MWh/a.

Eigenbedarf Heizhaus:

$$W_{el} = 2.389 \text{ MWh/a} - 35 \text{ MWh/a} = 2.354 \text{ MWh/a} \quad (43)$$

Alternativ kann auch der Gesamtbedarf der Kaserne gedeckt werden. Der Bedarf beträgt etwa 1200 MWh/a.

Einspeisung bei Verbrauch in der gesamten Kaserne:

Bedarf: ca. 1.200 MWh/a

Einspeisung:
$$W_{el} = 2.389 \text{ MWh/a} - 1.200 \text{ MWh/a} = 1.189 \text{ MWh/a} \quad (44)$$

Da ausreichend Elektroenergie zur Verfügung steht, wird dieser Wert für die weiteren Berechnungen als Einspeisemenge angesetzt.

Eventuell auftretende Leistungsspitzen werden durch den bestehenden Netzanschluss abgesichert.

Vergleich mit Heizkessel (Brennstoffenergiebedarf):

Wärmemenge BHKW:

$$Q_{ab,BHKW} = 3.750 \text{ MWh/a}$$

Brennstoffenergiebedarf nach Gleichung 12:

$$B_{E,BrSt,HK} = \frac{3.750 \text{ MWh/a}}{0,9} = 4.167 \text{ MWh/a}$$

Brennstoffenergiebedarf BHKW:

$$B_{E,BrSt} = 6.744 \text{ MWh} / a$$

Brennstoffmehrbedarf durch Betrieb BHKW:

$$B_{E,BrSt,mehr} = B_{E,BrSt,BHKW} - B_{E,BrSt,HK} \quad (45)$$

Nach Gleichung 45: $B_{E,BrSt,mehr} = 6.744 \text{ MWh} / a - 4.167 \text{ MWh} / a = 2.577 \text{ MWh} / a$

Beim Betrieb der BHKW würde demnach mehr Brennstoff verbraucht als bei Betrieb der Heizkessel. Der Mehrbedarf an Brennstoff resultiert aus der parallelen Erzeugung von Elektroenergie. Stellt man den Betrieb des BHKW einer getrennten Energieerzeugung gegenüber, so ist erkennbar, dass Primärenergie durch das BHKW eingespart werden kann. Die nachfolgende Abbildung (Abb.5 – S. 34) verdeutlicht dies. Allerdings ist das vom Betreiber der Anlage nicht erkennbar, da er die Kosten für den Brennstoff zur Bereitstellung der Elektroenergie durch das BHKW tragen muss.

Somit entsteht nur ein Nutzen für die Umwelt, weniger für den Betreiber. Der eigentliche Vorteil für den Betreiber ist die Einsparung von Strombezug aus dem öffentlichen Netz bzw. die Vergütung der Einspeisung. Diese Einsparungen bzw. Vergütungen müssen den Mehrbedarf an Betriebskosten durch das BHKW decken.

Da die Einsparungen durch Stromeigennutzung höher sind, als die Vergütung durch Einspeisung ins öffentliche Netz, sollte versucht werden, den Großteil des Energiebedarfs der Kaserne durch die BHKW abzudecken und nur den überschüssigen Strom einzuspeisen.

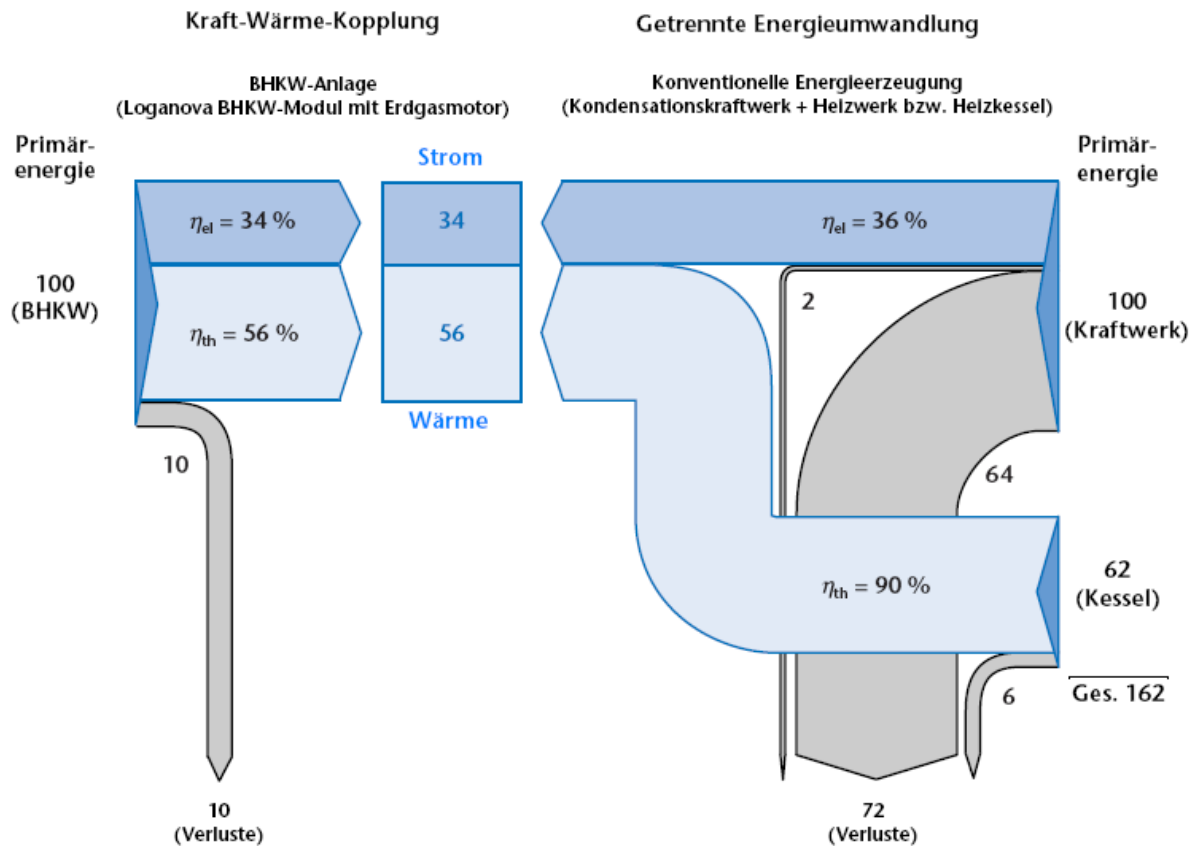


Abb. 5: Kraft-Wärme-Kopplung im Vergleich mit getrennter Energieumwandlung ¹⁴

Abbildung 5 zeigt den benötigten Primärenergiebedarf für die Erzeugung der Energiemengen, welche ein BHKW aus 100% Primärenergie erzeugen kann. Es ist erkennbar, dass durch die Verluste bei der Stromerzeugung durch ein Kraftwerk der Primärenergiebedarf stark ansteigt.

Primärenergieeinsparung:

$$\left(\frac{162}{162} - \frac{100}{162} \right) \times 100\% = \left(1 - \frac{100}{162} \right) \times 100\% = 38\%$$

Der Primärenergiebedarf beim Einsatz eines BHKW ist demnach um ca. 38% niedriger als der bei getrennter Erzeugung von Wärme und Elektroenergie.

¹⁴ [BUD04]

Weiterführende Berechnungen BHKW

Einsparungen

Berechnung KWK-Bonus:

Bis zu einer elektrischen Leistung von 50 kW erhält der Betreiber einen Bonus von 5,11 ct/kWh und bis zu 2 MW 2,1 ct/kWh (vgl. 3.3 – S.10). Bei einer vorhandenen Leistung von 474 kW entspricht dies:

$$Bonus = \frac{50 \text{ kW} \times 5,11 \text{ ct / kWh} + 424 \text{ kW} \times 2,1 \text{ ct / kWh}}{474 \text{ kW}} = 2,418 \text{ ct / kWh} \quad (46)$$

Da dieser Bonus nicht nur auf die eingespeiste Leistung anrechenbar ist, kann er auf die gesamte erzeugte elektrische Leistung bezogen werden.

$$E_{KWK} = P_{el,BHKW} \times t_{Bh} \times Bonus \quad (47)$$

Nach Gleichung 47:

$$E_{KWK} = 474 \text{ kW} \times 5.040 \text{ h / a} \times 2,418 \text{ ct / kWh} = 57.765 \text{ €/a}$$

Der Bonus wird jedoch nur auf max. 6 Jahre oder 30.000 Vbh gewährt, d.h. bei einer ermittelten Betriebszeit von 5.040 h/a über 6 Jahre. Deshalb muss erreicht werden, dass die Anlage auch ohne KWK-Bonus wirtschaftlich arbeiten kann.

Bei einer Nutzungsdauer eines BHKW von 15 a (lt. VDI 2067-1) kann man die anteiligen, jährlichen Einsparungen ermitteln. Dies entspricht den jährlichen Einsparungen, bezogen auf einen Zeitraum von 15 Jahren.

$$E_{KWK,anteilig} = \frac{E_{KWK} \times 6 \text{ a}}{T_N} = \frac{57.765 \text{ €/a} \times 6 \text{ a}}{15 \text{ a}} = 23.106 \text{ €/a} \quad (48)$$

Weitere Einsparungen

Deckung Eigenbedarf Strom von 1.200 MWh/a bei Strompreis von 9,11 ct/kWh (vgl. Gliederungspunkt 1.2):

$$E_S = 1.200 \text{ MWh} / a \times k_{el} \quad (49)$$

Nach Gleichung 49:

$$E_S = 1.200 \text{ MWh} / a \times 0,0911 \text{ €/ kWh} = 109.320 \text{ €/ a}$$

Wärmenutzung bei Wärmepreis von 6,222 ct/kWh (vgl. Gliederungspunkt 1.2):

$$E_W = \dot{Q}_{ab,BHKW} \times t_{Bh} \times \text{Wärmepreis} \quad (50)$$

Nach Gleichung 50:

$$E_W = 744 \text{ kW} \times 5.040 \text{ h} / a \times 0,06222 \text{ €/ kWh} = 233.310 \text{ €/ a}$$

Einsparung der Mineralölsteuer von 0,55 ct/kWh:

$$E_M = \dot{Q}_{BrSt} \times t_{Bh} \times 0,0055 \text{ €/ kWh} \quad (51)$$

Nach Gleichung 51:

$$E_M = 1.338 \text{ kW} \times 5.040 \text{ h} / a \times 0,0055 \text{ €/ kWh} = 37.089 \text{ €/ a}$$

Einspeisung bei Vergütung von 6,554 ct/kWh (vgl. Gliederungspunkt 1.2):

Einspeisung nach Gleichung 44:

$$E_E = W_{el} \times 0,06554 \text{ €/ kWh} \quad (52)$$

Nach Gleichung 52:

$$E_E = 1.189 \text{ MWh} / a \times 0,06554 \text{ €/ kWh} = 77.927 \text{ €/ a}$$

Gesamteinsparungen:

$$E_{ges} = E_{KWK,anteilig} + E_S + E_W + E_M + E_E \quad (53)$$

$$E_{ges} = 23.106 \text{ €/} a + 109.320 \text{ €/} a + 233.310 \text{ €/} a + 37.089 \text{ €/} a + 77.927 \text{ €/} a$$

$$E_{ges} = 480.752 \text{ €/} a$$

Dieser Wert findet bei den Annuitätsberechnungen Anwendung, da alle Zahlungen über einen bestimmten Betrachtungszeitraum auf ein Jahr heruntergerechnet werden.

