



Kälte durch Wärme erzeugen

Möglichkeiten der mit
Kraft-Wärme-Kopplung beheizten
Absorptionskältemaschine im Vergleich
zur Kompressionskältemaschine unter
wirtschaftlichen und technischen
Gesichtspunkten

– Bachelorthesis –

Armin Bez

Matr.-Nr.: 1900983

Maschinenbau Energie- und Anlagensysteme

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Franz Vinnemeier

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Christian Knäpper

Abgabedatum: 18.06.2012

Kurzfassung

Zur Deckung des Kältebedarfs kommen gegenwärtig weltweit, mit 90 % Marktanteil, hauptsächlich mit elektrischem Strom angetriebene Kompressionskältemaschinen zum Einsatz. Durch die vermehrte Nutzung dieser Anlagen steigt auch der weltweite Energieverbrauch weiter an.

Als Alternative stehen Absorptionskältemaschinen auf dem Markt zur Verfügung. Die Absorptionskältemaschine erzeugt, unter Einsatz von Wärmeenergie, Kälte. Als Antriebsenergie kann beispielsweise Abwärme aus einer KWK-Anlage (zentral oder dezentral), einem industriellen Prozess, einer solarthermischen Anlage oder einer Brennstoffzelle genutzt werden.

Gegenstand dieser Arbeit ist ein Konzeptvergleich von Absorptionskältemaschinen und Kompressionskältemaschinen. Im Weiteren werden die wirtschaftlichen, technischen, aber auch ökologischen Möglichkeiten der mit Kraft-Wärme-Kopplung angetriebenen Absorptionskältemaschine, untersucht. Dazu sind verschiedene Systeme einer Wirtschaftlichkeitsberechnung nach der Annuitätsmethode unterzogen worden.

Die begleitend zu dieser Arbeit angestellten Berechnungen zeigen, dass ein wirtschaftlicher Einsatz der Absorptionskältetechnik möglich ist und ein enormes Potential zur Einsparung von CO₂-Emissionen besteht.

Vorgelegt von:

Armin Bez
Glindweg 11
22303 Hamburg

E-Mail: arminbez@gmx.de
Matr.-Nr.: 1900983

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Formelzeichen, Symbole und Indizes	VI
1 Einleitung	1
2 Kältetechnische Grundlagen	3
2.1 Kältebedarf	3
2.2 Kälteerzeugung.....	5
3 Funktionsprinzip der Absorptions- und Kompressionskältemaschine	7
3.1 Absorptionskältemaschine	7
3.1.1 Funktionsprinzip.....	8
3.1.2 Vergleichsprozess.....	9
3.1.3 Energetische Kenngrößen von Absorptionskältemaschinen	11
3.2 Kompressionskältemaschine	13
3.2.1 Funktionsprinzip.....	14
3.2.2 Vergleichsprozess.....	15
3.2.3 Energetische Kenngrößen von Kompressionskältemaschinen	16
3.3 Gegenüberstellung Kompressions- und Absorptionskältemaschine	17
4 Möglichkeiten der Nutzung von Abwärme zur Kälteerzeugung	21
4.1 Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung	22
4.1.1 Zentrale Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (Fernwärme)	23
4.1.2 Dezentrale Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (BHKW).....	24
4.2 Primärenergieeffizienz.....	26
4.3 Auslegungs- und Betriebsbedingungen von Absorptionskältemaschinen	28
5 Wirtschaftlicher Vergleich der Kälteerzeugung	31
5.1 Fördermöglichkeiten	32
5.1.1 Energiesteuer- und Stromsteuergesetz – „Öko-Steuer-Gesetz“	33

5.1.2	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz	33
5.1.3	Erneuerbare-Energien-Gesetz	35
5.1.4	KWK-Impulsprogramm	36
5.1.5	Unternehmen für Ressourcenschutz – Programm der Hansestadt Hamburg..	37
5.1.6	Förderung von gewerblichen Kälteanlagen	37
5.2	Kosten	39
5.2.1	Kapitalgebundene Kosten	39
5.2.1.1	Investitionskosten von AKM und KKM	39
5.2.1.2	Investitionskosten Rückkühlwerke.....	41
5.2.1.3	Investitionskosten BHKW	42
5.2.2	Bedarfsgebundene Kosten	43
5.2.3	Betriebsgebundene Kosten	43
5.3	Wirtschaftlichkeitsrechnung	45
5.3.1	Annuitätsmethode	45
5.3.2	Berechnungsgrundlagen	49
5.3.3	Technische Rahmenbedingungen	51
5.3.4	Systemabgrenzung.....	52
5.3.5	Aufbau und Entwicklung einer Kalkulationstabelle	54
5.3.6	Ergebnisse.....	58
6	Schlussbetrachtung	67
	Literaturverzeichnis.....	69
	Anhang	74
A	Technische Datenblätter	74
A.1	Datenblatt Kompressionskältemaschine	74
A.2	Datenblatt Absorptionskältemaschine	76
A.3	Datenblatt Blockheizkraftwerk	77
B	Berechnungsergebnisse.....	78

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1	Bedarfsprofil für elektrischen Strom, Wärme und Kälte.....	4
Abbildung 2.2	Energieströme bei thermischen Maschinen, dargestellt am Beispiel einer Kältemaschine	5
Abbildung 2.3	Carnot-Prozess im T,s-Diagramm	6
Abbildung 3.1	Funktionsschema einer Absorptionskälteanlage	7
Abbildung 3.2	T,s-Diagramm des idealen Prozesses der 1-stufigen AKM	10
Abbildung 3.3	Funktionsschema einer Kompressionskältemaschine	13
Abbildung 3.4	T,s-Diagramm des idealen Prozesses der KKM	15
Abbildung 3.5	Prozessschema der AKM und der KKM im $\log p, -1/T$ Diagramm	17
Abbildung 3.6	Teillastverhalten von AKM und KKM	18
Abbildung 4.1	Kälteleistung einer AKM im Verhältnis zum Heizwärmebedarf	21
Abbildung 4.2	Prinzip der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung.....	22
Abbildung 4.3	Geordnete Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs von AKM und Gebäudeheizung	25
Abbildung 4.4	Energiebilanz zur Ermittlung der Primärenergieeinsparung von KWKK-Anlagen.....	26
Abbildung 5.1	Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit eines KWKK-Systems	31
Abbildung 5.2	Fördermöglichkeiten KWK(K)-Anlagen	32
Abbildung 5.3	Spezifische Richtpreise der Investitionskosten für Erdgas-BHKW	42
Abbildung 5.4	Spezifische Richtpreise von Instandhaltungsverträgen für Erdgas-BHKW	44
Abbildung 5.5	Preisentwicklung von Strom, Erdgas und Fernwärme.	49
Abbildung 5.6	Referenzsystem Heizkessel und KKM	52
Abbildung 5.7	Variante 1: BHKW beheizte Absorptionskältemaschine	53
Abbildung 5.8	Variante 2: fernwärmebeheizte Absorptionskältemaschine	53
Abbildung 5.9	Energiebedarfsstruktur von Wärme- und Kältebedarf über ein Jahr	58
Abbildung 5.10	Jahresdauerlinie (Wärme und Kälte)	59
Abbildung 5.11	Kostenstruktur von AKM und KKM.....	60
Abbildung 5.12	Gesamtannuität von AKM und KKM	60
Abbildung 5.13	Kostenstruktur der untersuchten Varianten.....	61

Abbildung 5.14 Kostenstruktur nach Abzug von Zuschüssen und Erlösen	62
Abbildung 5.15 Gesamtannuität der Varianten mit Förderung	63
Abbildung 5.16 Einsparung und Amortisation	63
Abbildung 5.17 Vergleich von Primärenergieaufwand und CO ₂ -Emission	64
Abbildung 5.18 Strombedarf von Absorptions- und Kompressionskälteanlagen	65
Abbildung A.1.1 Datenblatt Allgemein KKM CLS 202	74
Abbildung A.1.2 Technisches Datenblatt KKM CLS 202	75
Abbildung A.2.1 Technisches Datenblatt AKM WEGRACAL SE 50	76
Abbildung A.3.1 Technisches Datenblatt BHKW EW M 50 S	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Verfahren der Kälteerzeugung	4
Tabelle 3.1 Vergleich der Vorteile von KKM und AKM	18
Tabelle 3.2 Gegenüberstellung KKM und AKM	19
Tabelle 4.1 Anwendungsgebiete der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung	23
Tabelle 4.2 Betriebsweise von BHKW-Anlagen	25
Tabelle 4.3 Wesentliche technische Merkmale von KWK-Prozessen	28
Tabelle 5.1 Rückerstattungsbeträge der Energiesteuer	33
Tabelle 5.2 Höhe und Zahlungsdauer des KWK-Zuschlags	34
Tabelle 5.3 Vergütungssätze für die Stromerzeugung aus Biomasse nach dem EEG	35
Tabelle 5.4 Förderung nach dem KWK-Impulsprogramm	36
Tabelle 5.5 Förderung pro jährlicher vermiedener Tonne CO ₂	37
Tabelle 5.6 Vergleich der Investitionskosten für AKM und KKM	40
Tabelle 5.7 Koeffizienten für die Kostenfunktion der KKM	41
Tabelle 5.8 Koeffizienten für die Kostenfunktion der AKM	41
Tabelle 5.9 Betriebskostenvergleich von AKM und KKM	43
Tabelle 5.10 Annahmen relevanter Preise	50
Tabelle 5.11 Nutzungsdauer der Anlagenkomponenten	51

Formelzeichen, Symbole und Indizes

Formelzeichen, Symbole

Zeichen	Einheit	Bedeutung
f	-	Faktor
H	kJ/kg	Heizwert (in dieser Arbeit als Energiegröße in kWh)
k	-	Kostenfunktion
m	kg	Masse
P	W	Leistung
p	N/m^2	Druck
PE	kWh	Primärenergieaufwand
PEE	kWh	Primärenergieeinsparung
PER	-	engl. Primary energy resource factor
\dot{Q}	W	Wärmestrom
q	J/kg	spezifische Wärme
s	$J/kg K$	spezifische Entropie
T	°C	Temperatur
w	J/kg	spezifische Arbeit

Griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
ε	-	Leistungszahl (COP)
ξ	-	Konzentration
η	-	Wirkungsgrad
ζ	-	Wärmeverhältnis

Indizes

Zeichen	Bedeutung
0	Kälteleistung (Wärmestrom)
0, 1, ...	Druck- bzw. Temperaturniveau
A	Absorber
a	arme Lösung
BrSt	Brennstoff
C	Kondensator
<i>c</i>	abgehender Wärmestrom; hohe Temperatur (Kältemaschine)
<i>ca</i>	Carnot
el	elektrisch
H	Antriebswärme am Austreiber
i	unterer Heizwert
k	Kälteprozess
Kä	Kältemittel
L	Lösung
LP	Lösungsmittelpumpe
Lö	Lösungsmittel
P	Primärenergie
RA	Referenzanlage
r	reiche Lösung
Verl	Verluste
w	Wärmeprozess

Abkürzungen

Zeichen	Bedeutung
AKM	Absorptionskältemaschine
ASUE	Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BHKW	Blockheizkraftwerk
COP	engl. coefficient of performance
DESTATIS	Statistisches Bundesamt
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEWärmeG	Erneuerbare Energien-WärmeG
EnEV	Energieeinsparverordnung
EPBD	Europäische Gebäuderichtlinie
e.V	eingetragener Verein
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
FKW	Fluorkohlenwasserstoffe
HFKW	teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
IT	Information Technology
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KKM	Kompressionskältemaschine
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
RA	Referenzanlage
StromStG	Stromsteuergesetz
VBG 20	Unfallverhütungsvorschrift für Kälteanlagen

1 Einleitung

Laut einer IEA Studie [Int08] aus dem Jahr 2008 verursachen Gebäude 40 % des weltweiten Primärenergieverbrauchs. Außerdem ist der Gebäudebestand für etwa ein Drittel der CO₂-Emissionen verantwortlich. Dies zeigt das enorme Einsparpotential von CO₂-Emissionen und Energieverbrauch im Gebäudebestand.

Der anthropogene Treibhauseffekt wird gerade durch den CO₂-Ausstoß weiter angetrieben. Eine Reduzierung dieses Ausstoßes lässt sich nur durch den Verzicht auf fossile Energieträger und den vermehrten Einsatz von regenerativen Energien sowie eine höhere Effizienz der eingesetzten Wandlungssysteme erreichen. Dies kann durch eine Wirkungsgradsteigerung erreicht werden, aber vor allem auch durch die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme in Kraft-Wärme-Kopplungssystemen.

Mit steigenden Bedürfnissen und Ansprüchen an Gebäude, aber auch durch ihre Bauweise, den sommerlichen Wärmeschutz, moderne IT-Technik und nicht zuletzt durch die klimatischen Veränderungen mit extremen Klimabedingungen, steigen der Klimatisierungsbedarf und damit der Endenergiebedarf weiter an. Nach [Sch06, S. 1] ist bis 2020 damit zu rechnen, dass sich die gekühlte Gebäudefläche in Deutschland auf bis zu 3,8 m² annähernd verdreifacht.