Bei der Ermittlung der überschlägigen Amortisationszeit hingegen soll die kürzeste Amortisationszeit ermittelt werden. Daher wird der KWK-Bonus nicht heruntergerechnet, mit der Annahme, dass sich die Anlage innerhalb der Zahlungsdauer des KWK-Bonus amortisiert.

Gesamteinsparungen:

$$E_{ges} = E_{KWK} + E_S + E_W + E_M + E_E \quad (54)$$

$$E_{ges} = 57.765 \text{ €/} a + 109.320 \text{ €/} a + 233.310 \text{ €/} a + 37.089 \text{ €/} a + 77.927 \text{ €/} a$$

$$E_{ges} = 515.411 \text{ €/} a$$

Mehrkosten durch Betrieb BHKW

Brennstoffeinsatz (netto):

$$A_{B,BrSt} = B_{E,BrSt} \times k_{el} \quad (55)$$

Nach Gleichung 55:

$$A_{B,BrSt} = 6.744 \text{ MWh} / a \times 56,00 \text{ €/ MWh} = 377.664 \text{ €/} a$$

Wartung (4,95 €/Bh und Aggregat – lt. Hersteller):

$$A_{B,Wart} = k_{Wart} \times t_{Bh} \quad (56)$$

Nach Gleichung 56:

$$A_{B,Wart} = 4,95 \text{ €/ Bh} \times 5.040 \text{ Bh} \times 2 = 49.896 \text{ €/ a}$$

Diese Wartungskosten beinhalten die Kosten für Inspektion, Wartung, Instandsetzung und Schmieröl. Die Kosten für diese Arbeiten variieren je nach Hersteller und ergeben einen wesentlichen Anteil an den jährlichen Gesamtkosten. Auf Grund der zwei Module dieser Variante ergeben sich im Vergleich zu den anderen Variationen die höchsten jährlichen Wartungskosten.

Die anrechenbaren Einsparungen ergeben sich durch Abzug der Mehrkosten von den Gesamteinsparungen.

$$E = E_{ges} - (A_{BrSt} + A_{Wart}) \quad (57)$$

Nach Gleichung 57:

$$E = 515.411 \text{ €/ a} - (377.664 \text{ €/ a} + 49.896 \text{ €/ a}) = 87.851 \text{ €/ a}$$

5. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Unter Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen versteht man Rechenverfahren, durch welche die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit von Investitionsvorhaben ermittelt wird. Um dies darzustellen, existieren statische und dynamische Verfahren.

Statische Verfahren sind einfach Vergleichsverfahren, welche zeitliche Unterschiede bei Einnahmen und Ausgaben nicht berücksichtigen. Dabei wird ein verkürzter Zeitraum betrachtet, mit der Annahme, dass dieser für die gesamte Nutzungsdauer repräsentativ ist. Die Unterscheidung der statischen Methoden erfolgt in Kostenvergleichsrechnung, Gewinnvergleichsrechnung, Rentabilitätsvergleichsrechnung sowie Amortisationsvergleichsrechnung.

Kostenvergleichsrechnung

Dabei werden die in Geld bewerteten, für den Betriebszweck verbrauchten Güter und Dienste eines Abrechnungszeitraumes betrachtet. Die Einteilung erfolgt dabei in fixe (feste) und variable (veränderliche) Kosten.

Gewinnvergleichsrechnung

Bei dieser Methode erfolgt die Betrachtung des Unterschiedes zwischen Erträgen und Aufwendungen, also des Gewinns bezogen auf eine bestimmte Betrachtungsperiode. Ziel ist die Ermittlung des höchstmöglichen Gewinns.

Rentabilitätsvergleichsrechnung

Kriterium für die Bewertung ist die zeitliche Durchschnittsverzinsung bezogen auf das eingesetzte Kapital. Ziel ist die Ermittlung der maximal möglichen Rentabilität.

Amortisationsvergleichsrechnung

Dabei erfolgt die Betrachtung des Zeitraumes, in welchem das für eine Investition eingesetzte Kapital zurückgewonnen werden kann. Ziel ist die Ermittlung der minimalen Amortisationszeit.

Dynamische Verfahren sind komplexere Rechenverfahren, die den zeitlichen Ablauf der Investitionsvorgänge berücksichtigen. Dabei werden Zahlungsreihen auf einen bestimmten Betrachtungszeitraum (z.B. Nutzungs- oder Lebensdauer) über einen festgelegten Zinssatz abgezinst. Die verschiedenen Verfahren sind dabei Barwertmethode, Kapitalwertmethode und Annuitätsmethode.

Barwertmethode

Bei der Barwertmethode werden alle Auszahlungen für Kosten einer Investition bezogen auf einen Anfangszeitpunkt abgezinst. Dabei wird der Barwert der auflaufenden Kosten, einschließlich der Investitionskosten sowie der Restwert betrachtet. Ziel ist die Ermittlung des minimalen Barwertes der Kosten.

Kapitalwertmethode

Bei dieser Methode werden neben den Auszahlungen auch die Einzahlungen berücksichtigt und auf den Anfangszeitpunkt abgezinst. Dabei können statt der Einzahlungen auch Einsparungen angesetzt werden. Das Verfahren betrachtet alle mit einer Investition verbundenen Zahlungen und misst die Vorteilhaftigkeit an einem absoluten Wert, dem Kapitalwert.

Annuitätsmethode

Die Annuitätsmethode ist eine Variante der Barwert-, bzw. Kapitalwertmethode. Dabei wird der Barwert oder der Kapitalwert auf einen konstanten Zahlungswert, der Annuität, umgerechnet. Dieser stellt den durchschnittlichen Zahlungswert innerhalb des Betrachtungszeitraumes dar.

Außerdem existieren noch andere dynamische Investitionsrechnungsmöglichkeiten, auf hier jedoch nicht weiter eingegangen wird.

Die Auswahl des Verfahrens richtet sich nach der entsprechenden Investition, nach den bekannten Eingangswerten und den Anforderungen an das Ergebnis.

5.1 Begriffe Wirtschaftlichkeit

Abschreibung:

Die Abschreibung entspricht dem Geldbetrag zu Erfassung der Leistungs- und Wertminderung eines Wirtschaftsgutes.

Annuität:

Als Annuität bezeichnet man eine regelmäßige, jährliche Zahlung. Dabei werden Ein- und Auszahlungen unterschieden.

Barwert:

Der Barwert entspricht dem Wert, den eine zukünftig anfallende Zahlungsreihe in der Gegenwart besitzt.

Bedienung:

Unter Bedienung versteht man alle Arbeiten, welche für den reibungslosen Betrieb von Anlagen durchzuführen sind.

Instandhaltung:

Unter Instandhaltung werden alle Maßnahmen zusammengefasst, die zum Erhalt (Wartung) bzw. zur Wiederherstellung (Instandsetzung) des Soll-Zustandes sowie zur Beurteilung des Ist-Zustandes (Inspektion) einer Anlage nötig sind.

Nutzungsdauer:

Die Nutzungsdauer einer Anlage beginnt mit der ersten Inbetriebnahme und stellt einen Erfahrungswert dar. Die tatsächliche Dauer kann davon jedoch nach oben oder unten abweichen. Die angenommene Nutzungsdauer ist beendet, wenn der Aufwand und die Kosten für Instandsetzung und Wartung in keinem wirtschaftlichen Verhältnis zu einer Neuanschaffung stehen.

Restwert:

Der Restwert ist der Wert eines Objektes nach Ablauf des Betrachtungszeitraumes.

5.2 Investitionskosten

Variante 1 – Gasmotorwärmepumpe

Wärmepumpen:	2 x 125.000 €	Wärmetauscher:	122.000 €
Einbindung:	25.000 €	Regelung:	23.000 €
Rohrleitungen, Pumpen...:	30.000 €	Demontage/Montage:	13.000 €
Unvorhergesehenes:	10.000 €		

Somit ergeben sich Gesamtinvestitionskosten von 473.000 €. Diese werden auf die Hauptkomponenten verteilt.

Wärmepumpe:	338.000 €
Wärmetauscher:	135.000 €

Variante 4 – Wärmetransbaustein

BHKW:	161.000 €	Wärmepumpe:	118.000 €
Wärmetauscher:	155.000 €	Einbindung:	40.000 €
Regelung:	35.000 €	Rohrleitungen, Pumpen...:	40.000 €
Demontage/Montage:	13.000 €	Unvorhergesehenes:	10.000 €

Die sich ergebenden Gesamtinvestitionskosten von 572.000 € werden ebenfalls auf die Hauptkomponenten verteilt.

BHKW:	246.000 €
Wärmepumpe:	158.000 €
Wärmetauscher:	168.000 €

Variante 5 – BHKW

BHKW:	2 x 181.000 €	Einbindung:	54.000 €
Regelung:	28.000 €	Rohrleitungen, Pumpen...:	23.000 €
Demontage/Montage:	13.000 €	Unvorhergesehenes:	10.000 €

Damit ergeben sich Gesamtinvestitionskosten von 490.000 €, welche komplett als Hauptkomponente BHKW angesetzt werden.

5.3 Überschlägige Amortisationsrechnungen

Variante 1: Gasmotorwärmepumpe

Investitionssumme (vgl. S. 42): 473.000 €

Förderung BAFA – 10%: -47.300 €

Gesamteinsparung (vgl. S. 17): 108.603 €/a

Statische Amortisationszeit: $\frac{473.000 \text{ €} - 47.300 \text{ €}}{108.603 \text{ €/a}} = 3,9 \text{ a}$ (58)

Variante 4: Wärmetransbaustein

Investitionssumme (vgl. S. 42): 572.000 €

Gesamteinsparung (vgl. S. 29): 114.941 €/a

Statische Amortisationszeit: $\frac{572.000 \text{ €}}{114.941 \text{ €/a}} = 5,0 \text{ a}$ (59)

Variante 5: BHKW

Investitionssumme (vgl. S. 42): 490.000 €

Gesamteinsparungen (vgl. S. 38): 87.851 €/a

Statische Amortisationszeit: $\frac{490.000 \text{ €}}{87.851 \text{ €/a}} = 5,6 \text{ a}$ (60)

5.4 Begriffe und Formeln - Annuitätsberechnungen

Zinssatz:	$i = 6 \% / \text{Jahr}$
Zinsfaktor:	$q = i + 1 = 1,06$
Preisänderungssatz:	$j = 3,0\% / \text{Jahr}$
Preisänderungsfaktor:	$r = j + 1 = 1,03$
Betrachtungszeitraum:	T
Nutzungsdauer:	T_N

Annuitätsfaktor für nachschüssige Zahlungen im Zeitraum T:

$$a = \frac{q^T \times (q - 1)}{q^T - 1} \quad (61)$$

Barwertfaktor:

$$b = b_{nach} = \frac{q^T - r^T}{q^T \times (q - r)} = \frac{1 - \left(\frac{r}{q}\right)^T}{q - r} \quad (62)$$

(nachschüssige Zahlungen im Zeitraum T)

Preisdynamischer Annuitätsfaktor:

$$ba = b \times a = \frac{(q^T - r^T) \times (q - 1)}{(q - r) \times (q^T - 1)} \quad (63)$$

Barwert des Restwertes:

$$B_{RW} = A_0 \times \frac{T_N - T}{T_N} \times \frac{1}{q^T} \quad (64)$$

Annuität der kapitalgebundenen Kosten:

$$A_{N,K} = (A_0 - B_{RW}) \times a + \frac{f_K}{100} \times A_0 \times ba \quad (65)$$

Kosten für Wartung:

$$A_{B,Wart} = k_{Wart} \times t_{Bh} \quad (66)$$

Oder lt. VDI 2067-1:

$$A_{B,Wart} = A_0 \times \frac{f_w}{100} \quad (67)$$

Kosten für Bedienung: $A_{B,Bed} = k_{L,Bed} \times t_{Bed}$ (68)

Brennstoffenergiekosten: $A_{B,BrSt} = B_{E,BrSt} \times k_{Gas}$ (69)

Annuität der betriebsgebundenen Kosten:

$$A_{N,B} = (A_{B,W} + A_{B,B} + A_{B,BrSt}) \times ba \quad (70)$$

Annuität der Einzahlungen:

$$A_{N,E} = E \times ba \quad (71)$$

Gesamtannuität: $A_{N,Ges} = A_{N,E} - (A_{N,K} + A_{N,B})$ (72)

Der Betrachtungszeitraum wird allgemein mit T=15 Jahren angesetzt, da dies der kürzesten Lebensdauer einer Hauptkomponente entspricht.

Allgemeine Festlegungen:

Alle Lohnkosten für Bedienung u.ä. werden allgemein mit 35 €/h angenommen. Die Jahreskosten für Wartungen werden, nach den Angaben der Hersteller berechnet und den Wartungskosten nach VDI 2067 gleichgesetzt. Die Angabe der Preisänderung wird allgemein gültig mit 3% gesetzt und somit nicht zwischen verschiedenen Positionen unterschieden.

Bei der Ermittlung der kapitalgebunden Jahreskosten werden zur Vereinfachung nur die Hauptkomponenten Wärmepumpe, Wärmetauscher und BHKW unterschieden. Sonstige Kosten für Rohrleitungen, Regelungen... sind sinnvoll in die Hauptkomponenten integriert.

5.5 Annuitätsberechnungen

Berechnungen allgemein

Nach Gleichung 61:

$$a = \frac{1,06^{15} \times (1,06 - 1)}{1,06^{15} - 1} = 0,103$$

Nach Gleichung 62:

$$b = \frac{1,06^{15} - 1,03^{15}}{1,06^{15} \times (1,06 - 1,03)} = 11,664$$

Nach Gleichung 63:

$$ba = 11,664 \times 0,103 = 1,201$$

Angaben lt. VDI 2067-1:

Komponente	Nutzungsdauer	Instandhaltung	Wartung	Bedienung
Gasmotor-WP	15 a	3,0 %	1,5 %	40 h/a
strombetr.-WP	20 a	3,0 %	1,0 %	20 h/a
BHKW	15 a	6,0 %	2,0 %	100 h/a
Wärmetauscher	20 a	2,0 %	0,0 %	0 h/a

Die Angaben zu Instandhaltung und Wartung beziehen sich auf % der Investitionskosten pro Jahr und Komponente.

5.5.1 Gasmotorwärmepumpe

Betrachtungszeitraum 15a

Kosten

Bei den Investitionskosten der Anlage wird die Förderung lt. BAFA (10%) abgezogen (vgl. Gliederungspunkt 3.1).

Gasmotorwärmepumpen:

$$\text{Investitionskosten: } 338.000 \text{ €} - 33.800 \text{ €} = 304.200 \text{ €}$$

Wärmetauscher:

$$\text{Investitionskosten: } 135.000 \text{ €} - 13.500 \text{ €} = 121.500 \text{ €}$$

$$\text{Gesamtinvestition: } 304.200 \text{ €} + 121.500 \text{ €} = 425.700 \text{ €}$$

Restwert Wärmetauscher nach 15 Jahren:

Nach Gleichung 64:

$$B_{RW} = 135.000 \text{ €} \times \frac{20-15}{20} \times \frac{1}{1,06^{15}} = 14.083 \text{ €}$$

Annuität der kapitalgebundenen Kosten:

Nach Gleichung 65:

Wärmepumpe:

$$A_{N,K} = (304.200 \text{ €} - 0 \text{ €}) \times 0,103 = 31.333 \text{ €/a}$$

Die anteiligen Kosten für Instandsetzung Gasmotorwärmepumpen entfallen, da diese in der Vollwartung integriert sind.

Wärmetauscher:

$$A_{N,K} = (121.500 \text{ €} - 14.083 \text{ €}) \times 0,103 + \frac{2}{100} \times 121.500 \text{ €} \times 1,201 = 16.206 \text{ €/a}$$

Gesamtannuität der kapitalgebundenen Kosten:

$$A_{N,K,ges} = 31.333 \text{ €/a} + 16.206 \text{ €/a} = 47.539 \text{ €/a}$$

Die Wartungskosten werden lt. Hersteller mit ca. 1.500 € pro Quartal und Aggregat angegeben.

Lt. Hersteller: $A_{B,Wart} = 12.000 \text{ €/a}$

Nach Gleichung 68:

$$A_{B,Bed} = 35 \text{ €/Bh} \times 40 \text{ h/a} \times 2 = 2.800 \text{ €/a}$$

Nach Gleichung 69:

$$A_{B,BrSt} = 2.232.000 \text{ kWh/a} \times 0,056 \text{ €/kWh} = 124.992 \text{ €/a}$$

Nach Gleichung 70:

$$A_{N,B} = (12.000 \text{ €/a} + 2.800 \text{ €/a} + 124.992 \text{ €/a}) \times 1,201 = 167.890 \text{ €/a}$$

Einnahmen

Einnahmen durch Betrieb Gasmotorwärmepumpen vgl. S. 17:

Nach Gleichung 71:

$$A_{N,E} = 245.595 \text{ €/a} \times 1,201 = 294.960 \text{ €/a}$$

Gesamtannuität Gasmotorwärmepumpe

Nach Gleichung 72:

$$A_{N,Ges} = 294.960 \text{ €/a} - (47.539 \text{ €/a} + 167.890 \text{ €/a}) = 79.531 \text{ €/a}$$

5.5.2 Wärmetransbaustein

Betrachtungszeitraum 15a

Kosten

BHKW:

Investitionskosten: 246.000 €

Wärmepumpe:

Investitionskosten: 158.000 €

Wärmetauscher:

Investitionskosten: 168.000 €

Gesamtinvestition: 246.000 € + 158.000 € + 168.000 € = 572.000 €

Restwert Wärmetauscher nach 15 Jahren:

Nach Gleichung 64:

$$B_{RW} = 168.000 \text{ €} \times \frac{20-15}{20} \times \frac{1}{1,06^{15}} = 17.525 \text{ €}$$

Restwert Wärmepumpe mit Zubehör nach 15 Jahren:

Nach Gleichung 64:

$$B_{RW} = 158.000 \text{ €} \times \frac{20-15}{20} \times \frac{1}{1,06^{15}} = 16.482 \text{ €}$$

Annuität der kapitalgebundenen Kosten:

Nach Gleichung 65:

BHKW + Zubehör:

$$A_{N,K} = (246.000 \text{ €} - 0 \text{ €}) \times 0,103 = 25.338 \text{ €/a}$$

Die anteiligen Kosten für Instandsetzung BHKW entfallen, da diese in der Vollwartung integriert sind.

Wärmepumpe:

$$A_{N,K} = (158.000 \text{ €} - 16.482 \text{ €}) \times 0,103 + \frac{3}{100} \times 158.000 \text{ €} \times 1,201 = 20.269 \text{ €/a}$$

Wärmetauscher:

$$A_{N,K} = (168.000 \text{ €} - 17.525 \text{ €}) \times 0,103 + \frac{2}{100} \times 168.000 \text{ €} \times 1,201 = 19.534 \text{ €/a}$$

Gesamtannuität der kapitalgebundenen Kosten:

$$A_{N,K,ges} = 25.338 \text{ €/a} + 20.269 \text{ €/a} + 19.534 \text{ €/a} = 65.141 \text{ €/a}$$

Wartung BHKW lt. Herstellerangaben

Nach Gleichung 66:

$$A_{B,Wart} = 4,95 \text{ €/Bh} \times 5.981 \text{ Bh} = 29.606 \text{ €/a}$$

Dies entspricht der Vollwartung, inklusive Inspektion, Wartung, Instandsetzung und Schmieröl.

Wartung Wärmepumpe

Nach Gleichung 67:

$$A_{B,Wart} = 158.000 \text{ €} \times \frac{1}{100} = 1.580 \text{ €/a}$$

Bedienung BHKW

Nach Gleichung 68:

$$A_{B,Bed} = 35 \text{ €/h} \times 100 \text{ h/a} = 3.500 \text{ €/a}$$

Bedienung Wärmepumpe

Nach Gleichung 68:

$$A_{B,Bed} = 35 \text{ €/h} \times 20 \text{ h/a} = 700 \text{ €/a}$$

Nach Gleichung 69:

$$A_{B,BrSt} = 2.344.000 \text{ kWh/a} \times 0,056 \text{ €/kWh} = 131.264 \text{ €/a}$$

Nach Gleichung 70:

$$A_{N,B} = (31.186 \text{ €/a} + 4.200 \text{ €/a} + 131.264 \text{ €/a}) \times 1,201 = 200.147 \text{ €/a}$$

Einnahmen

Einnahmen durch Betrieb Wärmetransbaustein – vgl. S.28:

Nach Gleichung 71:

$$A_{N,E} = 255.087 \text{ €/a} \times 1,201 = 306.359 \text{ €/a}$$

Gesamtannuität

Nach Gleichung 72:

$$A_{N,Ges} = 306.359 \text{ €/a} - (65.141 \text{ €/a} + 200.147 \text{ €/a}) = 41.071 \text{ €/a}$$

5.5.3 BHKW

Betrachtungszeitraum T=15a

Kosten

BHKW mit Zubehör:

Investitionskosten: 490.000 €

Nach Gleichung 65:

$$A_{N,K} = 490.000 \text{ €} \times 0,103 = 50.470 \text{ €/a}$$

Die anteiligen Kosten für Instandsetzung entfallen, da diese in der Vollwartung integriert sind.

Nach Gleichung 66:

$$A_{B,Wart} = 9,90 \text{ €/h} \times 5.040 \text{ h} = 49.898 \text{ €/a}$$

Dies entspricht der Vollwartung, inklusive Inspektion, Wartung, Instandsetzung und Schmieröl.

Nach Gleichung 68:

$$A_{B,Bed} = 35 \text{ €/h} \times 100 \text{ h/a} \times 2 = 7.000 \text{ €/a}$$

Nach Gleichung 69:

$$A_{B,BrSt} = 6.744.000 \text{ kWh/a} \times 0,056 \text{ €/kWh} = 377.664 \text{ €/a}$$

Nach Gleichung 70:

$$A_{N,B} = (49.898 \text{ €/a} + 7.000 \text{ €/a} + 377.664 \text{ €/a}) \times 1,201 = 521.909 \text{ €/a}$$

Einnahmen

Einnahmen durch Betrieb der BHKW – vgl. S. 37:

Nach Gleichung 71:

$$A_{N,E} = 480.752 \text{ €/a} \times 1,201 = 577.383 \text{ €/a}$$

Gesamtannuität

Nach Gleichung 72:

$$A_{N,Ges} = 577.383 \text{ €/a} - (50.470 \text{ €/a} + 521.909 \text{ €/a}) = 5.004 \text{ €/a}$$

Zusammenstellung der Ergebnisse

	Variante 1	Variante 4	Variante 5
	Gasmotor- wärmepumpe	Wärmetrans- baustein	Blockheiz- kraftwerk
Amortisationsberechnung			
Investitionskosten	473.000 €	572.000 €	490.000 €
Förderungen	47.300 €	-	-
Betriebskosten	136.992 €/a	160.870 €/a	427.560 €/a
Einsparungen	245.595 €/a	275.811 €/a	515.411 €/a
Amortisationszeit (überschlägig)	3,9 a	5,0 a	5,6 a
Annuitätsberechnungen			
Zinssatz	6 %/a		
Preisänderungssatz	3 %/a		
Betrachtungszeitraum	15 a		
Kapitalgebundene Annuität	47.539 €/a	65.141 €/a	50.470 €/a
Betriebsgebundene Annuität (Bedienung, Wartung, Brennstoff)	167.890 €/a	200.147 €/a	521.909 €/a
Annuität der Einzahlungen (Einsparungen)	294.960 €/a	306.359 €/a	577.383 €/a
Gesamtannuität	79.531 €/a	41.071 €/a	5.004 €/a

Tab. 1: Gegenüberstellung der Ergebnisse

Die Gesamtannuitäten der Varianten umfassen die theoretisch erreichbaren, jährlichen Einsparungen im Vergleich zur Bestandsanlage. Da diese Werte positiv sind, kann man erkennen, dass die Gesamteinsparungen durch den Betrieb höher sind als die Betriebskosten. Je höher die Gesamtannuität, desto wirtschaftlicher ist die entsprechende Anlage realisierbar.