Gegenwärtig kommen zur Gebäudekühlung überwiegend elektrisch angetriebene Kompressionskältemaschinen mit einem hohen Strombedarf zum Einsatz. Für die Deckung des Kältebedarfs stehen indes unterschiedliche Techniken zur Verfügung. Eine mögliche Alternative bieten die thermisch angetriebenen Absorptionskältemaschinen. Als Antriebsenergie lässt sich Wärme aus Fernwärmenetzen (zentrale Kraft-Wärme-Kopplung), Blockheizkraftwerken (dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung), aber auch Abwärme aus verschiedenen meist industriellen Prozessen nutzen. Neben dem über das Jahr annähernd konstanten Bedarf an elektrischer Energie wird Wärme hauptsächlich im Winterhalbjahr und Kälte dagegen im Sommerhalbjahr in der Energieversorgung von Gebäuden benötigt. Im Sommerhalbjahr sind die Wärmenetze durch die geringe Wärmeabnahme deshalb gering ausgelastet. Genau hier kann die thermische Kälteerzeugung durch einen erhöhten Wärmebedarf im lastschwachen Sommerhalbjahr die Betriebszeiten von Kraft-Wärme-

Kopplungsanlagen deutlich erhöhen. Dies wirkt sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit und die Umweltbelastung durch verminderte CO₂-Emissionen aus.

Wird die Absorptionskältemaschine mit der ausgekoppelten Wärme aus einem Kraft-Wärme-Kopplungsprozess angetrieben, spricht man von einem Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsprozess. Ziel dieser Arbeit ist es, die Möglichkeiten der mit Kraft-Wärme-Kopplung beheizten Absorptionskältemaschine im Vergleich zur Kompressionskältemaschine unter wirtschaftlichen, technischen aber auch ökologischen Gesichtspunkten zu betrachten und dies durch Berechnungen weiter zu vertiefen.

2 Kältetechnische Grundlagen

Die Nutzung verschiedener Methoden der Gebäude- und Vorratslagerkühlung ist nicht neu. Schon früher hat sich der Mensch verdunstendes Wasser, von Brunnen oder in Belüftungssystemen, zum Kühlen zu Nutze gemacht. Aktuelle „Kältemaschinen machen Verdunstungskälte nutzbar, die entsteht, wenn eine Flüssigkeit (Kühlmittel) verdampft“ [Sch06, S. 1]. Durch Änderungen des Aggregatzustandes des Kältemittels kann Kälte erzeugt und einem Stoff Wärme entzogen werden. Diese Gesetzmäßigkeit findet in Kälteanlagen ihre Anwendung und ist aus unserem Leben und Alltag nicht mehr wegzudenken. Die Klimaanlage im Auto, der Kühlschrank zu Hause oder bei der Klimatisierung von Gebäuden, überall dort werden täglich Prozesse der Kälteerzeugung genutzt. Der Prozess der Kälteerzeugung beruht auf dem Carnot'schen Kreisprozess als idealem Kreisprozess. Im folgenden Kapitel soll zunächst ein kurzer Einblick in den Grundprozess der Kälteerzeugung gegeben werden.

2.1 Kältebedarf

Der Bedarf an Klimakälte steigt in Deutschland, aber auch weltweit, stetig an. Dies ist bedingt durch einen steigenden Komfortanspruch, durch die Bauweise von Gebäuden, den sommerlichen Wärmeschutz, moderne IT-Technik und nicht zuletzt die klimatischen Veränderungen mit extremen Klimabedingungen (Anstieg der Luftfeuchtigkeit) [Noe06].

„In Deutschland werden jährlich ca. 66 Mrd. kWh Strom und 11 Mrd. kWh nicht elektrischer Energie für die technische Kälteerzeugung verwendet. Dies entspricht 14 % des deutschen Strombedarfs und 5,8 % des Primärenergieverbrauchs. Hiervon entfallen 67 % auf die Nahrungsmittelindustrie, 22 % auf die Klimatisierung von Gebäuden und 9 % auf die übrige Industrie [...]. Zurzeit werden weltweit jährlich 50 Millionen Klimaanlagen installiert. Dabei nimmt Deutschland mit 100 000 Anlagen noch einen hinteren Platz ein. Aber auch hier dürfte sich bis 2020 die gekühlte Gebäudefläche auf 3,8 m² pro Einwohner nahezu verdreifachen.“ [Sch06, S. 1].

Über das gesamte Jahr betrachtet ergibt sich, wie in Abbildung 2.1 zu sehen, in den Sommermonaten ein erhöhter Kältebedarf in der Gebäudeenergie-technik, der sich unter anderem aus der erhöhten Sonneneinstrahlung zu dieser Jahreszeit ergibt. Ein Bedarf an Heizwärme hingegen zeigt sich in den Wintermonaten und in den Übergangszeiten.

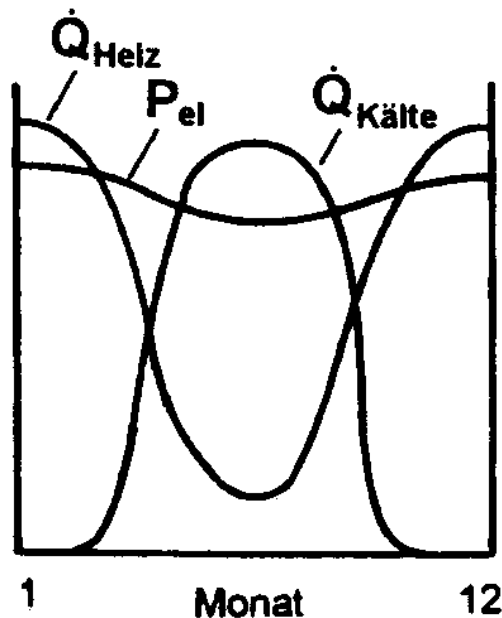


Abbildung 2.1 Bedarfsprofil für elektrischen Strom, Wärme und Kälte [Bau08, S. 292]

Zur Deckung des benötigten Kältebedarfs kommen zwei Techniken zur Anwendung (siehe Tabelle 2.1), die sich nach der Antriebsenergieform unterscheiden lassen: zum einen die klassische Technik der Kompressionskältemaschine (KKM), die mechanisch mit elektrischem Strom angetrieben wird, und zum anderen die Absorptionskältetechnik, die als Antrieb des Kälteprozesses Wärme nutzt.

Tabelle 2.1 Verfahren der Kälteerzeugung

Prozess	Antrieb	Verfahren
Sorption	thermisch	Adsorption
		Absorption
Kompression	elektrisch	Kaltdampf
		Kaltluft bzw. -gas

Absorptionskälteanlagen können durch die Nutzung von Abwärme im Gegensatz zu Kompressionskältemaschinen bis zu 30 % geringere CO₂-Emissionen verursachen und benötigen wenig elektrische Energie [Sch06], [Bau04].

Zur Ermittlung des Kältebedarfes für Wohn- und Bürogebäude ist eine Kühllastberechnung auf Basis der VDI 2078 durchzuführen.

2.2 Kälteerzeugung

Als Vergleichsprozess zur Bewertung von thermischen Prozessen wird der linkssinnige Carnot-Prozess herangezogen. Die Arbeit muss dem Prozess zugeführt werden und entspricht somit dem zu leistenden Aufwand. Der Nutzen des Prozesses ist die aufgenommene Wärmemenge. Die Aufgabe ist, Wärme entgegen dem Temperaturgefälle zu transportieren, um zu kühlen.

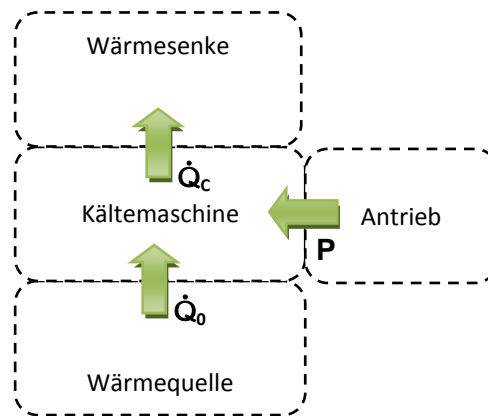


Abbildung 2.2 Energieströme bei thermischen Maschinen, dargestellt am Beispiel einer Kältemaschine nach [Lan06, S. 100]

Die Energiebilanz der Kältemaschine ergibt sich aus den in der Abbildung 2.2 dargestellten Energieströmen.

$$\dot{Q}_0 = |\dot{Q}_c| - P \quad (2.1)$$

Die Leistungsziffer (ε_{ca}) des Carnot-Prozesses resultiert aus dem Verhältnis von Nutzen zu Aufwand.

$$\varepsilon_{ca} = \left(\frac{\dot{Q}_0}{P} \right)_{ca} = \frac{T_0}{T_c - T_0} \quad (2.2)$$

Abbildung 2.3 zeigt, dass die Leistungsziffer (ε_{ca}) ausschließlich von der Verdampfungstemperatur (T_0) und der Verflüssigungstemperatur (T_c) abhängt.

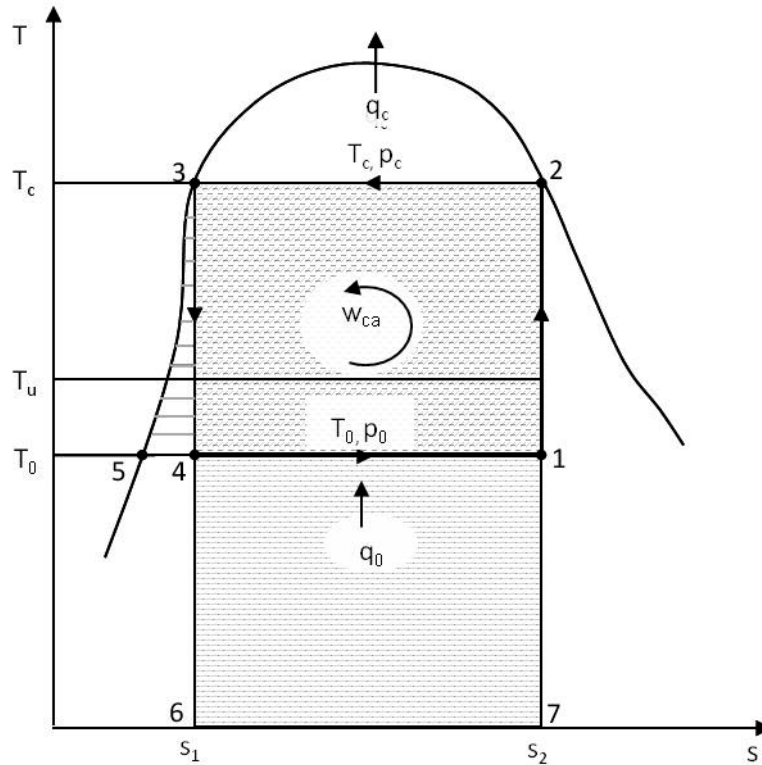


Abbildung 2.3 Carnot-Prozess im T,s-Diagramm nach [Bre09, S. 4]

Während des Prozesses wird die Wärmemenge q_0 an der Wärmequelle aufgenommen. An der Wärmesenke wird die Wärme q_c abgegeben. Die erforderliche Arbeit des Prozesses ist w_{ca} . Für den Betrieb einer Kälteanlage lässt sich hieraus ableiten, dass diese bei einer möglichst hohen Verdampfungstemperatur (T_0) und einer möglichst niedrigen Verflüssigungstemperatur (T_c) arbeiten sollte, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu erreichen [Bre09].

3 Funktionsprinzip der Absorptions- und Kompressionskältemaschine

3.1 Absorptionskältemaschine

Die Absorptionskältemaschine (AKM) ist die technische Umsetzung der thermisch angetriebenen Kälteerzeugung. Die Verdichtung wird, im Gegensatz zu der mechanischen Verdichtung bei der KKM, durch eine thermische Verdichtung im Absorber und Austreiber umgesetzt.

Als Absorption wird die Aufnahme oder das Lösen von Gasen oder Dämpfen durch Flüssigkeiten bezeichnet. Die Aufnahme bzw. das Lösen geschieht bei unterschiedlichen Druck- und Temperaturverhältnissen.

In Abbildung 3.1 ist das Schaltschema einer 1-stufigen Absorptionskältemaschine dargestellt.

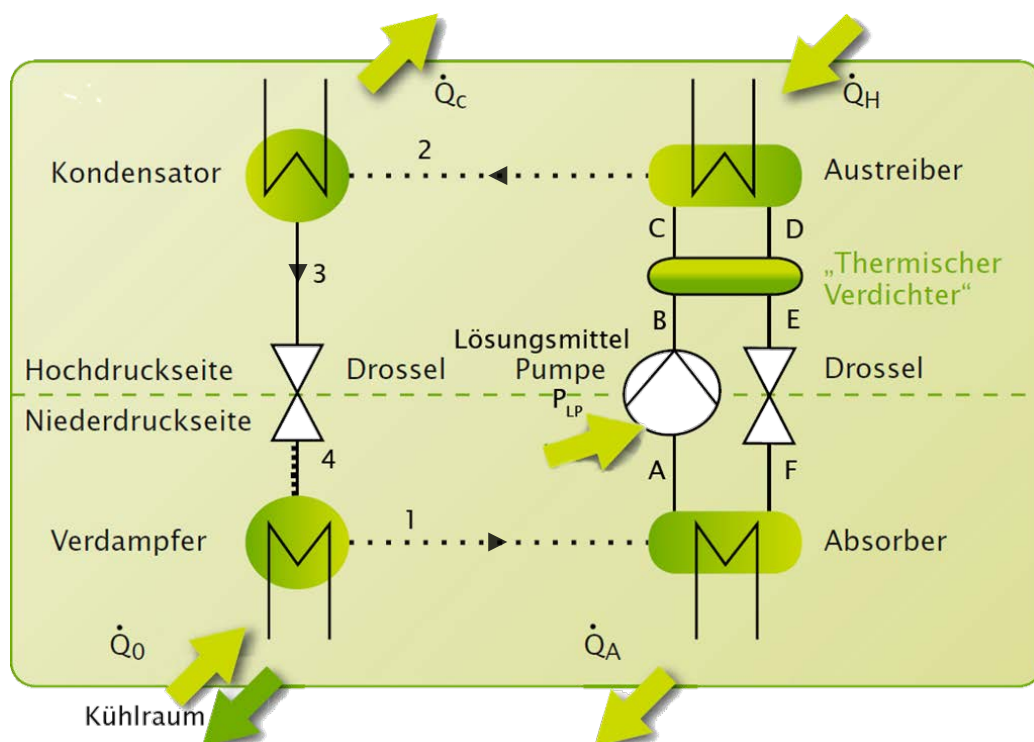


Abbildung 3.1 Funktionsschema einer Absorptionskälteanlage nach [Hes12, S. 222]

Eine Absorptionskältemaschine besteht grundsätzlich aus folgenden Hauptkomponenten:

- Absorber
- Austreiber (Generator)
- Verdampfer
- Verflüssiger (Kondensator)

Weitere Komponenten sind

- ein Drosselventil im Kältemittelkreislauf und Lösungsmittelkreislauf,
- eine Lösungsmittelpumpe
- sowie zur Erhöhung der Effizienz ein Lösungsmittelwärmeüberträger.