5.6 Auswertung nach Kosten

Auf Grund der positiven Gesamtannuitäten kann man erkennen, dass die drei Varianten wirtschaftlich realisierbar sind. Dabei liegt die Gasmotorwärmepumpe vor der Variante Wärmetransbaustein und BHKW. Dies bestätigt die Tendenz nach der überschlägigen Amortisationsrechnung.

Die Variante des Einsatzes von BHKW (Variante 5) besitzt die niedrigste Annuität der untersuchten Varianten. Das lässt sich einerseits durch den Wegfall des KWK-Bonus nach 30.000 Betriebsstunden erklären, da dieser auf Grund der hohen elektrischen Leistung der BHKW einen hohen Anteil an den jährlichen Einsparungen hat. Auf der anderen Seite sind die niedrigen Bezugspreise für Brennstoff und Elektrizität im vorliegenden Projekt ausschlaggebend, da dies die Einsparungen durch Eigennutzung verringert.

Obwohl sich die Variante 5 (BHKW) nach der überschlägigen Amortisationsrechnung bereits nach wenigen Jahren amortisieren müsste, besitzt sie dennoch eine sehr niedrige Gesamtannuität. Der KWK-Bonus wird bei der Amortisationsrechnung komplett eingerechnet, da die kürzeste Amortisationszeit ermittelt werden soll. Bei der Annuitätsberechnung hingegen werden die jährlichen Zahlungen über den gesamten Betrachtungszeitraum betrachtet, wodurch der KWK-Bonus nur anteilig in die Berechnung eingeht. Ein direkter Vergleich beider Ergebnisse ist demnach nicht möglich.

5.7 Auswertung nach ökologischen Gesichtspunkten

Aus ökologischer Sicht würden die Varianten bevorzugt, welche die höchsten Einsparungen von Brennstoff ermöglichen, da eine Einsparung von Brennstoff auch eine Verminderung der CO₂-Emissionen bewirkt. Weiterhin wird beim Betrieb von BHKW der Netzbezug von elektrischer Energie vermindert. Dadurch werden die CO₂-Emissionen bei Erzeugung durch ein Kraftwerk vermindert.

Bei einem Vergleich der Bestandsanlage mit den drei Varianten wird deutlich, dass mit jeder Variante die CO₂-Emissionen reduziert werden können.

Durch die Verbrennung von Erdgas werden ca. 200 g/kWh CO₂ frei, bei der Erzeugung von Elektroenergie, dem so genannten Strommix etwa 620 g/kWh (Deutschlanddurchschnitt).

Als Vergleichswert wird der Brennstoffbedarf der Bestandsanlage angesetzt und dem Brennstoffbedarf der Varianten gegenübergestellt. Bei Einsatz der BHKW (Variante 5) wird zusätzlich die Stromerzeugung angesetzt, da diese durch den eingesetzten Brennstoff mit zur Verfügung gestellt wird.

Als Bezug dient der Brennstoffenergiebedarf zur Erzeugung von 75% des Gesamtwärmebedarfes des Objektes angesetzt (3.750 MWh/a).

Bestandsanlage:

Brennstoffenergiebedarf: 4.167 MWh/a (nach Gl. 12)

CO₂-Emission: $4.167 \text{ MWh/a Gas} \times 200 \text{ g/kWh} = 833,4 \text{ t/a}$

Variante 1 (Gasmotorwärmepumpen)

Brennstoffenergiebedarf: 2.232 MWh/a (nach Gl. 11)

CO₂-Emission: $2.232 \text{ MWh/a Gas} \times 200 \text{ g/kWh} = 446,4 \text{ t/a}$

Einsparungen durch Einsatz der Gasmotorwärmepumpen:

$$883,4 \text{ t/a} - 446,6 \text{ t/a} = 386,8 \text{ t/a eingespartes CO}_2$$

Variante 4 (Wärmetransbaustein)

Brennstoffenergiebedarf: 2.344 MWh/a (nach Gl. 26)

CO₂-Emission: $2.344 \text{ MWh/a Gas} \times 200 \text{ g/kWh} = 468,8 \text{ t/a}$

Einsparungen durch Einsatz des Wärmetransbaustein:

$$883,4 \text{ t/a} - 468,8 \text{ t/a} = 364,6 \text{ t/a eingespartes CO}_2$$

Variante 5 (BHKW)

Brennstoffenergiebedarf: 6.744 MWh/a (nach Gl. 39)

CO₂-Emission: $6.744 \text{ MWh/a Gas} \times 200 \text{ g/kWh} = 1.348,8 \text{ t/a}$

Variante 5 – Einsparungen durch Erzeugung von Elektroenergie:

Erzeugung: 2.389 MWh/a (nach Gl. 38)

Einsparungen: $2.389 \text{ MWh/a} \times 620 \text{ g/kWh} = 1.481,2 \text{ t/a CO}_2$

Einsparungen durch Einsatz der Blockheizkraftwerke:

$$883,4 \text{ t/a} - 1.348,8 \text{ t/a} + 1.481,2 \text{ t/a} = 1.015,8 \text{ t/a eingespartes CO}_2$$

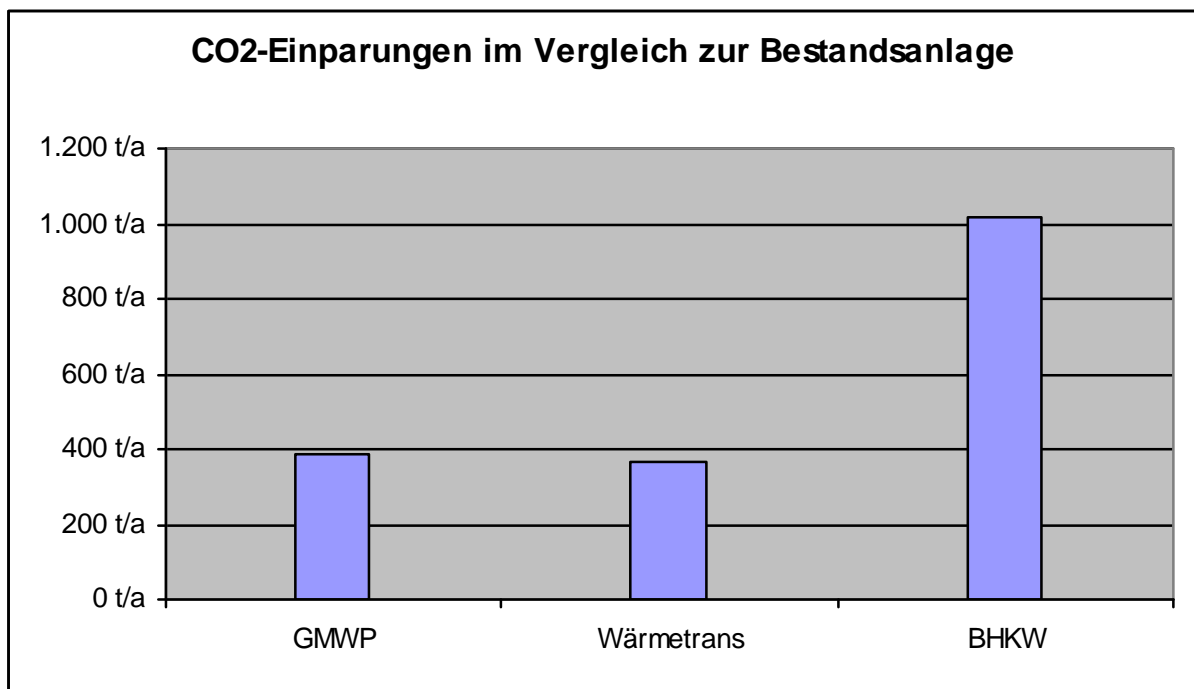


Abb. 6: Vergleich der Reduzierung der CO₂-Emissionen

Durch den Einsatz der BHKW wäre demnach die Reduzierung der CO₂-Emissionen am höchsten. Die hohen Einsparungen resultieren aus der parallelen Erzeugung von Elektroenergie, da in Deutschland der Strommix mit durchschnittlich 620 g/kWh CO₂-Emission angesetzt wird.

Da auch die anderen Varianten eine Verminderung der CO₂-Emissionen im Vergleich zur Bestandsanlage ermöglichen, sind diese ebenfalls als ökologisch einsetzbar anzusehen.

6. Schlussbetrachtungen

Obwohl auf dem Markt eine Vielzahl von Anlagen existiert, welche eingesetzt werden könnten um Betriebskosten einzusparen, ist es dennoch kompliziert, eine projektspezifische Alternative zu projektieren. Dies liegt auf der einen Seite an der hohen benötigten Leistung, auf der anderen Seite an den Voraussetzungen für die einzelnen Konzepte.

Oftmals scheitern derartige Analysen und Projekte am Markt, da Anlagen im höheren Leistungsspektrum meist nicht erhältlich oder entsprechende Einzelanfertigungen mit dementsprechend hohen Investitionskosten verbunden sind. Dennoch zeigt diese Erarbeitung, dass derartige Anlagen umsetzbar und auch wirtschaftlich realisierbar sind.

Die Nachfrage nach alternativen Anlagensystemen mit hohen Leistungen steigt ständig an, was durch die immer weiter steigenden Energiepreise zu erklären ist. Deshalb versuchen immer mehr Anbieter alternative Systeme auf dem Markt zu etablieren. Projektspezifisch amortisieren sich diese Anlagen, trotz der hohen Investitionskosten, meist nach wenigen Betriebsjahren, was ebenso das Potential derartiger Anlagen widerspiegelt.

6.1 Auswertung der Ergebnisse

Von den fünf betrachteten Alternativen zur bestehenden Heizungsanlage der Kaserne Marienberg wurden zwei nicht weiter betrachtet, da die benötigten Voraussetzungen nicht gewährleistet werden können. Der Einsatz von Absorptionswärmepumpen, Variante 2 und Variante 3, setzen ein zu hohes Energieniveau der Wärmequelle voraus, was ohne den Betrieb der vorhandenen Heizkessel nicht realisierbar ist.

Die anderen Varianten sind einsetzbar, wobei auf Grund der hohen benötigten Leistung meist mehrere Module eingesetzt werden müssen.

Sowohl nach den Kosten als auch nach ökologischen Gesichtspunkten wäre der Einsatz von Gasmotorwärmepumpen empfehlenswert, wobei in Zusammenarbeit mit entsprechenden Herstellern eine objektspezifische Anlage erstellt werden muss.

Alternativ dazu ist auch der Einsatz des Wärmetrans als wirtschaftliche Variante anzusehen.

Der Einsatz der BHKW (Variante 5) ist aus Kostengründen nicht empfehlenswert, wobei im Vergleich zur Bestandsanlage mit Einsparungen in den Betriebskosten zu rechnen ist, welche jedoch von Jahr zu Jahr schwanken werden. Die Wahrscheinlichkeit, die Betriebskosten der Bestandsanlage zeitweise zu überschreiten, ist dabei nicht auszuschließen.

Vergleich der Ergebnisse

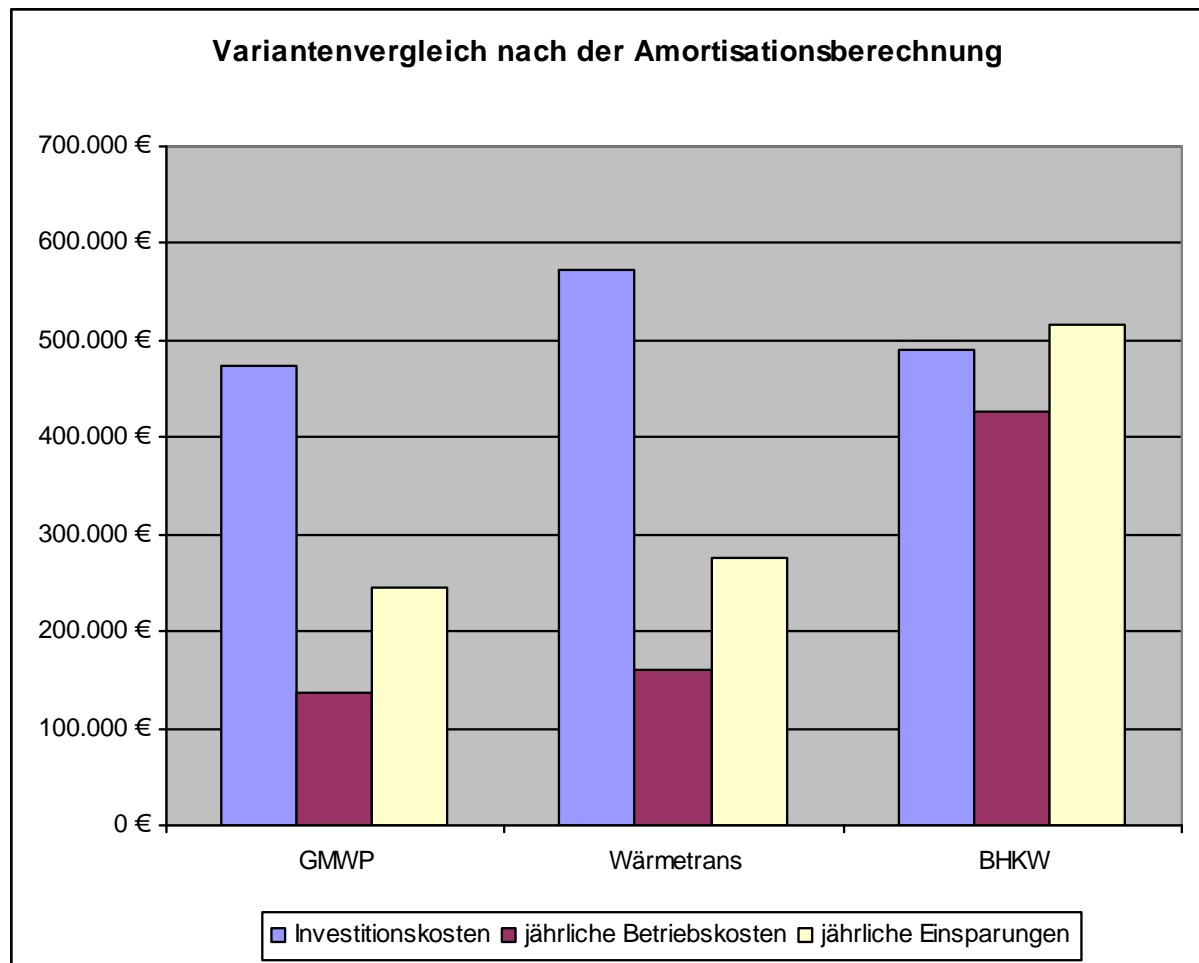


Abb. 7: Variantenvergleich

Abb. 7 stellt die Kosten der drei verglichenen Varianten gegenüber. Dabei ist erkennbar, dass beim Einsatz der BHKW mit den höchsten Gesamteinsparungen zu rechnen ist, was durch die Einspeisung bzw. die Eigennutzung der Elektroenergie zu erklären ist. Die hohen Betriebskosten resultieren aus dem hohen Brennstoffbedarf bzw. aus den Wartungskosten der BHKW.

Die Varianten Gasmotorwärmepumpe und Wärmetrans sind sowohl in den jährlichen Einsparungen als auch in den Betriebskosten vergleichbar.

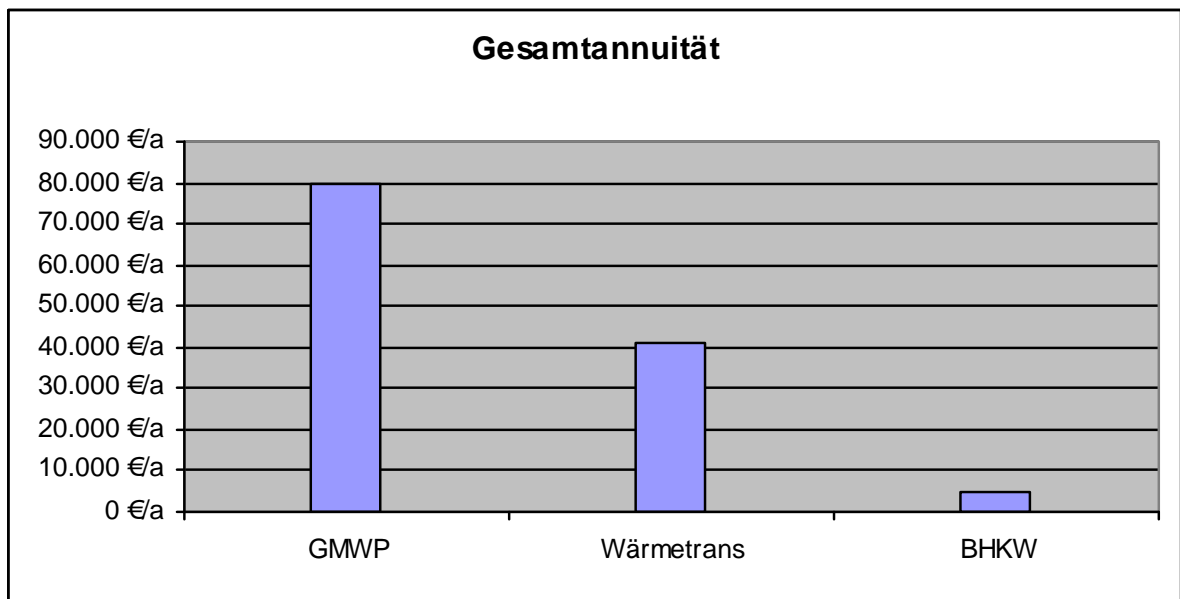


Abb. 8: Vergleich der Gesamtannuität

Beim Vergleich der Systemvarianten nach Abbildung 8 besitzt die Variante Gasmotorwärmepumpe die höchste Annuität, der drei betrachteten Systeme. Das lässt sich durch die niedrigeren Investitionskosten, als auch durch die niedrigsten Betriebskosten im Vergleich zu den anderen Varianten erklären. Variante 5 (BHKW) hat auf Grund der höchsten Betriebskosten aller Varianten die niedrigste Annuität. Weiterhin negativ auf die Annuität der Varianten mit BHKW wirken sich die hohen Wartungskosten aus.

6.2 Auswahl der Vorzugsvariante

Nach Auswertung der Ergebnisse, ist der Einsatz der Gasmotorwärmepumpen als Vorzugsvariante anzusehen. Alternativ kann auch der Wärmetransbaustein sehr wirtschaftlich eingesetzt werden. Aus Kostengründen ist vom Betrieb der BHKW unter der vorgegebenen Voraussetzungen abzuraten, besonders da die Einsparungen im Vergleich zur Bestandsanlage sehr gering ausfallen bzw. nach den Berechnungen nicht garantiert werden können.

Aus rein ökologischer Sicht ist der Einsatz der BHKW als Vorzugsvariante anzusehen, da dabei mit der höchsten Verminderung der CO₂-Emissionen zu rechnen ist.

- Leerseite -

Anlagenverzeichnis

- Anlage 1: Bestand – Heizhaus Kaserne Marienberg
- Anlage 2: Grundriss Heizhaus unter Einsatz Gasmotorwärmepumpen
- Anlage 3: Grundriss Heizhaus unter Einsatz Wärmetransbaustein
- Anlage 4: Grundriss Heizhaus unter Einsatz BHKW
- Anlage 5: Funktionsschema Gasmotorwärmepumpen – Sommerbetrieb
- Anlage 6: Funktionsschema Gasmotorwärmepumpen – Winterbetrieb
- Anlage 7: Funktionsschema Wärmetransbaustein – Sommerbetrieb
- Anlage 8: Funktionsschema Wärmetransbaustein - Winterbetrieb
- Anlage 9: Funktionsschema BHKW

Quellenangabe

- [RSS07] Recknagel / Sprenger / Schramek: *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik*, 73. Auflage, Oldenbourg Industrieverlag, München, 2007
- [POH05] Pohlmann: *Taschenbuch der Kältetechnik*, 18. Auflage, C.F. Müller Verlag, Heidelberg 2005
- [GÜN05] Günther u.a.: *Anlagenmechanik für Sanitär-, Heizungs- und Klimatechnik*, 3. Auflage, Westermann Druck GmbH, Braunschweig 2005
- [TS07] Tiator, Schenker: *Wärmepumpen / Wärmepumpenanlagen*, 1. Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg 2007
- [KWK08] Gesetz zur Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung, Juni 2008
- VDI 2067-1 Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Teil1 : Grundlagen und Kostenberechnung, September 2000

Internetquellen

- [SOK08] Sokratherm: *EEX Auktionsmarkt – Durchschnittlicher Preis für Baseload-Strom an der EEX je Quartal*, online im Internet:
http://www.sokratherm.de/02_aktuelles/pdf/EEX_Auktionsmarkt.pdf
Stand: Juli 2008
- [ASU05] ASUE: *Steuervorteile für Gasklimageräte*, online in Internet:
http://www.asue.de/images/veroeff_pdf/gasklimasteuer.pdf
Stand: Dez 2005

- [BAF08] BAFA: *Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt*, online im Internet:
http://www.bafa.de/bafa/de/energie/erneuerbare_energien/vorschriften-/energie_ee_richtlinie_2008.pdf
Stand: Dez 2007
- [WIK08] Wikipedia – Die freie Enzyklopädie: *Erdgas*, online im Internet:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Erdgas>
Stand: Jul 2008
- [ASU02] ASUE: *Gaswärmepumpen*, online im Internet:
http://www.asue.de/veroff/g_w_pump/image/g_w_pump.pdf
Stand: Dez 2002
- [BUD04] Buderus: *Planungsunterlage Erdgas-BHKW Loganova BHKW-Modul*, online im Internet: http://www.buderus.de/sixcms/media.php/1116-/p_loganova_bhkw_11_2004.pdf
Stand: Nov 2004