3.1.1 Funktionsprinzip

In der Absorptionskältetechnik werden zur Kälteerzeugung verschiedene Arbeitsstoffpaare verwendet. Ein Arbeitsstoffpaar besteht aus einem Kälte- und einem Lösungsmittel. Folgende Systeme an Absorptionskälteanlagen stehen auf dem Markt zur Verfügung:

- Absorptionskälteanlagen mit dem Arbeitspaar H_2O (Wasser) und LiBr (Lithiumbromid) und
- Absorptionskälteanlagen mit dem Arbeitspaar NH_3 (Ammoniak) und H_2O (Wasser) [ASU95].

Bei der Absorptionskältetechnik müssen zwei Kreisläufe unterschieden werden: zum einen der Kreislauf des Kältemittels zwischen Austreiber, Verflüssiger und Verdampfer (siehe Abbildung 3.1 Kreislauf 1 bis 4), zum anderen der des Lösungsmittels zwischen Absorber und Austreiber (siehe Abbildung 3.1 Kreislauf A bis F).

Im Lösungskreislauf herrschen verschiedene Lösungskonzentrationen. Diese werden bezeichnet als „arme“ Lösung mit der Konzentration ξ_a bzw. als „reiche“ Lösung mit der Konzentration ξ_r . Arme Lösung bedeutet, dass die Lösung arm an Kältemittel (z. B. Wasser) ist, eine reiche Lösung dagegen reich an Kältemittel. Die thermische Verdichtung erfolgt im Lösungsmittelkreislauf durch einen exothermen Prozess [Pec05].

Die Lösungskonzentration ξ ist wie folgt definiert:

$$\xi = \frac{m_{\text{Kä}}}{m_{\text{L}}} \quad (3.3)$$

mit der Lösungsmasse m_L

$$m_L = m_{Kä} + m_{Lö} \quad (3.4)$$

Die Prozesse in den Hauptkomponenten einer Absorptionskältemaschine sind folgende:

Verdampfer: Im Verdampfer wird unter Aufnahme der Wärme \dot{Q}_0 das Kältemittel verdampft. Dies geschieht bei der Temperatur T_0 und dem Druck p_0 . Bei diesem Vorgang wird die Kühlleistung der Kältemaschine erbracht.

Absorber: Der Kältemitteldampf strömt aus dem Verdampfer in den Absorber. Hier wird der Kältemitteldampf von der armen Lösung absorbiert. Bedingt durch den exothermen Absorptionsvorgang wird Wärme \dot{Q}_A mit der Temperatur T_A frei. Diese muss z. B. über einen Kühlturm an die Umgebungsluft abgeführt werden.

Austreiber: Im Austreiber wird das Kältemittel aus der reichen Lösung mittels der Antriebswärme \dot{Q}_H und der Temperatur T_H wieder ausgetrieben, so entsteht eine arme Lösung. Das Kältemittel strömt nun zum Verflüssiger.

Verflüssiger: Im Verflüssiger (Kondensator) wird das Kältemittel wieder kondensiert. Dies geschieht beim Druck p_1 und bei der Temperatur T_C . Die Kondensationswärme \dot{Q}_C muss entsprechend abgeführt werden.

Die Funktionen von Verdampfer, Kondensator sowie der Drossel sind analog derer bei der Kompressionskältemaschine [Saf03], [Bau08], [Mar97], [Cha04], [Elm09].

3.1.2 Vergleichsprozess

Auch für den Absorptionskälteprozess ist der Carnot-Prozess als Vergleichsprozess heranzuziehen. In Abbildung 3.2 sind die Zustandsänderungen im T,s-Diagramm eingetragen. Zum einen ist dies ein linkssinniger Carnot-Kreisprozess zwischen den Punkten 1-2-3-4-1 mit der für den Prozess benötigten spezifischen Antriebsenergie (w_K) zwischen den beiden Temperaturniveaus T_C und T_0 , zum anderen ein rechtssinniger Carnot-Kreisprozess zwischen den Punkten A-C-D-F-A mit der erzeugten spezifischen Nutzarbeit (w_w) zwischen den beiden Temperaturniveaus T_H und T_A [Bau08], [Kar07].

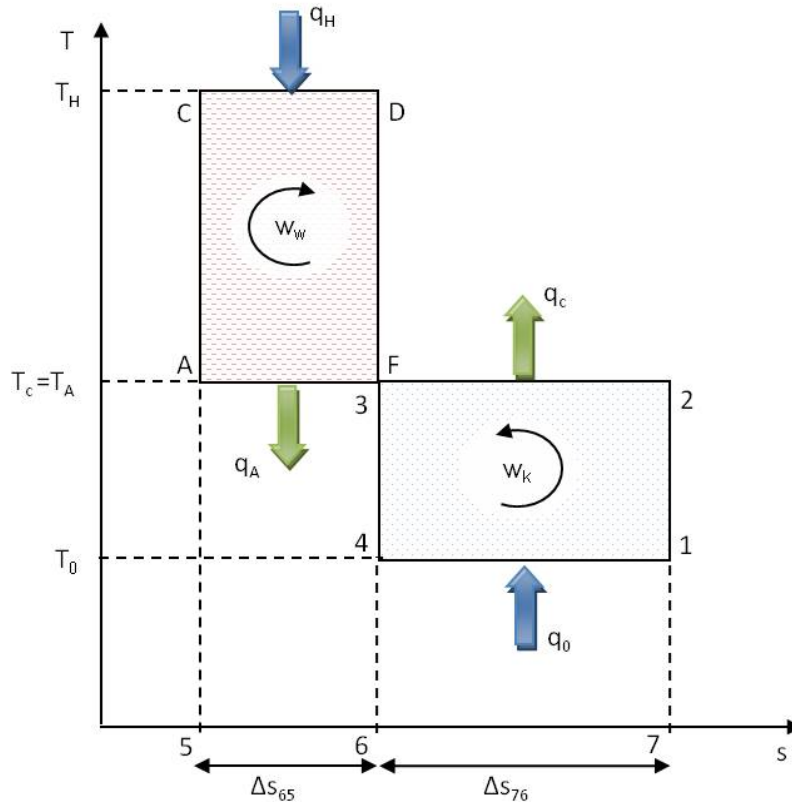


Abbildung 3.2 T,s-Diagramm des idealen Prozesses der 1-stufigen AKM

Aus dem in Abbildung 3.2 dargestellten T,s-Diagramm gilt für die spezifische Verdampfungswärme (q_0) (Nutzen) und die Austreiberwärme (q_H) (Aufwand):

$$q_0 = T_0 * (s_7 - s_6) \quad (3.5)$$

$$q_H = T_H * (s_6 - s_5) \quad (3.6)$$

Des Weiteren gilt für die spezifische Antriebsenergie (w_K) und die spezifische Nutzarbeit (w_w):

$$w_w = (T_H - T_A) * (s_6 - s_5) \quad (3.7)$$

$$w_K = (T_c - T_0) * (s_7 - s_6) \quad (3.8)$$

Als charakteristische Größe zur Beurteilung des Prozesses (hier idealer AKM nach Carnot) wird nicht von Leistungszahlen wie bei Kompressionskältemaschinen gesprochen, sondern von einem Wärmeverhältnis (ζ) oder von dem sogenannten COP-Wert (Coefficient of Performance) [Elm09, S. 75]. Für eine ideale AKM nach Carnot definiert sich der COP aus dem Verhältnis von Nutzen zu Aufwand.

$$\text{COP}_{\text{AKM,Ca}} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\text{Verdampfungswärme}}{\text{Austreiberwärme}} = \frac{q_0}{q_H} \quad (3.9)$$

3.1.3 Energetische Kenngrößen von Absorptionskältemaschinen

Die Energiebilanz einer Absorptionskältemaschine nach Abbildung 3.1 lautet

$$\dot{Q}_H + \dot{Q}_0 + P_{LP} = \dot{Q}_A + \dot{Q}_C + \dot{Q}_{Verl} \quad (3.10)$$

mit

\dot{Q}_H	Antriebswärme am Absorber (\dot{Q}_{zu})
\dot{Q}_0	Kälteleistung am Verdampfer (\dot{Q}_{zu})
P_{LP}	Antriebsleistung der Lösungsmittelpumpe
\dot{Q}_A	am Absorber abzuführende Wärme (\dot{Q}_{AB})
\dot{Q}_C	am Verflüssiger abzuführende Wärme (\dot{Q}_{AB})
\dot{Q}_{Verl}	Verluste

Bei größeren Kälteleistungen werden die Antriebsleistung der Lösungsmittelpumpe sowie die Verluste, wegen ihrer vernachlässigbaren Größe, meist nicht berücksichtigt [Kel08, S. 30].

Für die reale AKM gilt unter Berücksichtigung der Irreversibilitäten:

$$\text{COP}_{AKM} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\text{Nutzkälte}}{\text{Antriebswärme}} = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_H} \quad (3.11)$$

Der Gütegrad der AKM bestimmt das Verhältnis von COP_{AKM} aus Formel (3.11) zu dem idealen Wert $\text{COP}_{AKM,Ca}$ nach Formel (3.9) aus Kapitel 3.1.2

$$\eta_{AKM} = \frac{\text{COP}_{AKM}}{\text{COP}_{AKM,Ca}} \quad (3.12)$$

„In der Praxis liegt das Wärmeverhältnis einer einstufigen AKM in der Größenordnung 0,6 bis 0,8, so dass die abzuführende Wärme das 2,7- bis 2,25-Fache der Kälteleistung beträgt. Die Rückkühlanlage fällt bei der AKM damit wesentlich aufwendiger aus als bei der KKM.“ [Tra09, S. 117]. Die Leistungszahl steigt bei einem zweistufigen Prozess auf 1,1 – 1,3 [Eic12, S. 150]. Ein COP_{AKM} von 0,67 nach [Bau08, S. 297] ist als guter Näherungswert für eine einstufige AKM anzunehmen, dies bedeutet:

$$\dot{Q}_H = 1,5 * \dot{Q}_0 \quad (3.13)$$

und damit für die am Verflüssiger und Absorber abzuführende Leistung

$$\dot{Q}_C = 2,5 * \dot{Q}_0 \quad (3.14)$$

Dies macht im Verhältnis zu einer Kompressionskältemaschine aufgrund des fast doppelt so großen Kühlwasserstroms einen größeren Kühlturm erforderlich.

Ein direkter Vergleich des Wärmeverhältnisses der AKM mit der Leistungszahl der KKM ist nicht sinnvoll, da bei der AKM meistens Abwärme zum Einsatz kommt und bei der KKM exergiereicher wertvoller Strom. Die unterschiedlichen Prozesswertigkeiten durch die verschiedenen eingebrachten Energien findet keine Berücksichtigung.

Zu einem zulässigen Anlagenvergleich kann die eingesetzte Primärenergie pro kW Kälteleistung herangezogen werden (PER – primary energy resource factor – nach Europäischer Norm DIN EN 15316-4-5[DIN07]) [Eic12, S. 150].

3.2 Kompressionskältemaschine

90 % aller heutzutage installierten Kältemaschinen basieren auf dem Kaltampf-Kompressionskälte-Prozess und werden mit einem elektrischen Kompressor betrieben. Damit haben sie die größte Bedeutung auf dem Kälte- und Klimatechnikmarkt. Kompressionskältemaschinen haben ein sehr großes Leistungsspektrum, von 50 W bis zu mehreren Megawatt Kälteleistung [Scr09, S. 1952].

In Abbildung 3.3 ist das Schaltschema einer Kompressionskältemaschine dargestellt.