Ehrenwörtliche Erklärung

„Hiermit erkläre ich ehrenwörtlich“,

1. dass ich meine Diplomarbeit mit dem Thema

Wirtschaftliche Systemoptimierung der bestehenden Heizungsanlage der Kaserne Marienberg inklusive Untersuchung des Einsatzes erneuerbarer Energien

ohne fremde Hilfe angefertigt habe,

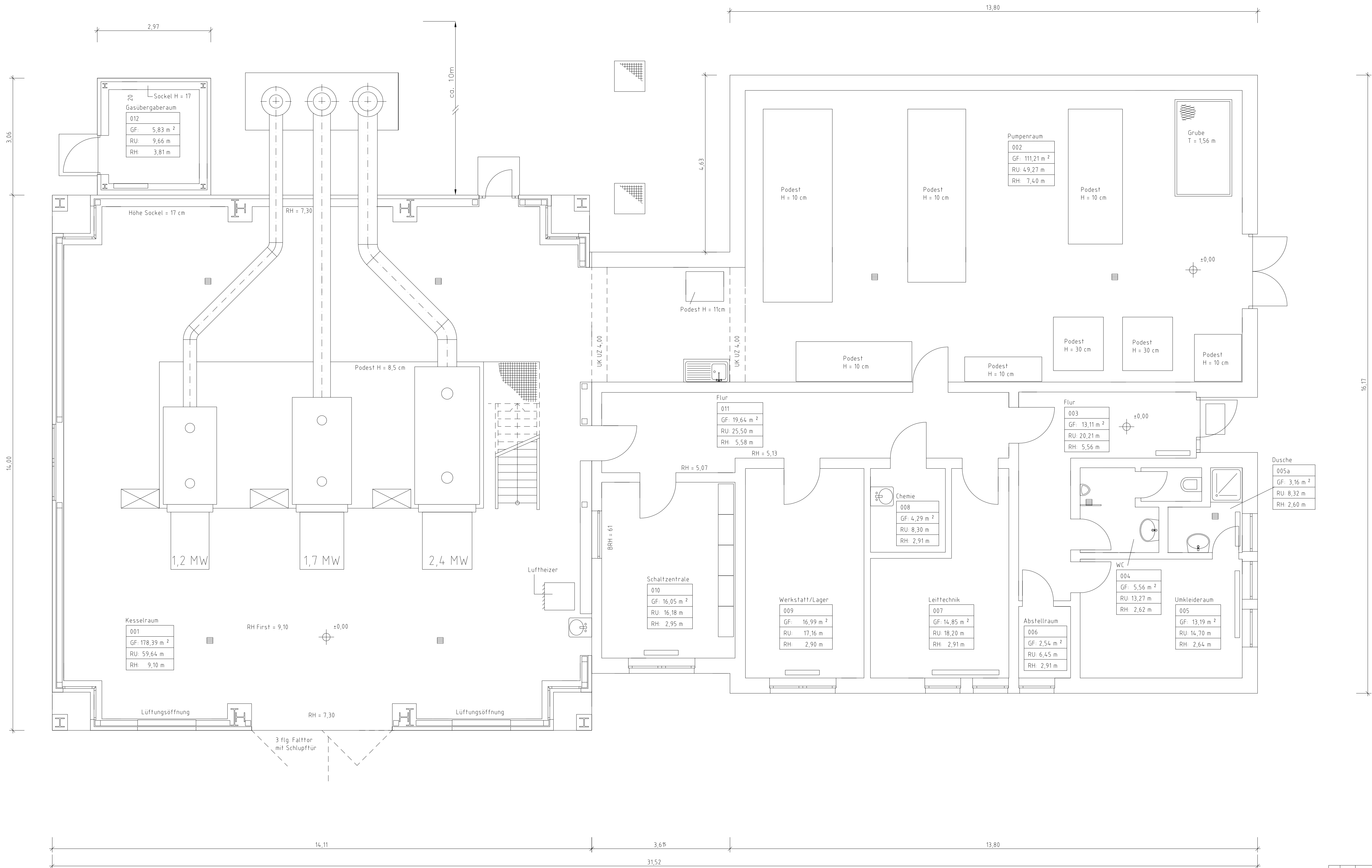
2. dass ich die Übernahme wörtlicher Zitate sowie die Verwendung der Gedanken anderer Autoren an den entsprechenden Stellen innerhalb der Arbeit gekennzeichnet habe und
3. dass ich meine Diplomarbeit bei keiner anderen Prüfung vorgelegt habe.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

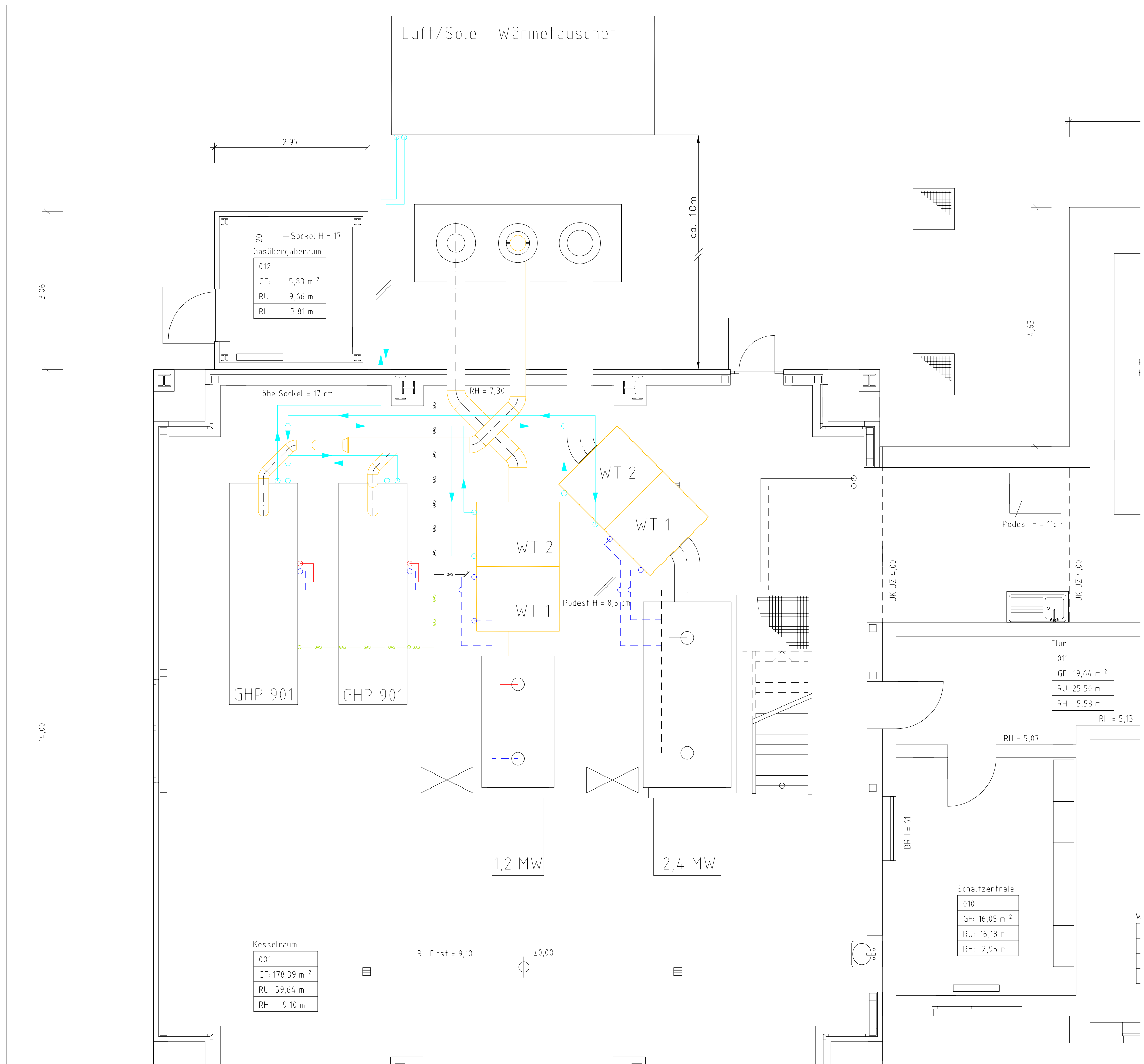
Ort, Datum

Unterschrift

- Leerseite -

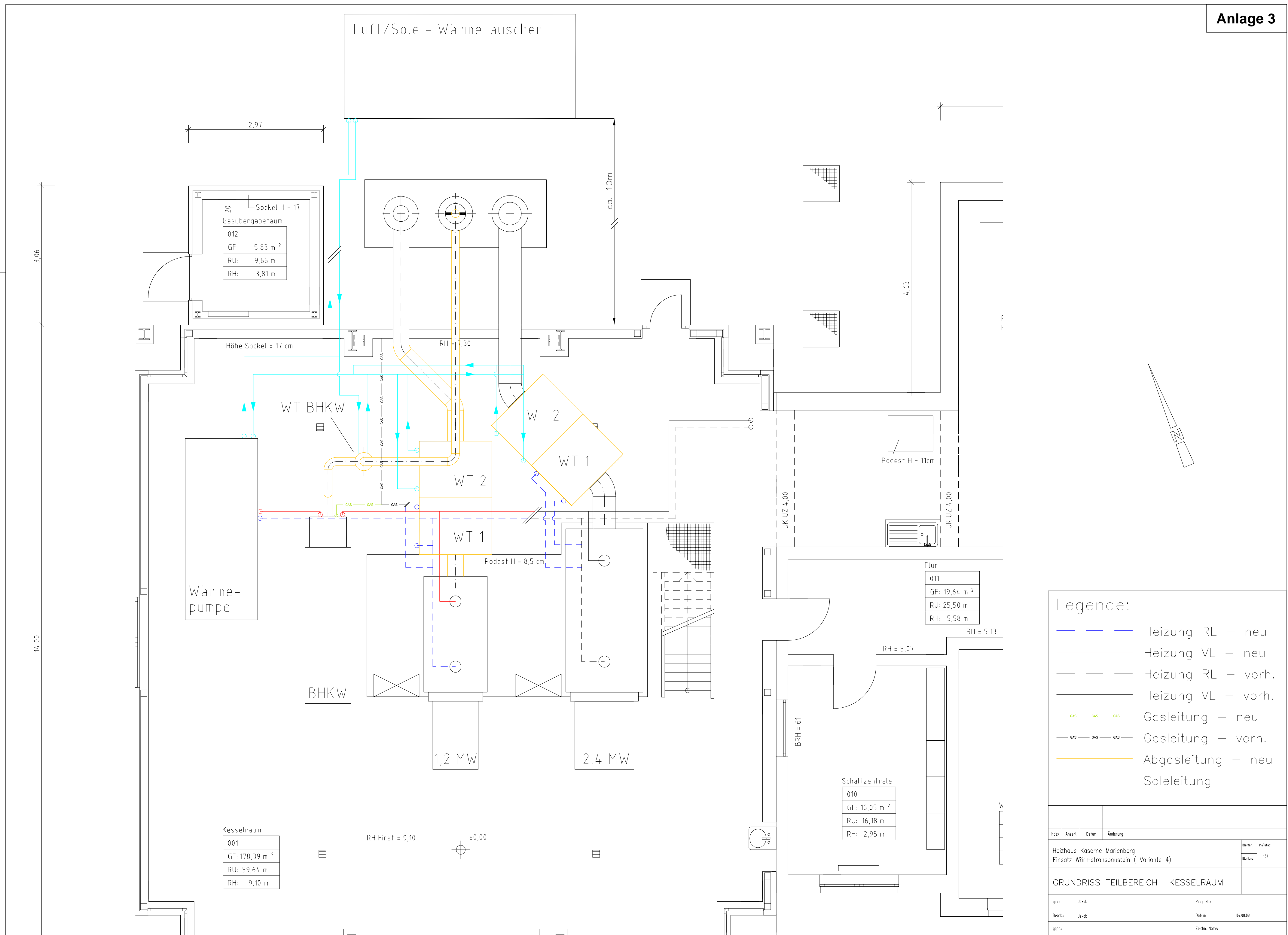


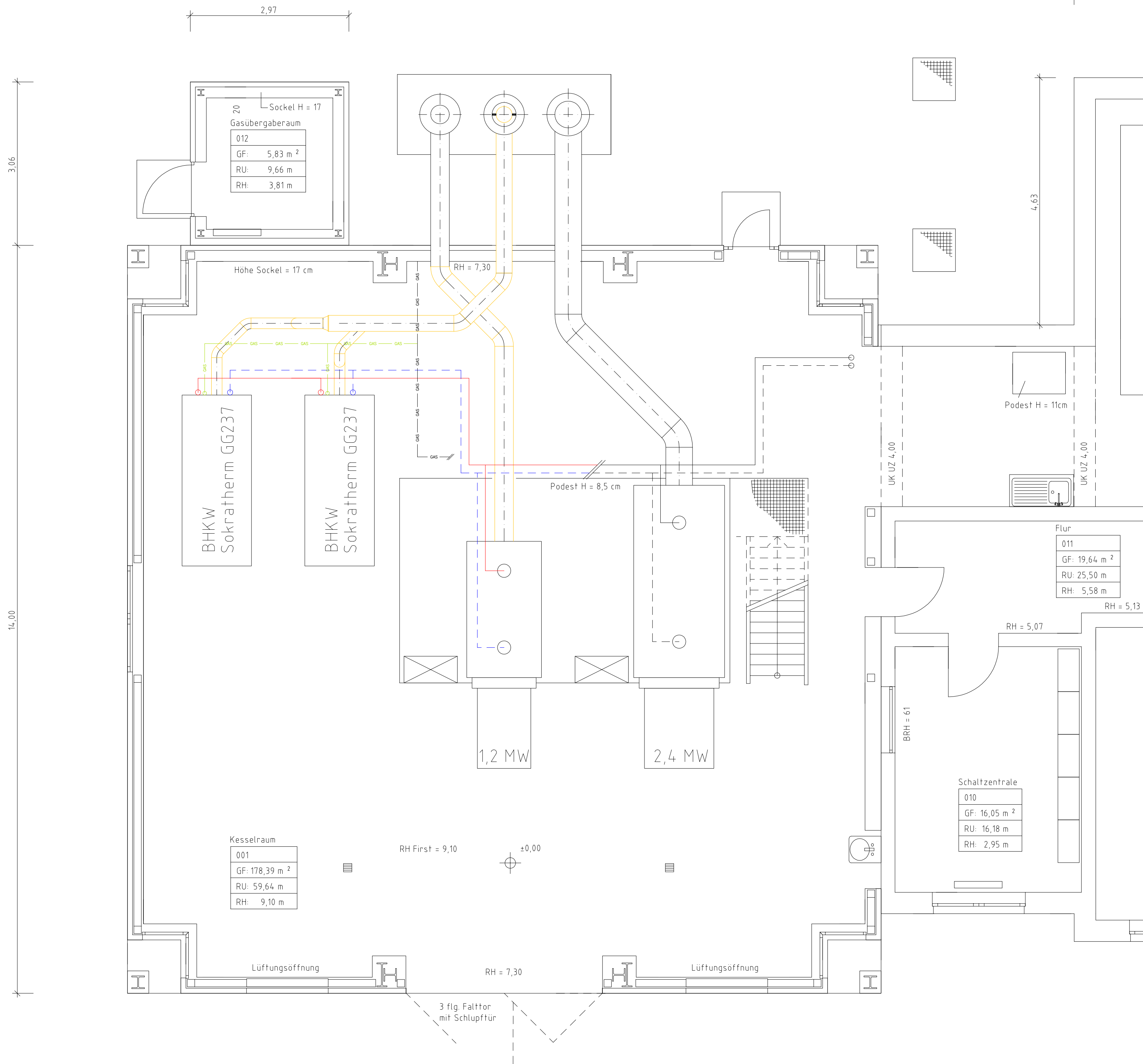
Index	Anzahl	Datum	Änderung	Datum	Index
Heizhaus Kaserne Marienberg				Datum	Index
Bestand Heizkessel				Datum	Index
GRUNDRISS TEILBEREICH KESSELRAUM					
git:	Jakob	Proj.-Nr.:			
Beurh:	Jakob	Datum			
ggr:		Zeichn.-Name:			



- Legende:
- Heizung RL – neu
 - Heizung VL – neu
 - Heizung RL – vorh.
 - Heizung VL – vorh.
 - Gasleitung – neu
 - Gasleitung – vorh.
 - Abgasleitung – neu
 - Soleleitung

Index	Anzahl	Datum	Änderung		
Heizhaus Kaserne Marienberg Einsatz GWP (Variante 1)				Blattnr. Blattanz.	Malzahl: 150
GRUNDRISS TEILBEREICH KESSELRAUM					
gez.: Jakob		Proj.-Nr.:			
Bearb.: Jakob		Datum:		04.08.08	
gepr.:		Zeichn.-Name:			





Legende:

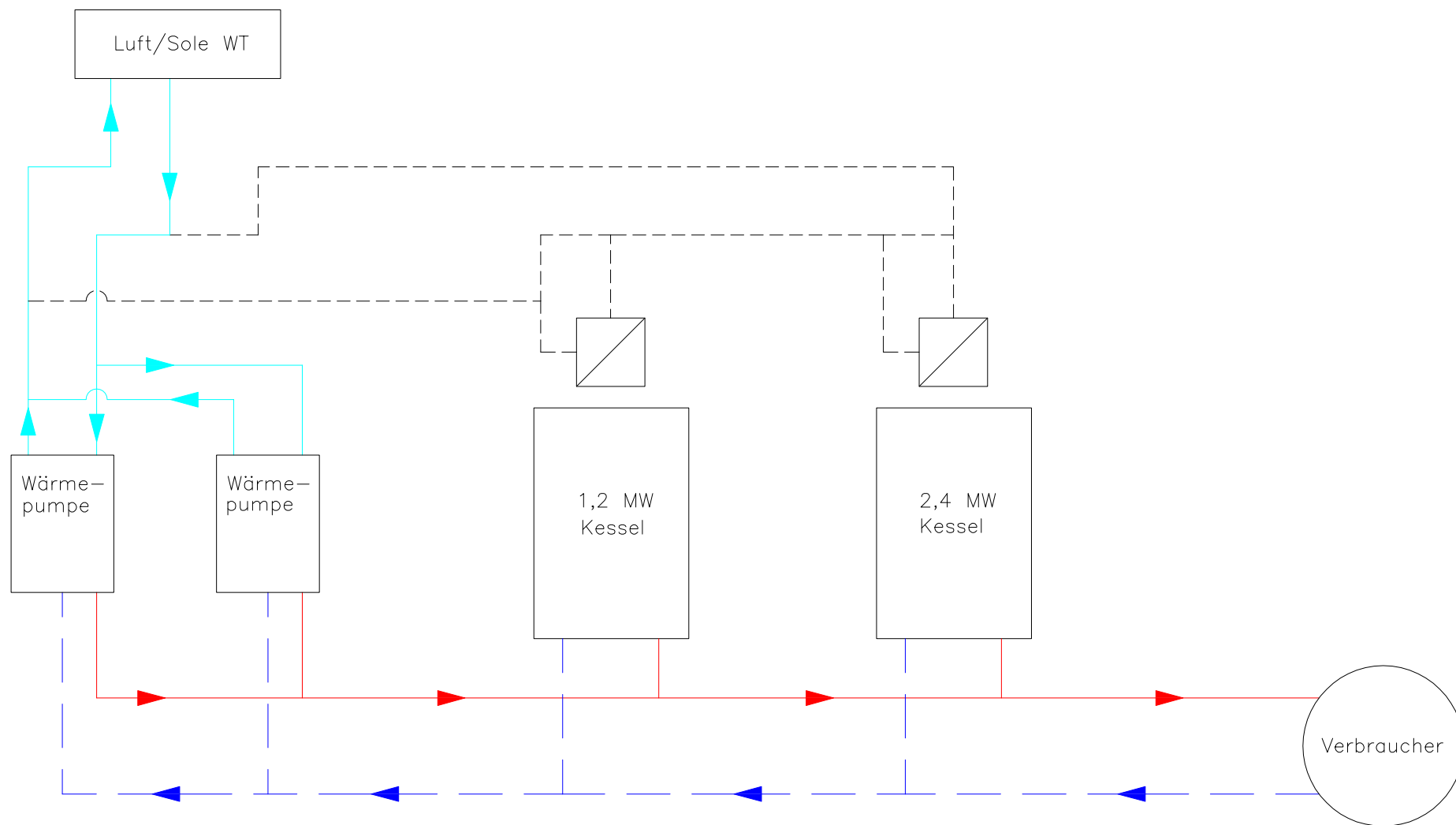
- Heizung RL – neu
- Heizung VL – neu
- Heizung RL – vorh.
- Heizung VL – vorh.
- Gasleitung – neu
- Gasleitung – vorh.
- Abgasleitung – neu

Index	Anzahl	Datum	Änderung

Heizhaus Kaserne Marienberg Einsatz BHKW (Variante 5)		Blattnr.	Maltnr.
		Blattanz.	150

GRUNDRISS TEILBEREICH KESSELRAUM

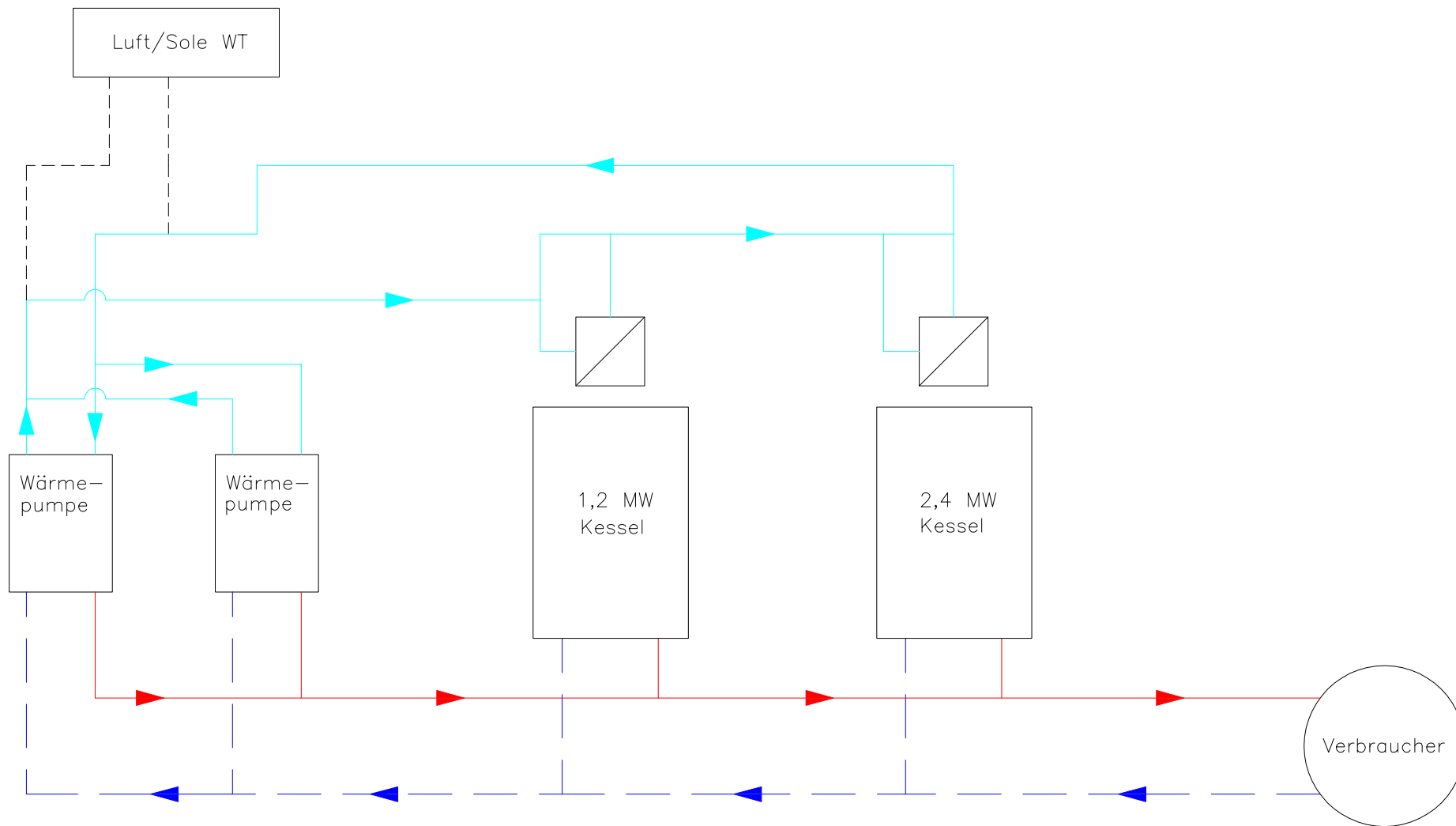
gez.:	Jakob	Proj.-Nr.:	
Bearb.:	Jakob	Datum:	04.08.08
gepr.:		Zeichn.-Name:	