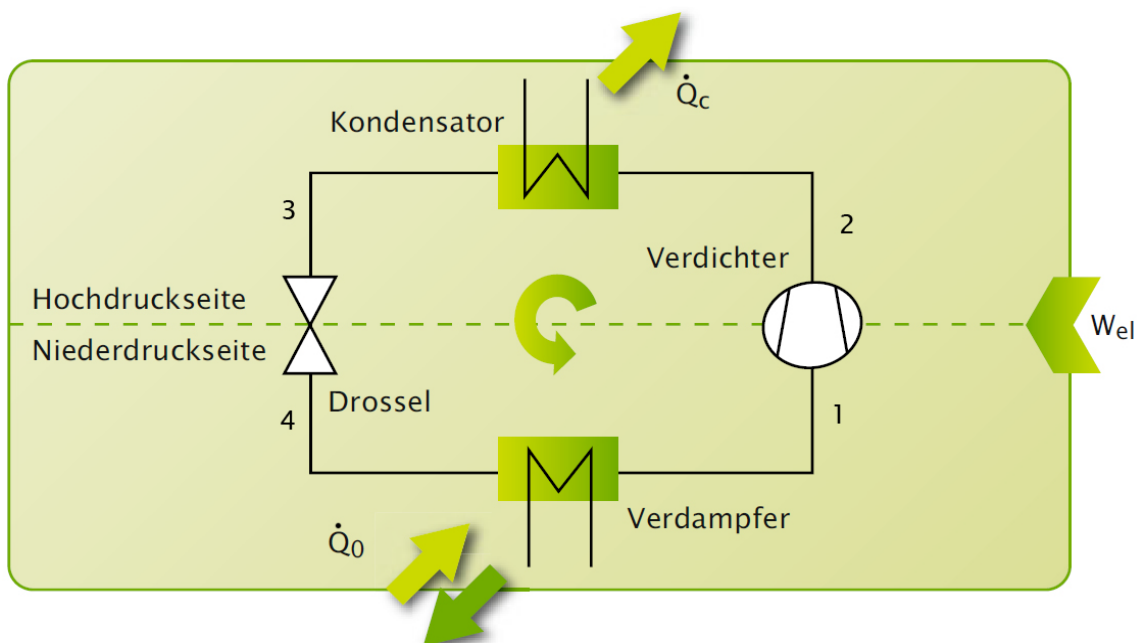


Abbildung 3.3 Funktionsschema einer Kompressionskältemaschine nach [Hes12, S. 220]

Eine Kompressionskältemaschine besteht grundsätzlich aus folgenden Hauptkomponenten:

- Verdichter
- Verdampfer
- Kondensator
- Drosselventil

3.2.1 Funktionsprinzip

Die in Kapitel 3.2 genannten Komponenten sind in einem Kreislauf miteinander verbunden. Für den Umlauf des Kältemittels, innerhalb des Systems, sorgt der Verdichter.

Verdichter: Der Verdichter wird bei der Kompressionskältemaschine unter Aufnahme der elektrischen Arbeit (w_{el}) üblicherweise durch einen Elektromotor angetrieben. Nach der Verdichtung hat das Kältemittel die höchste Temperatur T_0 des Prozesses und den Druck p_1 .

Kondensator: Hier wird das überhitzte Kältemittel wieder abgekühlt und verflüssigt. Die dabei freiwerdende Wärme \dot{Q}_c muss abgeführt werden. Danach wird der Druck durch das folgende Drosselventil abgebaut. Es entsteht Nassdampf mit dem Druckniveau p_0 , dieser strömt in den Verdampfer.

Verdampfer: Im Verdampfer wird unter Aufnahme der Wärme \dot{Q}_0 das Kältemittel verdampft. Bei diesem Vorgang wird die Kühlleistung der Kältemaschine erbracht [Tra09], [Elm09].

„Kältemittel wie R 12 und R 22 deckten in der Vergangenheit den überwiegenden Teil des Kältemittelbedarfs ab“ [Bau08, S. 262]. Durch die „FCKW-Halon-Verbots-Verordnung“ und weitere Nachfolgeverordnungen wurde die Kältemittelverfügbarkeit für den Einsatz in Kompressionskältemaschinen allerdings stark eingeschränkt. Dieses Verbot gilt auch für die Kältemittel R 12 und R 22. Vor allem R 22 ist auch heute noch in vielen Altanlagen im Einsatz und ist ab 2015 auch für Reparaturzwecke verboten. Heute kommen in Neuanlagen hauptsächlich fluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/HFKW) zum Einsatz. Aber auch diese sind, wegen ihrer klimaschädigenden Wirkung, in die Kritik geraten [Qua10, S. 50-51]. So verpflichtet sich die Europäische Union (EU-15) auf Basis des Kyoto-Protokolls zu einer Reduzierung von Treibhausgasen, darunter unter anderem auch FKW- und HFKW-Kältemittel [Umw11]. Ammoniak ist zwar aufgrund der Unfallverhütungsvorschrift VBG 20 nicht uneingeschränkt nutzbar, kommt jedoch aufgrund der Kältemittelproblematik immer häufiger zum Einsatz, hier vor allem bei Absorptionskältemaschinen [Bau08, S. 262].

3.2.2 Vergleichsprozess

Für den Kompressionskälteprozess ist nach Kapitel 2.2 der linkssinnige Carnot-Prozess als idealer Vergleichsprozess heranzuziehen. In Abbildung 3.4 sind die Zustandsänderungen im T,s-Diagramm eingetragen.

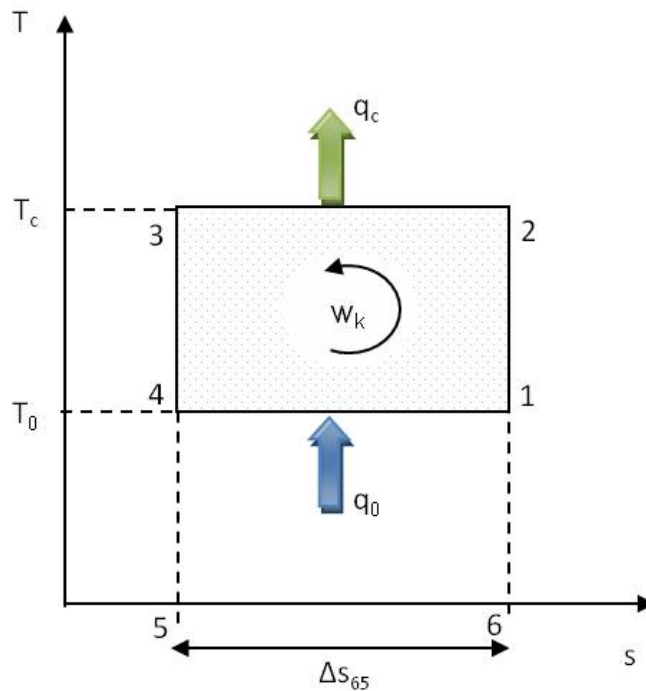


Abbildung 3.4 T,s-Diagramm des idealen Prozesses der KKM

Der Kältekreislauf aus Abbildung 3.3 und Abbildung 3.4 umfasst im Wesentlichen folgende Zustandsänderungen:

- 1 → 2: isentrope Verdichtung von niedrigem Druck p_0 auf hohen Druck p_1
- 2 → 3: Abkühlung und isotherme Verflüssigung bei dem Druck p_1
- 3 → 4: isentrope Expansion auf den Druck p_0
- 4 → 1: isotherme Verdampfung mit Überhitzung beim Druck p_0

Aus dem oben dargestellten T,s-Diagramm gilt für die im Verdampfer aufgenommene Kälteleistung q_0 und die abgegebene Verflüssigerleistung q_C :

$$q_0 = T_0 * (s_6 - s_5) \quad (3.15)$$

$$q_C = T_C * (s_6 - s_5) \quad (3.16)$$

Für die spezifische Verdichterleistung (w_K) gilt:

$$w_K = (T_C - T_0) * (s_6 - s_5) \quad (3.17)$$

Als charakteristische Größe zur Beurteilung des Prozesses wird die Leistungszahl ε herangezogen. Für eine ideale KKM nach Carnot (mit der Formel (3.9)) definiert sich der COP aus dem Verhältnis von Nutzen zu Aufwand.

$$\varepsilon_{KKM, Ca} = \text{COP}_{KKM, Ca} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \left(\frac{q_0}{w_K} \right)_{Ca} = \frac{T_0}{T_C - T_0} \quad (3.18)$$

3.2.3 Energetische Kenngrößen von Kompressionskältemaschinen

Die Energiebilanz einer Kompressionskältemaschine nach Abbildung 3.3 lautet:

$$\dot{Q}_0 + P_{el} = \dot{Q}_C + \dot{Q}_{Verl} \quad (3.19)$$

mit

\dot{Q}_0	Kälteleistung am Verdampfer (\dot{Q}_{ZU})
P_{el}	Antriebsleistung des Verdichters
\dot{Q}_C	am Verflüssiger abzuführende Wärme (\dot{Q}_{AB})
\dot{Q}_{Verl}	Verluste

Als Folge der auftretenden Verluste des Verdichters geht nicht die gesamte zugeführte Antriebsleistung (P_{el}) in die Verflüssigerleistung (\dot{Q}_C) ein [Scr09, S. 1958].

Deshalb gilt für die reale KKM, unter Berücksichtigung der Irreversibilitäten, mit den realen Werten

$$\text{COP}_{KKM} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\dot{Q}_0}{P_{el}} \quad (3.20)$$

Der Gütegrad der KKM bestimmt das Verhältnis von COP_{KKM} aus Formel (3.20) zu dem idealen Wert $\text{COP}_{KKM, Ca}$ nach Formel (3.18) aus Kapitel 3.2.2

$$\eta_{AKM} = \frac{\text{COP}_{AKM}}{\text{COP}_{Ca}} \quad (3.21)$$

Die Leistungszahl ε liegt für KKM zur Klimatisierung zwischen 3 und 5, je nach Betriebsbedingungen. Für die am Verflüssiger abzuführende Wärme (\dot{Q}_C) erhält man somit Werte zwischen dem 1,33- und 1,2-Fachen der Kälteleistung [Geb02, S. 300].

Bei einer Kompressionskältemaschine mit einem COP_{KKM} von 4 erhält man für die am Verflüssiger abzuführende Leistung

$$\dot{Q}_C = 1,25 * \dot{Q}_0 \quad (3.22)$$

Somit fallen die Rückkühlanlagen der Kompressionskältemaschinen entsprechend kleiner aus als die einer Absorptionskälteanlage.

3.3 Gegenüberstellung Kompressions- und Absorptionskältemaschine

Wie bereits erwähnt ist der wesentliche Unterschied der beiden Verfahren die Form ihrer Antriebsenergie. So kommt bei der Kompressionskältemaschine ein elektrisch angetriebener Verdichter zum Einsatz, bei der Absorptionskältetechnik hingegen ein thermischer Verdichter. Die in Abbildung 3.5 im $\log p, -1/T$ -Diagramm dargestellten Prozesse der jeweiligen Verfahren geben qualitativ die bei den jeweiligen Prozessschritten herrschenden Parameter (Druck- und Temperaturänderungen) wieder. Die Diagonalen zwischen p_0 und p_1 kennzeichnen die Zustände gleicher Arbeits- und Lösungsmittelkonzentrationen bezogen auf den Gesamtmassenstrom.

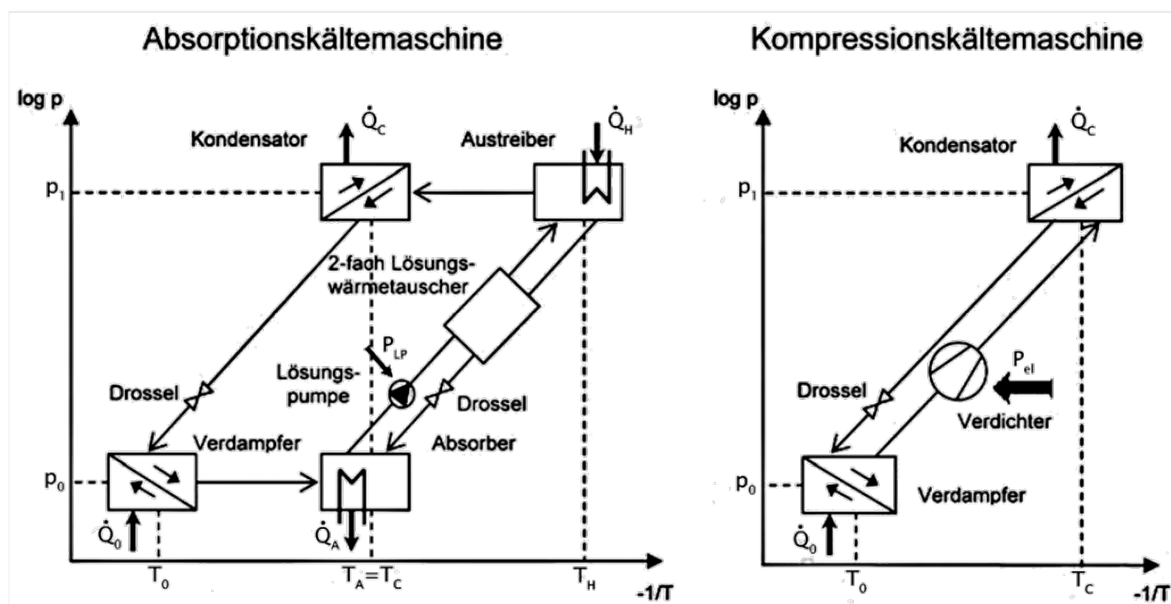


Abbildung 3.5 Prozessschema der AKM und der KKM im $\log p, -1/T$ Diagramm nach [Eic12, S. 211]

In Tabelle 3.1 sind einige wichtige Vorteile der beiden Techniken zusammengefasst.

Tabelle 3.1 Vergleich der Vorteile von KKM und AKM [Geb02, S. VI.8], [ASU95], [Sch09, S. 3-4]

KKM gegenüber AKM	AKM gegenüber KKM
<ul style="list-style-type: none"> • kompakte Bauweise • Investitionskosten • Dynamik • geringe Abwärmemenge 	<ul style="list-style-type: none"> • Kosten für Wartung und Instandhaltung • Zuverlässig- und Langlebigkeit • Teillastverhalten • Vibrations- und Geräuscharmheit • niedrigerer elektrischer Energieverbrauch

Ein nicht unwesentlicher Unterschied der Verfahren liegt in ihrem Platzbedarf. Der Platzbedarf von Absorptionskältemaschinen ist von der geforderten Kälteleistung und auch von der zur Verfügung stehenden Temperatur des Heizmediums abhängig. Der Platzbedarf einer Kompressionskälteanlage ist viel geringer. Die Geometrien einer Kompressions- und Absorptionskältemaschine in der Abhängigkeit der Kälteleistung können der VDI 3803 entnommen werden.

Die Kompressionskältetechnik hat zwar eine bessere Dynamik, d. h., sie kann schnell auf eine geforderte Kälteleistung reagieren, liefert im Teillastbereich jedoch erheblich schlechtere Leistungszahlen. Die Absorptionskältetechnik weist zwar ein träges Betriebsverhalten auf, hat aber ein sehr gutes Teillastverhalten bei nahezu konstanten Leistungszahlen. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 3.6 dargestellt.

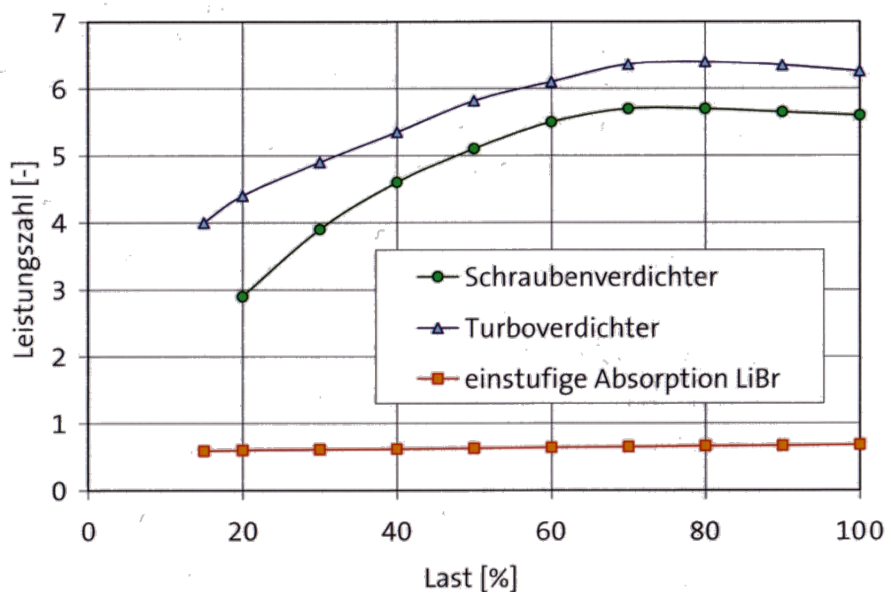


Abbildung 3.6 Teillastverhalten von AKM und KKM [Hen09, S. 94]

Seit einigen Jahren ist ein magnetgelagerter Turboverdichter auf dem Markt verfügbar, welcher durch eine stufenlose Drehzahlregelung ein sehr gutes Teillastverhalten aufweist.

Für eine mögliche Systemauswahl ist nicht nur die Abwägung von Vor- und Nachteilen von Bedeutung, sondern auch ein Vergleich ihrer wesentlichen Merkmale. Dieser Vergleich ist in Tabelle 3.2 für die Kompressions- sowie die Absorptionskältemaschinen dargestellt.

Tabelle 3.2 Gegenüberstellung KKM und AKM [Sch081, S. 28], [Ste96, S. 11-12], [Geb02, S. VI.8], [ASU95, S. 4-8]

	Kompressionskälteanlage (KKM)	Absorptionskälteanlage (AKM) mit NH ₃	Absorptionskälteanlage (AKM) mit LiBr
physikalischer Kühlungseffekt	Kaldampfprozess Verdampfung bei niedrigem Druck: Wärmeaufnahme Kondensation bei hohem Druck: Wärmeabgabe		
Verdichtungsprinzip	mechanisch	thermisch	
Antriebsenergie	hochwertige Antriebsenergie (z. B. Strom)	„minderwertige“ Antriebsenergie (z. B. Abwärme) 85 ... 120 ... 180 °C 85 ... 180 °C	
Kältemittel	chlorierte oder chlorfreie Kohlenwasserstoffe	H ₂ O und NH ₃ als Absorptionsmittel	H ₂ O und LiBr als Absorptionsmittel
spez. Primär- energieverbrauch	1,3 ... 1,65	0,6 ... 1,0	
Leistungszahl/COP	$COP_{KKM} = \frac{\dot{Q}_0}{P_{el}}$ 3 ... 5	$COP_{AKM} = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_H}$ 0,3 ... 0,55 ... 0,7 (1-stufig) 0,6 ... 0,75 (2-stufig) 1,0 ... 1,30	
Abwärme	$\dot{Q}_{ab} = \dot{Q}_0 * \left(1 + \frac{1}{COP_{KKM}}\right)$ 1,2 ... 1,3	$\dot{Q}_{ab} = \dot{Q}_0 * \left(1 + \frac{1}{COP_{AKM}}\right)$ 1,9 ... 2,7	
Kältetemperatur	-50 ... 15 °C	-50 ... -10 ... 5 °C	5 ... 15 °C
Kälteleistung	50 ... 5000 kW	150 ... 1100 ... 5500 kW	15 ... 400 ... 5000 kW

Für eine endgültige Systemauswahl ist der wirtschaftliche Einsatz der Anlage von großer Bedeutung. Die Absorptionskältetechnik bietet sich vor allem dort als wirtschaftliche Lösung gegenüber der Kompressionskältetechnik an, wo günstige Wärme, wie Abwärme aus einer KWK-Anlage, industrielle Abwärme etc., mit ausreichenden Temperaturen zur Verfügung steht.

In den folgenden Kapiteln sollen sowohl die zentrale als auch die dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung als Antriebsenergie für Absorptionskältemaschinen unter ökologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten näher betrachtet werden.

4 Möglichkeiten der Nutzung von Abwärme zur Kälteerzeugung

Absorptionskälteanlagen können entweder direkt mit Gas befeuert oder durch Abwärme beheizt werden. Für die Nutzung von Abwärme gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Folgende Wärmequellen können beispielsweise für den Betrieb einer Absorptionskältemaschine zum Einsatz kommen:

- Abwärme aus einer KWK-Anlage (zentral oder dezentral)
- Abwärme aus einem industriellen Prozess
- Wärme aus einer solarthermischen Anlage
- Abwärme von Brennstoffzellen

Heizmitteltemperaturen zwischen 80 und 130 °C stellen für die Absorptionskältetechnik einen idealen Arbeitsbereich dar. Die Kälteleistung einer Absorptionskältemaschine steigt mit der zugeführten Heizleistung. Der Zusammenhang zwischen der Kälteleistung und dem Heizwärmebedarf ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

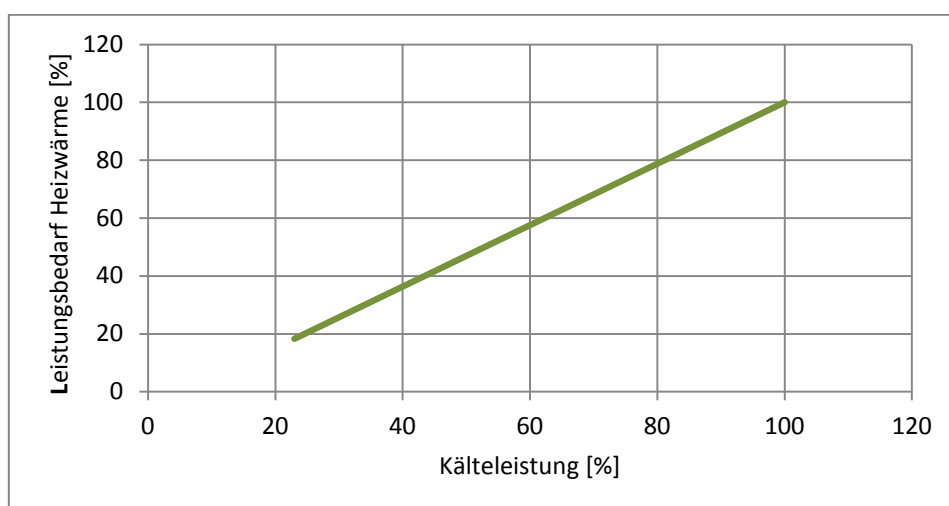


Abbildung 4.1 Kälteleistung einer AKM im Verhältnis zum Heizwärmebedarf nach [Sch10, S. 207]

Es befinden sich auch schon einzelne Absorptionskälteanlagen auf dem Markt, die laut Herstellerangaben mit Heizwassertemperaturen von 70 °C auskommen.

4.1 Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

Im Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) findet sich folgende Definition für die Kraft-Wärme-Kopplung:

„Kraft-Wärme-Kopplung ist die gleichzeitige Umwandlung von eingesetzter Energie in elektrische Energie und in Nutzwärme in einer ortsfesten technischen Anlage.“ [KWKG02].

Im Gegensatz zu einer getrennten Erzeugung von Wärme und elektrischer Energie kann die gekoppelte Erzeugung den eingesetzten Energieträger weitaus besser ausnutzen.

Entscheidend für einen wirtschaftlichen Einsatz der KWK-Anlagen ist ihre möglichst gleichmäßige Auslastung über das Jahr hinweg. In den Sommermonaten sind jedoch die Wärmenetze durch die sinkende Abnahme seitens der Verbraucher, aufgrund der nicht benötigten Raumbeheizung, schwach ausgelastet. Dagegen sind die Kühllasten in dieser Zeit klimabedingt besonders hoch [Hen09, S. 13] [Sch081, S. 26].

Die ungenutzte Wärme im Sommerhalbjahr steht somit für den Betrieb einer AKM zur Kälteerzeugung zur Verfügung. Wenn die Anlage zusätzlich Kälte erzeugen kann, dann spricht man von der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK). Abbildung 4.2 zeigt das Prinzip einer Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs-Anlage.

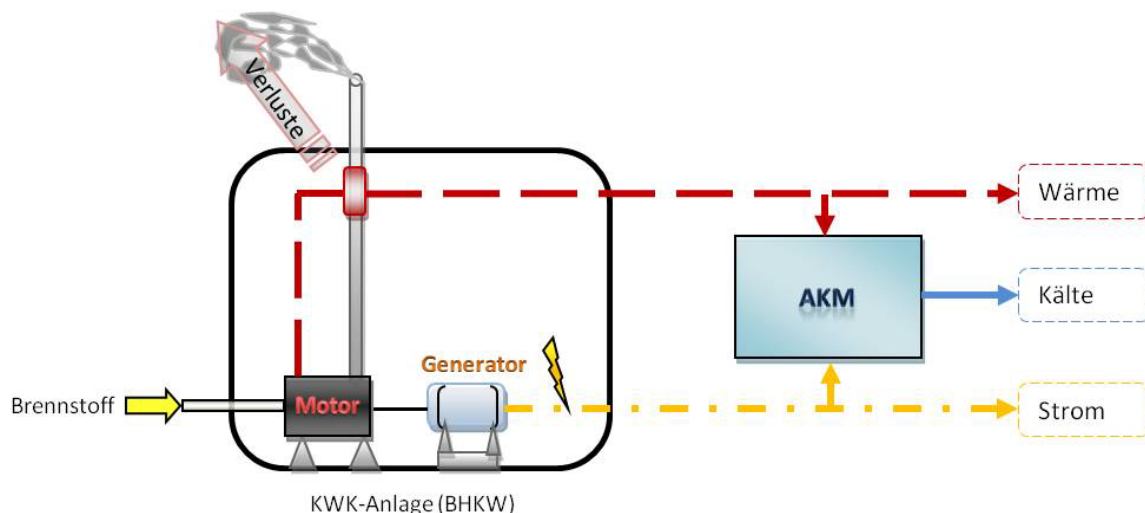


Abbildung 4.2 Prinzip der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

Die Kopplung einer KWK-Anlage mit einer AKM zu einem KWKK-System erhöht die Auslastung der KWK-Anlage und senkt so die Betriebskosten. Als Vorteile eines KWKK-Systems gegenüber der herkömmlichen Wärme- und Kälteerzeugung sind vor allem noch folgende Punkte aufzuzählen:

- Reduzierung der CO₂-Emissionen durch reduzierten Primärenergieeinsatz
- Verwendung umweltfreundlicher und natürlicher Kältemittel
- günstige Abwärmenutzung
- erhöhte Auslastung der KWK-Anlage
- Verringerung des Strombedarfs und damit Entlastung der Stromnetze

Heute kommen KWKK-Anlagen hauptsächlich in den in Tabelle 4.1 genannten Bereichen zum Einsatz.

Tabelle 4.1 Anwendungsgebiete der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung nach [ASU95]

Gebäudeklimatisierung	Prozesskühlung
<ul style="list-style-type: none"> • Büro- und Verwaltungsgebäude • Hotels • Flughäfen • Einkaufszentren • Krankenhäuser 	<ul style="list-style-type: none"> • Lebensmittelbranche • Pharmaindustrie • Elektroindustrie • Druck- und Medienindustrie

KWK-Anlagen lassen sich abhängig vom Erzeugerort in zentrale und dezentrale Systeme unterteilen.

Im Weiteren wird auf die Versorgung von Absorptionskältemaschinen durch die Kraft-Wärme-Kopplung eingegangen.

4.1.1 Zentrale Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (Fernwärme)

In den großen Städten der Bundesrepublik Deutschland gibt es mittlerweile ein weit verzweigtes und flächendeckendes Fernwärmenetz. Durch Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, zu denen auch Müllverbrennungsanlagen zählen, wird gleichzeitig elektrische und thermische Energie erzeugt. Die Wärmeenergie wird dann in das Fernwärmenetz eingespeist und zum Verbraucher transportiert.