Legende

—	Vorlauf		Abgaswärmetauscher
- - -	Rücklauf		
- - -	Solekreislauf		
—	Solekreislauf – Sommerbetrieb		

Index	Anzahl	Datum	Änderung
Funktionsschema – Sommer			
Variante 1 – Gasmotorwärmepumpe			Maßstab: ohne
gez.:	Jakob	Proj.-Nr.:	
bearb.:	Jakob	Datum:	04.08.08
gepr.:		Zeichn.-Name:	

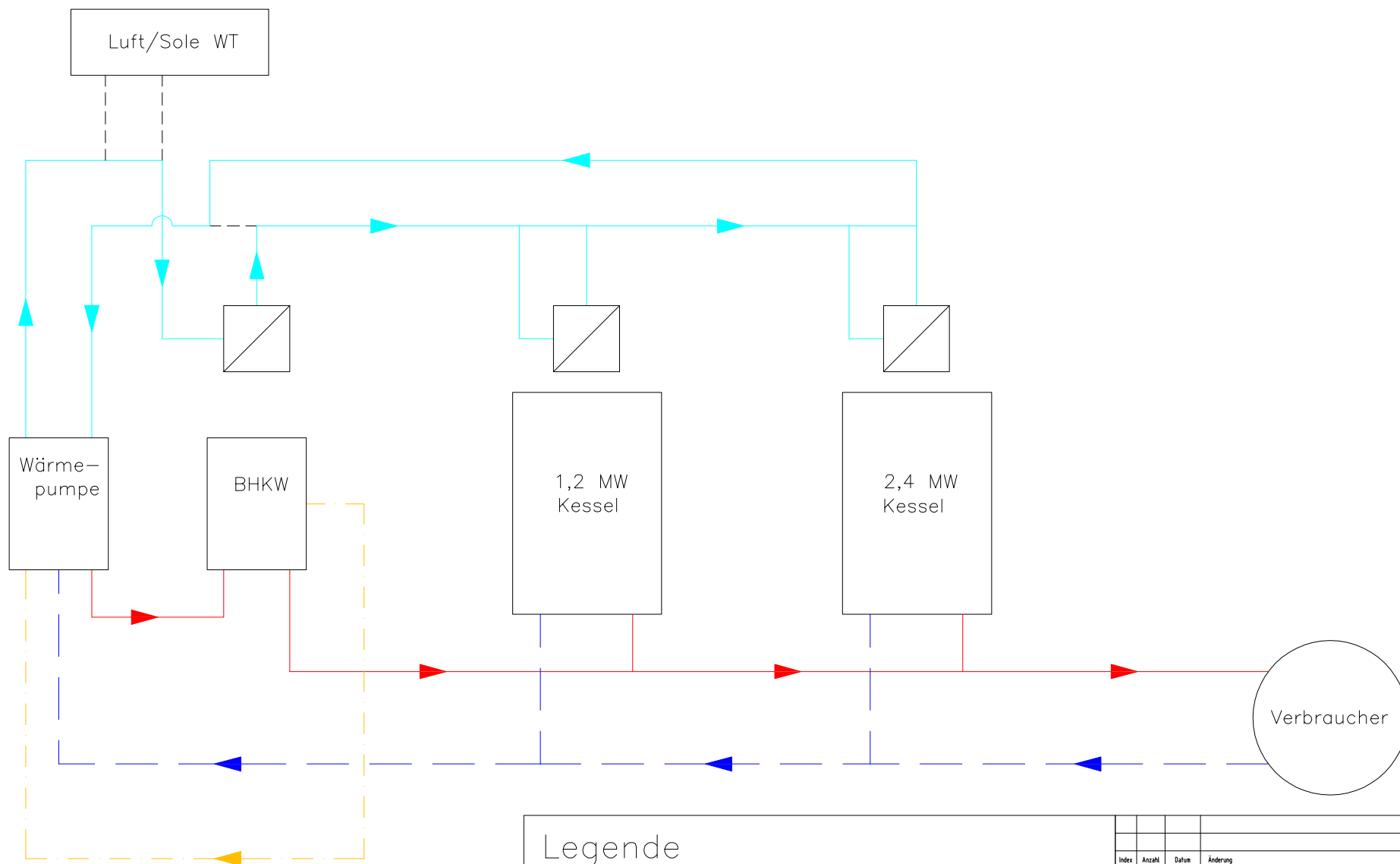


Legende


—	Vorlauf		Abgaswärmetauscher
---	Rücklauf		
---	Solekreislauf		
—	Solekreislauf – Winterbetrieb		

Index	Anzahl	Datum	Änderung
Funktionsschema – Winter			
Variante 1 – Gasmotorwärmepumpe			Blatt: ohne
gez.:	Jakob	Proj.-Nr.:	
bearb.:	Jakob	Datum:	04.08.08
gepr.:		Zeichn.-Name:	

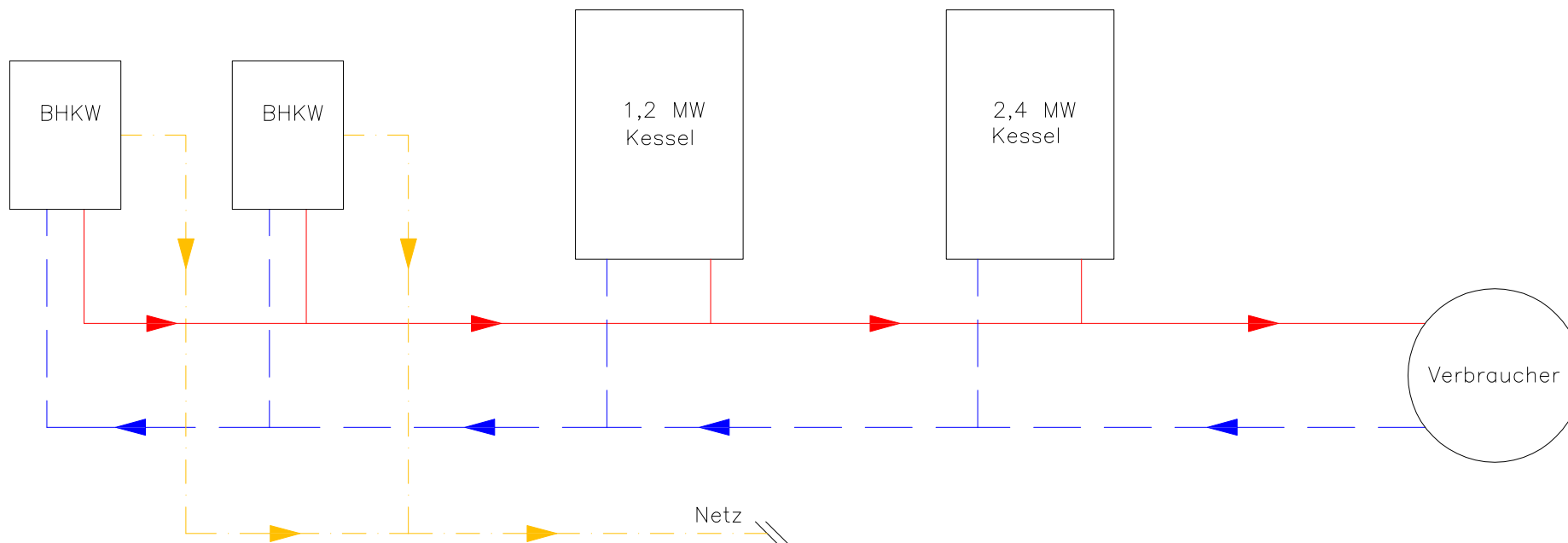
Anlage 6



Legende

—	Vorlauf		Abgaswärmetauscher
---	Rücklauf		
---	Solekreislauf	---	Elektroenergie
---	Solekreislauf – Winter		

Index	Anzahl	Datum	Änderung		
Funktionsschema – Winter				Batter.	Maßstab:
				Batterc.	ohne
Variante 4 – Wärmetransbaustein					
gez.:	Jakob	Proj.-Nr.:			
bearb.:	Jakob	Datum:		04.08.08	
gepr.:		Zeichn.-Name:			



Legende

- Vorlauf
- - - Rücklauf
- . - . - Elektroenergie

Index	Anzahl	Datum	Änderung
Funktionsschema		Blatt:	Maßstab:
Variante 5 – Blockheizkraftwerk		Blatt:	ohne
gez.:	Jakob	Proj.-Nr.:	
bearb.:	Jakob	Datum:	04.08.08
gepr.:		Zeichn.-Name:	

- Leerseite -

Thesen zur Diplomarbeit

Wirtschaftliche Systemoptimierung der bestehenden Heizungsanlage der Kaserne Marienberg inklusive Untersuchung des Einsatzes erneuerbarer Energien

Vorgelegt von: René Jakob

Matrikelnummer: 4050497

- These 1: Die Nachfrage nach alternativen Energiesystemen zur Optimierung von Anlagen höherer Leistungen steigt ständig an.
- These 2: Das vorliegende Projekt ist wirtschaftlich optimierbar.
- These 3: Absorptionswärmepumpen sind im Projekt nicht einsetzbar.
- These 4: Gasmotorwärmepumpe ermöglicht höchste Einsparung im Vergleich zur Bestandsanlage.
- These 5: Zum Einsatz der Gasmotorwärmepumpe muss eine spezielle, projektspezifische Anlage erstellt werden.
- These 6: Die Wärmetranstechnologie ist ebenfalls wirtschaftlich realisierbar, was durch entsprechende, schon bestehende Anlagen belegbar ist.
- These 7: Einsatz BHKW hoher Leistung besitzt geringste Wirtschaftlichkeit.
- These 8: Die Verminderung der CO₂- Emissionen durch Nutzung der KWK-Anlage am größten.