Der Betreiber des Hamburger Fernwärmeversorgungssystems weist für sein Fernwärmenetz einen Primärenergiefaktor f_p von 0,568 nach und garantiert eine Mindesttemperatur für die eingespeiste Wärme von 90 °C im Sommerhalbjahr. Diese Temperatur ermöglicht prinzipiell den Betrieb einer Absorptionskälteanlage mit dem Vorteil eines in den Sommermonaten besser ausgelasteten Fernwärmenetzes. So kann die im Sommerhalbjahr meist überschüssig produzierte Wärme, die sonst ungenutzt abgeführt wird, für die Kälteerzeugung genutzt

werden. Bei einer ausreichenden Anzahl an Abnehmern der Wärme könnte dies dazu führen, dass das Fernwärmenetz auch im Sommer beim Winter-Temperaturniveau von 130 °C betrieben werden kann.

Für einen wirtschaftlichen Einsatz der Fernwärme im Verbund mit einer Absorptionskälteanlage ist jedoch der Preis für die bezogene Wärmeenergie ausschlaggebend. Die Fernwärmepreise unterscheiden sich aber zwischen den verschiedenen Fernwärmeversorgungsunternehmen erheblich. Dies ist bedingt durch die unterschiedlich zum Einsatz kommenden KWK-Anlagen und hängt zudem von den örtlichen Gegebenheiten, z. B. Personalkosten, Steuern etc., ab [Scr09, S. 758].

4.1.2 Dezentrale Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (BHKW)

Dezentrale Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen erzeugen sowohl elektrische als auch thermische Energie und werden als Blockheizkraftwerke (BHKW) bezeichnet. Sie bestehen aus einem Verbrennungsmotor, der einen Generator zur Stromerzeugung antreibt, und einem System zur Abwärmenutzung. Blockheizkraftwerke sind modular aufgebaut und können so den unterschiedlichen Bedürfnissen angepasst werden. Einzelne BHKW-Module stehen in einem Leistungsbereich von wenigen kW_{el} bis zu 10 MW_{el} auf dem Markt zur Verfügung. Es lassen sich Heizwassertemperaturen zwischen 90 und 110 °C erzielen. Für den Antrieb von Absorptionskältemaschinen sind sie somit gut geeignet.

Um einen wirtschaftlichen Betrieb eines BHKW zu erreichen, sollte dieses über das Jahr gut ausgelastet sein und hauptsächlich unter Volllast betrieben werden. Für den Betrieb und die Auslegung einer BHKW-Anlage gibt es grundsätzlich drei Möglichkeiten:

- stromgeführt,
- wärmegeführt

und eine Kombination aus wärme- und stromgeführter Betriebsweise [Sch10, S. 32].

In Tabelle 4.2 sind die verschiedenen Betriebsmöglichkeiten eines BHKW aufgelistet und nach den einzelnen Bedarfsfällen aufgeteilt.

Tabelle 4.2 Betriebsweise von BHKW-Anlagen [Now12]

	wärmegeführt	stromgeführt	kombiniert
Strom- verwendung	ohne Einschränkung (Eigennutzung und/oder Netzeinspeisung)	nach Bedarf der Verbraucher, nach wirtschaftlicher Erwägung	nach Bedarf der Verbraucher, nach wirtschaftlicher Erwägung
Wärme- verwendung	nach Bedarf der Verbraucher	ohne Einschränkung ggf. Zwischenspeicherung	nach Bedarf der Verbraucher ggf. Zwischenspeicherung ggf. stromseitige Einschränkungen
Anwendungs- beispiele	Energieversorgung von Gebäuden	Einbindung in Fernwärmesysteme	Energieversorgung von Krankenhäusern

In der Regel werden BHKW-Anlagen wärmegeführt betrieben. Für die Dimensionierung der Anlage und ihren wirtschaftlichen Betrieb ist eine möglichst genaue Planung und Auslegung von großer Bedeutung. Dazu sollte der Wärmebedarf mit seinem Verlauf über das Jahr hinweg gut analysiert und in einer Jahresdauerlinie festgehalten werden.

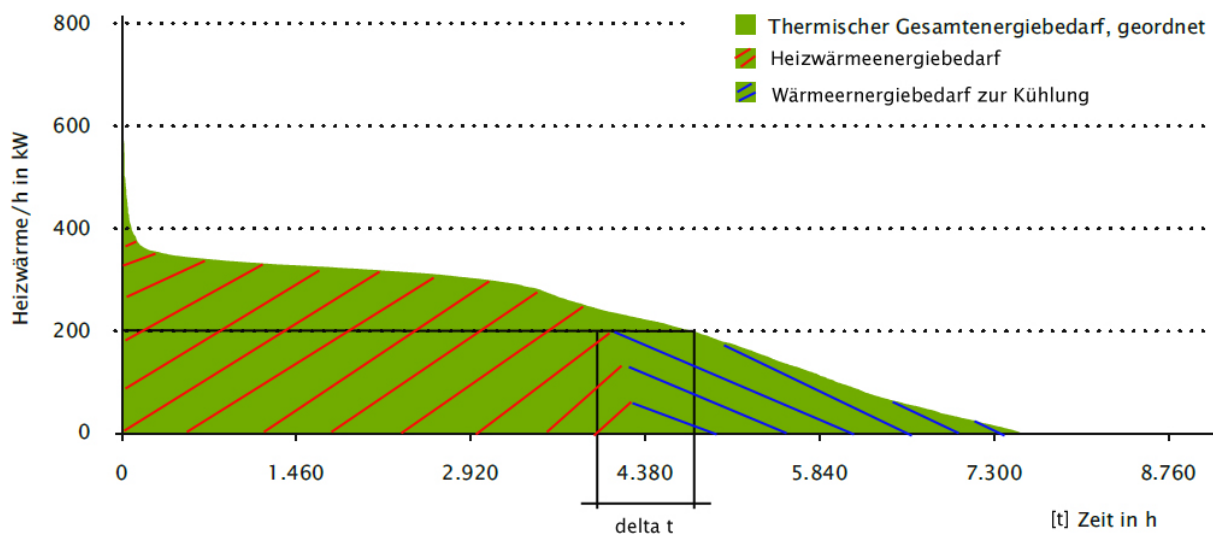


Abbildung 4.3 Geordnete Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs von AKM und Gebäudeheizung nach [Hes12, S. 271]

Anhand der Jahresdauerlinie kann über den Wärmebedarf die Leistung der KWK-Anlage bestimmt werden, so dass möglichst viele Vollbenutzungsstunden über das Jahr sichergestellt sind. Der gekoppelte Betrieb mit einer Absorptionskälteanlage begünstigt, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, eine möglichst große Jahresauslastung. Zur Auslegung von BHKW-Anlagen kann die VDI 3985 herangezogen werden.

4.2 Primärenergieeffizienz

Die Energieerzeugung durch KWK-Anlagen hat energetische und auch ökologische Vorteile gegenüber der getrennten Wärme- und Stromerzeugung. So kann die KWK-Technik einen deutlich niedrigeren Primärenergieverbrauch erzielen. Dies ist im Hinblick auf die steigende Nachfrage nach zertifizierten energieeffizienten Gebäuden (Green Building) von großer Bedeutung. Auch die Energieeinsparverordnung (EnEV) zieht für die Bewertung eines Gebäudes den Primärenergieverbrauch heran.

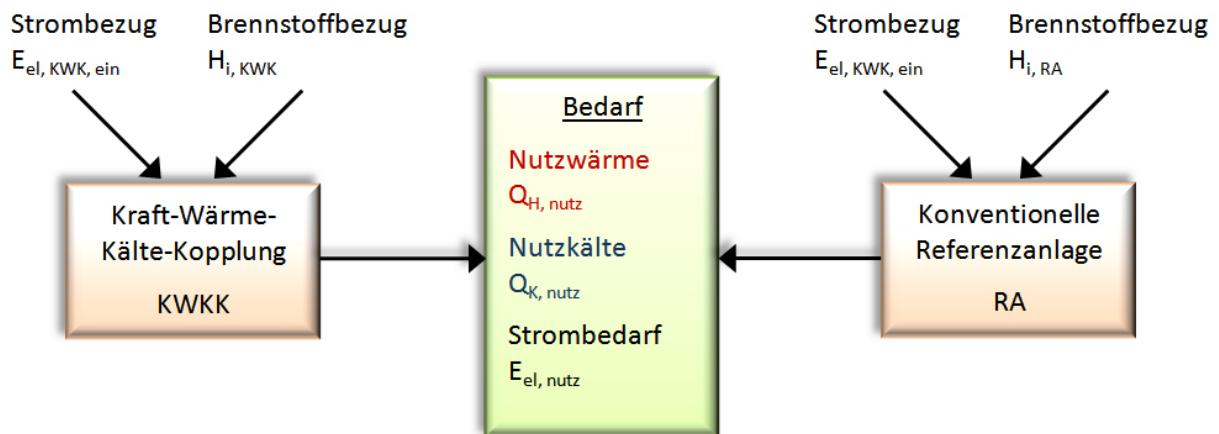


Abbildung 4.4 Energiebilanz zur Ermittlung der Primärenergieeinsparung von KWKK-Anlagen nach [Hen09, S. 76]¹

Um eine energetische Bewertung zwischen KWK(K) und einer Referenzanlage vornehmen zu können, muss zuerst der Primärenergiegehalt der zugeführten Energieströme betrachtet werden:

$$PE_{BrSt} = \frac{H_{i, BrSt}}{\eta_{BrSt}} \quad (4.23)$$

$$PE_{el} = \frac{E_{el}}{\eta_{el}} \quad (4.24)$$

Für die in Abbildung 4.4 aufgeführten Anlagen (KWKK und die Referenzanlage (RA)) gilt für den Primärenergieaufwand (PE) zur Deckung des jeweils selben Nutzens:

¹ Alle Größen sind Energiegrößen mit der Einheit kWh.

H_i bezeichnet den Energiegehalt eines Brennstoffes (z. B. Öl oder Erdgas).

KWKK-Anlage:

$$PE_{KWKK} = PE_{BrSt,KWKK} + PE_{el,KWKK,ein} - PE_{el,KWKK,aus} = \frac{H_{i,BrSt,KWKK}}{\eta_{BrSt}} + \frac{E_{el,KWKK,ein}}{\eta_{el}} - \frac{E_{el,KWKK,aus}}{\eta_{el}} \quad (4.25)$$

Der von der KWKK-Anlage überschüssige und in das Stromnetz eingespeiste Strom wird als vermiedener erzeugter Strom im öffentlichen Netz betrachtet und in der Energiebilanz (4.25) berücksichtigt.

Referenzanlage:

$$PE_{RA} = PE_{BrSt,RA} + PE_{el,RA} = \frac{H_{i,BrSt,RA}}{\eta_{BrSt}} + \frac{E_{el,RA}}{\eta_{el}} \quad (4.26)$$

Die relative Primärenergieeinsparung von KWKK zum Vergleichssystem lautet:

$$\Delta PEE_{KWKK} = \frac{PE_{RA} - PE_{KWKK}}{PE_{RA}} \quad (4.27)$$

[Hen09, S. 75-78].

Wie hoch die Primärenergieeinsparung bei dem Betrieb einer KWKK-Anlage ausfällt, ist stark vom Einzelfall abhängig. Es können aber unter speziellen Bedingungen Primärenergieeinsparungen von bis zu 30 % gegenüber der KKM erreicht werden [Sch99, S. 115], [Sch98, S. 1]. Jedoch lässt sich für die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung festhalten, dass sie die eingesetzte Primärenergie zum größtmöglichen Teil ausnutzt und auf diese Weise zu einer nennenswerten Senkung des CO₂-Ausstoßes beiträgt.

4.3 Auslegungs- und Betriebsbedingungen von Absorptionskältemaschinen

Für optimale Antriebsbedingungen der Absorptionskältetechnik sind Antriebstemperaturen zwischen mindestens 80 und maximal ca. 130 °C notwendig. Pauschal lässt sich jedoch die Aussage treffen: je höher die Antriebstemperatur, desto wirtschaftlicher läuft die Absorptionskälteanlage. Tabelle 4.3 zeigt die wesentlichen technischen Merkmale von KWK-Prozessen und ihr nutzbares Abwärmeniveau.

Tabelle 4.3 Wesentliche technische Merkmale von KWK-Prozessen [Hes12], [Tra09], [Hen09]

Technologie	Dampfturbine	Mikrogasturbine	Verbrennungsmaschine		Stirling	Brennstoffzellen
			Otto	Diesel		
Brennstoffe	alle	(Bio-)Gas, Propan, flüssige Brennstoffe	Erdgas, Biogas, flüssige Brennstoffe, Propan	Erdgas, Propan, (Bio-)Diesel, Biogas	alle	Wasserstoff, Gas
Leistungsbereich	50 kW - 500 MW	15 kW - 300 kW	3 kW - 6 MW	5 kW - 20 MW	1 kW - 1,5 MW	5 kW - 2 MW
η_{el} [%]	10 - 20	25 - 30	25 - 42	28 - 44	10 - 30	40 - 48
η_{ges} [%]	60 - 80	60 - 85	70 - 92	65 - 90	65 - 85	85 - 90
Teillastverhalten	-	0	+	+	+	++
Abwärmeebeneau [°C]	40 - 200	80 - 250	80 - 100	70 - 100	< 100	80 - 400
Stand der Technik	bewährt	bewährt	bewährt	bewährt	Kleinserien	Pilotanlagen
Standzeit [Jahre]	25 - 30	10	20	20	10	10 - 20

Die meisten Prozesse aus Tabelle 4.3 stellen ausreichende Temperaturen für den Antrieb einer Absorptionskältemaschine zur Verfügung. Auch Fernwärmenetze sind meistens vom Temperaturniveau geeignet, hier muss jedoch für den Einzelfall beim örtlichen Betreiber das Jahrestemperaturniveau erfragt werden.

Ein wirtschaftlicher Betrieb einer Absorptionskälteanlage hängt vor allem vom Energiepreisniveau und den Systemparametern der Kälteverbraucher ab. Deshalb ist für einen effizienten Betrieb einer KWK-Anlage eine gründliche Planung notwendig, die mögliche

gegenseitige Einflüsse der Parameter berücksichtigt. Meist sind für eine missglückte Verwirklichung eines KWKK-Systems nicht optimale Auslegungsparameter, wie z. B. die in Deutschland üblichen Vorgaben für die Kaltwassertemperatur (6/12 °C), verantwortlich [Plu08, S. 14]. Die in der modernen Gebäudetechnik zum Einsatz kommenden Systeme, wie Kühldecken oder die thermische Bauteilaktivierung, bieten genau hier Eingriffsmöglichkeiten, da sie meist mit höheren Kaltwassertemperaturen auskommen. Das führt nach [Sch081, S. 31] dazu, dass beispielsweise eine Erhöhung der Kaltwasservorlauftemperatur von 6 auf 8 °C eine Senkung der Antriebstemperatur um 4 K zulässt. Die thermische Bauteilaktivierung ermöglicht sogar eine Kaltwasservorlauftemperatur von 18 °C. Aus energetischen Gründen geht man heutzutage bei der Systemplanung ohnehin von einem Temperaturniveau von (8/14 °C) für RLT-Anlagen aus.

Für die Planung eines KWKK-Systems lassen sich nach [Sch081, S. 31] folgende Planungsmerkmale festhalten:

- „Bei Anbindung einer AKM an ein Nah- oder Fernwärmenetz: Vermeidung von hydraulischen Restriktionen durch eine möglichst niedrige Rücklauftemperatur bzw. hohe Temperaturspreizung mit kältegeführter Vorlauftemperaturregelung.
- Kaltwassertemperaturen sollten dem tatsächlichen Bedarf angepasst werden. Dies erfordert u. U. niedrigere Antriebstemperaturen für die AKM.
- Ausnutzen niedrigerer Kühlwassertemperaturen (15–27 °C) in der kühleren Übergangszeit, Regelung nach der Feuchtkugeltemperatur der Umgebungsluft (unterer Grenzwert der Kühlwassertemperatur im Kühlturm).
- Ausnutzen der Möglichkeiten der freien Kühlung (Kühlung über das Rückkühlsystem, für die jedoch eine Anhebung der Kaltwassertemperatur auf 10 °C bis 14 °C notwendig ist).
- In den kühleren Jahreszeiten wird keine Luftentfeuchtung benötigt, so dass im Regelfall Kaltwassertemperaturen > 10 °C ausreichend sind.
- Rücklauftemperaturen von 50 °C bis 60 °C sind nur mit mehrstufigen Absorptionskälteanlagen zu erzielen.
- Bei Leistungen ab 800–1000 kW können die Investitionskosten durch eine Aufteilung der Kälteerzeuger für Grund- und Spitzenlast gesenkt werden, wobei letztere über Kaltwasserspeicher oder KKM erbracht wird.

- Eine Erhöhung der Antriebstemperatur ist möglich mit Spitzenlastkesseln oder mit einer kältegeführten Fernwärmeverlauftemperatur zur kurzzeitigen Steigerung der Kälteleistung.“ [Sch081, S. 31].

Die zuvor aufgezeigten Punkte zeigen die technisch und wirtschaftlich vorteilhaften Parameter für die thermische Kälteerzeugung. Diese sind gut verträglich mit den Systemparametern der modernen und durch neue Gesetze geforderten energieeffizienten Gebäudetechnik. Durch die europäische Gebäuderichtlinie (EPBD) und das europäische Green-Building-Programm wurden neue gesetzliche Rahmenbedingungen geschaffen. Auf nationaler Ebene wurden diese Programme durch das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG), das Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz sowie durch weitere Richtlinien ergänzt. Diese gesetzlichen Regelungen machen durch verschiedenartige Förderungen die thermische Kälteerzeugung immer interessanter [Bod09, S. 18-19].

5 Wirtschaftlicher Vergleich der Kälteerzeugung

Die Entscheidung für eine KWKK-Anlage fällt nur dann, wenn die entstehenden Gesamtkosten niedriger als oder nur gleich hoch wie die für ein herkömmliches Kälteerzeugungssystem sind. Letztendlich hängt es, wie in [Sch98] beschrieben, stark von den Strombezugsbedingungen und dem anzusetzenden Kältepreis ab. Verlässliche Aussagen über die Wirtschaftlichkeit eines KWKK-Systems können nur dann getroffen werden, wenn eine Prüfung der individuellen und örtlichen Bedingungen erfolgt ist. Abbildung 5.1 zeigt grundsätzliche Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit eines KWKK-Systems.



Abbildung 5.1 Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit eines KWKK-Systems

Im Folgenden sollen einzelne Rahmenbedingungen, die zu einer Bewertung der Wirtschaftlichkeit eines KWKK-Systems beitragen, betrachtet werden.

5.1 Fördermöglichkeiten

In Deutschland gibt es diverse Fördermöglichkeiten, um den Anteil effizienter und umweltfreundlicher Techniken zur Energiegewinnung auf dem deutschen Energiemarkt zu steigern. Die aus aktueller Sicht für die KWK(K)-Technik in Frage kommenden Fördermöglichkeiten sind in Abbildung 5.2 dargestellt. Neben den staatlichen Fördermitteln gibt es auch die Möglichkeit zinsgünstige Kredite der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) für den Umstieg auf KWK und für den Einbau von Blockheizkraftwerken in Anspruch zu nehmen.

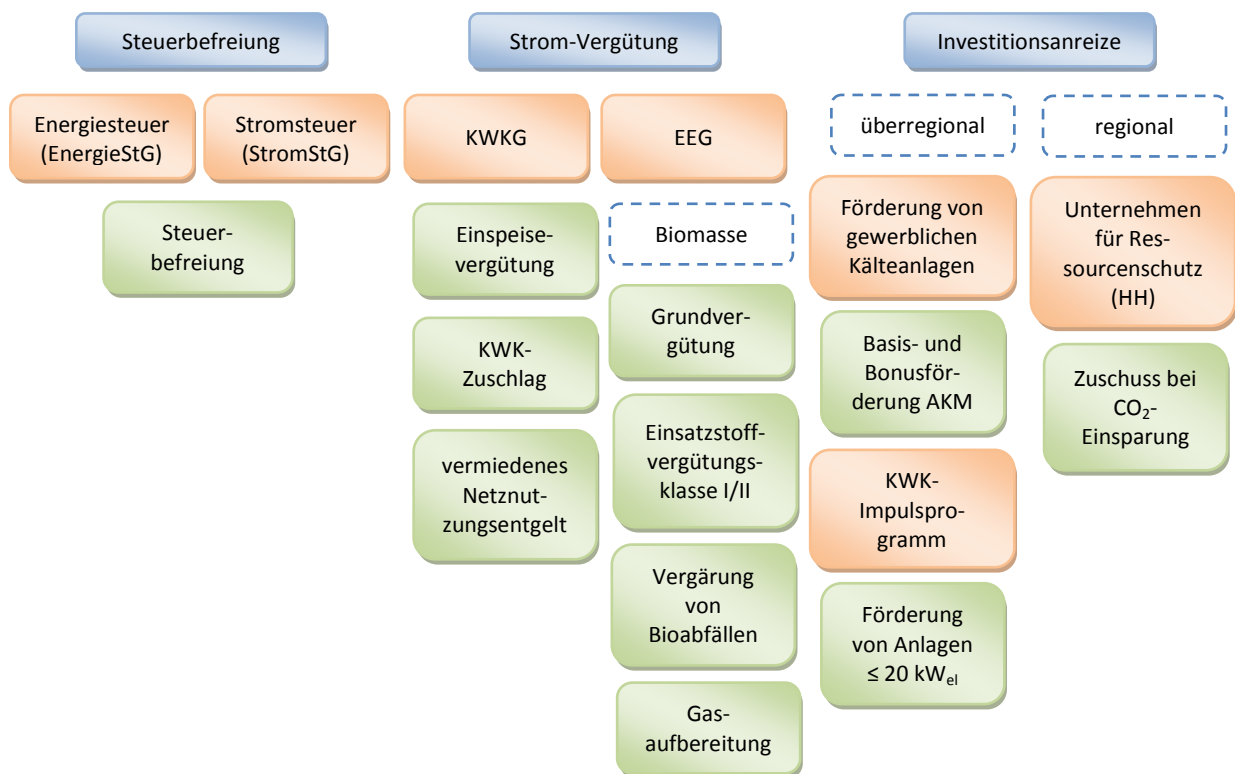


Abbildung 5.2 Fördermöglichkeiten KWK(K)-Anlagen nach [HGC11]

Alle folgend beschriebenen Gesetze (Fördermöglichkeiten) sind einem ständigen Wandel unterworfen und können schon nach kurzer Zeit durch Gesetzesänderungen nicht mehr aktuell sein. Deshalb werden nur grundsätzliche Ausschnitte der Gesetze behandelt. Für eine genaue Bewertung der Fördermöglichkeiten müssen die zu diesem Zeitpunkt aktuellen, gültigen, regionalen und überregionalen Gesetze herangezogen werden.

5.1.1 Energiesteuer- und Stromsteuergesetz – „Öko-Steuer-Gesetz“

Unter anderem bietet das Energiesteuergesetz, (§53) für KWK-Anlagen, die Möglichkeit einer Rückerstattung der Energiesteuer. Mit einem Nutzungsgrad von mind. 70 % sind die Voraussetzungen für die Rückerstattung des Energiesteueranteils erfüllt. Mögliche Rückerstattungsbeträge pro eingesetztem Brennstoff sind Tabelle 5.1 zu entnehmen.

Tabelle 5.1 Rückerstattungsbeträge der Energiesteuer²

Brennstoff	Erstattung
Leichtes Heizöl	6,135 ct/kg
Sonstige Heizöle	2,5 ct/kg
Flüssiggas	6,06 ct/kg
Erdgas	0,55 ct/kWh

Bis zu einer elektrischen Nennleistung von 2 MW_{el} befreit das Stromsteuergesetz (StromStG) die Betreiber einer BHKW-Anlage in Höhe von 20,50 €/MWh auf den selbst verbrauchten Strom von der Stromsteuer.³

5.1.2 Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz

Das Ziel des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes [KWKG02] ist es, den Anteil des KWK-Stroms am deutschen Strommix bis zum Jahre 2020 auf 25 % zu steigern. Der Betreiber erhält für den von der KWK-Anlage erzeugten und in das Stromnetz eingespeisten Strom eine Vergütung vom Netzbetreiber. Die Höhe der Vergütung setzt sich wie folgt zusammen:

Vergütung = vereinbarter Strompreis + KWK-Bonus + vermiedene Netznutzungsentgelte
[HGC11, S. 35],

vereinbarter Strompreis:

Hier ist der durchschnittliche Preis für Grundlaststrom an der Strombörse Leipzig (EPEX Spot SE) heranzuziehen.

² [Ene06] §53 und §2 Abs. 3.

³ [Str99] §3 und §9 Abs. 1 Satz 3.

KWK-Bonus:

Die Höhe und Dauer der Zuschlagszahlungen für hocheffiziente, modernisierte und neue Anlagen sind der Tabelle 5.2 zu entnehmen.

Tabelle 5.2 Höhe und Zahlungsdauer des KWK-Zuschlags [HGC11, S. 36], [KWK02]

elektrische Leistung	Zuschlag	Förderzeitraum	
	ct/kWh	Jahre	Vollbenutzungsstunden
bis 50 kW _{el}	5,11	10	-
über 50 kW _{el} bis 2 MW _{el}			
- für den Leistungsanteil bis 50 kW _{el}	5,11	6	30.000
- für den Leistungsanteil über 50 kW _{el}	2,10	6	30.000
über 2 MW _{el}			
- für den Leistungsanteil bis 50 kW _{el}	5,11	6	30.000
- für den Leistungsanteil über 50 kW _{el} bis 2 MW _{el}	2,10	6	30.000
- für den Leistungsanteil über 2 MW _{el}	1,50	6	30.000
- Industrie (produzierendes Gewerbe)	1,50	4	30.000
Brennstoffzellen-Anlagen	5,11	10	-

Vermiedene Netznutzungsentgelte:

Dem Anlagenbetreiber wird ein vermiedenes Netznutzungsentgelt bezahlt. Der Gesetzgeber hat die Höhe des Zuschlags nicht geregelt, sondern es ist nach [KWK02] „nach den maßgeblichen Rechtsvorschriften, ansonsten nach den anerkannten Regeln der Technik [...]“ [KWK02, S. 3, §4] zu berechnen. Marktübliche Vergütungspreise liegen nach [HGC11, S. 36] zwischen 0,15 und 0,55 ct/kWh.

Es werden nur hocheffiziente Anlagen gefördert, die nachweislich eine Primärenergieeinsparung von mehr als 10 % erreichen. Für die Berechnung der Primärenergieeinsparung ist folgende Formel heranzuziehen:⁴

$$PEE = \left(1 - \frac{1}{\frac{\eta_{th,KWK}}{\eta_{th,Bestand}} + \frac{\eta_{el,KWK}}{\eta_{el,Ref}}} \right) * 100 \% \quad (5.28)$$

Wird die Anlage mit einem erneuerbaren Brennstoff (z. B. Biogas) betrieben, dann wird die Vergütung mittels des Erneuerbare-Energien-Gesetzes ermittelt. KWK-Anlagen, die Fernwärmeversorgung ersetzen und somit verdrängen, werden nicht gefördert.

⁴ Anhang III L52/59 Amtsblatt der Europäischen Union vom 21.02.2004.

5.1.3 Erneuerbare-Energien-Gesetz

Das Ziel des Erneuerbare-Energien-Gesetzes ist es, den Anteil erneuerbarer Energien am deutschen Strommix bis zum Jahre 2020 auf 35 % zu steigern. Kommen für den Betrieb einer KWK-Anlage nachwachsende Brennstoffe zum Einsatz, wird diese Anlage nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz gefördert. Die Vergütung ist aufgliedert in

1. eine Grundvergütung,
2. eine Erhöhung der Grundvergütung nach Einsatzstoffvergütungskategorie I bzw. II und
3. evtl. einen Bonus für die Gasaufbereitung.

Tabelle 5.3 zeigt die Vergütungssätze für die Stromerzeugung nach EEG⁵ (Stand 2012).

Tabelle 5.3 Vergütungssätze für die Stromerzeugung aus Biomasse nach dem EEG, [EEG08]

Anlagengröße	≤ 75kW ¹⁾ ct/kWh	≤ 150 kW ct/kWh	≤ 500 kW ct/kWh	≤ 750 kW ct/kWh	≤ 5 MW ct/kWh	≤ 20 MW ct/kWh
Grundvergütung	25,0 ¹⁾	14,3	12,3	11,0	11,0	6,0
Einsatzstoffvergütungskategorie I ⁴⁾	25,0 ¹⁾	6,0	6,0	5,0/2,5 ²⁾	4,0/2,5 ²⁾	-
Einsatzstoffvergütungskategorie II ⁵⁾	25,0 ¹⁾	8,0	8,0	8,0/6,0 ³⁾	8,0/6,0 ³⁾	-
Vergütung für Vergärung von Bioabfällen	-	16,0	16,0	14,0	14,0	14,0
Gasaufbereitungs-Bonus						
- bis 700 Nm ³ /h	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
- bis 1000 Nm ³ /h	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
- bis 1400 Nm ³ /h	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

- 1) Sonderkategorie für Gülle-Biogasanlagen bis 75 kW installierter Leistung bei Vor-Ort-Verstromung, nicht kombinierbar (d. h. keine zusätzliche Grund- oder Einsatzstoffvergütung bzw. kein Gasaufbereitungsbonus).
- 2) Bei Strom aus Rinde oder Waldrestholz: Absenkung der Vergütung auf 2,5 ct/kWh.
- 3) Bei Strom aus Gülle: Absenkung der Vergütung auf 6,0 ct/kWh.
- 4) Darunter fallen Rohstoffe aus Mais und Holz aus sogenannten Schnellwuchsplantagen (früher Bonus für nachwachsende Rohstoffe).
- 5) Nur für ausgewählte und ökologisch wünschenswerte Rohstoffe.

Die Vergütungssätze werden für 20 Jahre zuzüglich des Inbetriebnahmejahrs gezahlt und unterliegen einer Degression ab dem Jahr 2013 von jährlich 2 %. Für eine genaue Berechnung des Vergütungssatzes sind das Erneuerbare-Energien-Gesetz heranzuziehen und die individuellen Bestimmungen des Gesetzes zu beachten.

⁵ [EEG08] Vergütungssätze nach §27.

5.1.4 KWK-Impulsprogramm

Das KWK-Impulsprogramm soll den breiten Einsatz von kleinen KWK-Anlagen bis 20 kW_{el} fördern. Das Impulsprogramm fördert mit einem einmaligen Investitionszuschuss, der anhand der elektrischen Leistung gestaffelt ist (siehe Tabelle 5.4).

Tabelle 5.4 Förderung nach dem KWK-Impulsprogramm

Leistung kW _{el}	Förderung € je kW _{el}
≤ 1	1.500
> 1 bis ≤ 4	300
> 4 bis ≤ 10	100
> 10 bis ≤ 20	50

Hohe Effizienzanforderungen an die KWK-Anlage gehören unter anderem zu den Voraussetzungen für eine Förderungsbewilligung. Außerdem ist eine Listung der KWK-Anlage auf der Internetseite des BAFA erforderlich. Weitere Vorgaben gibt es für die Primärenergieeinsparung der KWK-Anlagen. Anlagen bis zu 10 kW müssen mindestens 15 % und Anlagen von 10 bis 20 kW mindestens 20 % Primärenergieeinsparung erreichen. Der Gesamtjahresnutzungsgrad muss mindestens 85 % betragen. Die KWK-Anlagen müssen außerdem folgende den Richtlinien zur Förderung von KWK-Anlagen bis 20 kW_{el} entnommenen Merkmale besitzen:

- einen Wärmespeicher mit einem Energiegehalt von mindestens 1,6 kW pro installiertem kW
- eine Steuerung und Regelung für eine wärme- und stromgeführte Betriebsweise inklusive eines intelligenten Wärmespeichermanagements
- eine definierte Schnittstelle für eine externe Leistungsvorgabe für Anlagen ab 3 kW_{el}
- Durchführung eines hydraulischen Abgleichs für das Heizungssystem
- Einsatz von Umwälzpumpen, die mindestens die Effizienzklasse A erfüllen [Bun121]

5.1.5 Unternehmen für Ressourcenschutz – Programm der Hansestadt Hamburg

Neben den überregionalen Förderprogrammen des Bundes gibt es auch regionale Programme zur Förderung effizienter Energieerzeugung. Die Hansestadt Hamburg fördert mit ihrem regionalen Programm „Unternehmen für den Ressourcenschutz“ [Beh09] Projekte zum Klima- und Ressourcenschutz und zur Emissionsminderung. Die Fördermittel werden als Festbetrag pro vermiedener Tonne CO₂ als Investitionskostenzuschuss gewährt. In Tabelle 5.5 ist die Höhe der Zuschüsse pro jährlich vermiedener Tonne CO₂ dargestellt. Vorhaben mit einer Amortisationszeit von bis zu 2 Jahren werden nicht gefördert.

Tabelle 5.5 Förderung pro jährlicher vermiedener Tonne CO₂ nach [Beh09, S. 2]

Technik	Eingesparte t CO ₂ /a	Förderung €/t CO ₂	Zuschuss €
Kälte	≤ 40 t	700	24.000
	> 40 t	100	
KWK/BHKW	≤ 50 t	600	27.000
	> 50 t	60	

5.1.6 Förderung von gewerblichen Kälteanlagen

Eine Möglichkeit zur Förderung der Absorptionskältetechnik bietet das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) mit der Richtlinie: „Förderung und Maßnahmen an gewerblichen Kälteanlagen“. Ziel dieser Richtlinie ist es, einen effizienteren Umgang mit Energie zu fördern und die Emissionen von Treibhausgasen zu reduzieren. Durch die Förderung von Alt- und Neuanlagen soll der Energieverbrauch in der Klima- und Kältetechnik verringert werden. Die Zuteilung der Fördermittel wird in einem 2-stufigen Verfahren bewilligt.

1. Stufe: Einreichen der Unterlagen beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle.
2. Stufe: Einreichen des Verwendungsnachweises nach der Inbetriebnahme beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle.

Des Weiteren unterscheidet die Richtlinie zwischen Basis- und Bonusförderung.

1. Basisförderung Neuanlagen:

Es sind Maßnahmen und Anlagen förderbar, wenn

- „als Kältemittel Kohlendioxid, Ammoniak oder nichthalogenierte Kohlenwasserstoffe eingesetzt werden und mittels TEWI-Berechnung durch den Hersteller- und Anbieterneutralen Dienstleister ein Nachweis über die Gesamteffizienz erbracht wird,
- energieeffiziente Komponenten Bestandteil der Anlage sind (Master-Regelung, elektronische Expansionsventile, FU-Steuerung aller Antriebsmotoren) und
- der in einer Auslegungsrechnung ermittelte Jahres-Elektroenergieverbrauch einer Anlage mindestens 100 000 Kilowattstunden und / oder
- die Jahreskosten für elektrische Energie und Leistung der Anlage mindestens 10 000 Euro betragen werden.“ [Bun09, S. 3].

Der Fördersatz für Neuanlagen beträgt 25 % der Nettoinvestitionskosten.

2. Bonusförderung:

„Bonusförderungen sind Zuschüsse zu Investitionsmaßnahmen für marktetaillierte und entwicklungsoptimierte Technologien für in Betrieb befindliche sowie für neu zu errichtende Anlagen, die das Ziel haben, den Beitrag zum Klimaschutz über die Basisförderung hinaus deutlich zu erhöhen. Förderbar sind:

- nichtelektrisch angetriebene Kälteanlagen (zum Beispiel mittels Gasmotor, dessen Abwärme zusätzlich genutzt wird) und
- Maßnahmen zur Nutzung von Abwärme aus Produktionsprozessen (zum Beispiel mittels Wärmerückgewinnung, Wärmepumpen) mit dem Zweck der Bereitstellung von Prozess- und Heizwärme, die im Zusammenhang mit der nach der Basisförderung geförderten Kälteanlage steht.“ [Bun09, S. 4].

Eine Bonusförderung erfolgt nur dann, wenn eine Basisförderung für dieselbe Kälteanlage am selben Standort gewährt wird.

Der Fördersatz beträgt 25 % der Nettoinvestitionskosten bzw. 35 %, wenn zusätzlich CO₂, NH₃ oder nichthalogenierte Kohlenwasserstoffe als Kältemittel eingesetzt werden.

5.2 Kosten

Für die Bewertung einer Investition müssen die einzelnen Kostenpositionen bekannt sein, um eine qualifizierte Aussage über die Gesamtkosten der Investition und somit über ihre Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu Alternativinvestitionen treffen zu können. Die Berechnung der Kosten kann nach VDI 2067 [VDI10] erfolgen. Die VDI 2067 unterscheidet zwischen folgenden Kostengruppen:

- kapitalgebundene Kosten (einschl. Erneuerung)
- bedarfsgebundene Kosten
- betriebsgebundene Kosten (einschl. Instandsetzung)
- sonstige Kosten (Steuern, Versicherungen etc.)

Die Kostengruppe „sonstige Kosten“ kann bis zu einer Anlagengröße von 2 MW_{th} mit 0,25 Prozent [Sch10, S. 315] der Investitionskosten veranschlagt werden. Sie wird im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

5.2.1 Kapitalgebundene Kosten

Für die Ermittlung der Kapitalkosten sind zuerst die Investitionskosten der einzelnen Anlagenteile zu ermitteln. Die jährlichen Kapitalkosten können nach VDI 2067 u. a. mit der Annuitätsmethode bestimmt werden. Dies wird in Kapitel 5.3 näher behandelt.

5.2.1.1 Investitionskosten von AKM und KKM

Die Investitionskosten einer AKM sind stark abhängig von der Betriebsweise und der eingesetzten AKM-Technik. Angaben zu den Investitionskosten zeigt Tabelle 5.6.

Tabelle 5.6 Vergleich der Investitionskosten für AKM und KKM

Quelle	AKM [€/kW _{Kälte}]	KKM [€/kW _{Kälte}]
[Koc09, S. 310]	299 - 382	185 - 236
[Sch081, S. 28]	400 - 600 - 1.800 ¹⁾ 100 - 200 - 1.000 ²⁾	75 - 125
[Hen09, S. 32]	250 - 350 ²⁾	75 - 125
[Sch98, S. 3]	400 - 1.300 ¹⁾ 80 - 150 ²⁾	75 - 125
[Sch10, S. 208]	250 - 1.500 ¹⁾ 250 - 500 ²⁾	125 - 350
[Eic12, S. 151]	400 - 1.250 ¹⁾ 200 - 1.200 ²⁾	-

1) AKM mit NH₃ für Temperaturbereich: 85 ... 120 180 °C

2) AKM mit LiBr für Temperaturbereich: 85 ... 180 °C

Die Daten zeigen ein weites Preisspektrum und machen so eine genau Kostenabschätzung sehr schwierig. Nach [Sch01] und [Geb02] wurden Kostenfunktionen aus diversen Quellen abgeleitet. Die Kostenfunktion mit den Koeffizienten für die „Kälteanlage“ in Tabelle 5.7 berücksichtigt die Kosten für:

- Kältemaschine
- Kalt- und Kühlwasserkreislaufsystem
- Wasseraufbereitung
- Rückkühlanlage
- MSR-Anlage
- Zubehöranlagenteile

Die Koeffizienten für den „Wasserkühlsatz“ berücksichtigen nur die Kosten für die Kältemaschine zum Anschluss an das Rohrleitungsnetz.

Die Kostenfunktion für die Kompressionskältemaschine lautet nach [Geb02]:

$$k_{KKM} \left[\frac{\text{€}}{\text{kW}_{\text{Kälte}}} \right] = a * \dot{Q}_0[\text{kW}]^b + c \quad (5.29)$$

Tabelle 5.7 Koeffizienten für die Kostenfunktion der KKM

Koeffizienten	Wasserkühlsatz	Kälteanlage
A	4.732,2487	4.991,3436
B	-0,7382	-0,6794
C	109,30	179,63
gültig für Kälteleistung/kW	10 -10.000	10 -10.000

und die Kostenfunktion für die Absorptionskältemaschine ohne Rückkühlwerk:

$$k_{AKM} \left[\frac{\text{€}}{\text{kW}_{\text{Kälte}}} \right] = a * \dot{Q}_0[\text{kW}]^b + c \quad (5.30)$$

Tabelle 5.8 Koeffizienten für die Kostenfunktion der AKM

Koeffizienten	einstufige AKM	zweistufige AKM
A	14.740,2095	231.975,0507
B	-0,6849	-1,1422
C	3,29	90,09
gültig für Kälteleistung/kW	50 – 4.750	400 – 5.270

5.2.1.2 Investitionskosten Rückkühlwerke

In der Kostenfunktion (5.29) für die Kompressionskältemaschinen ist das Rückkühlwerk schon enthalten. Bei der Absorptionskältetechnik stellt die Rückkühltechnik einen erheblichen Anteil der Investitionskosten.

Des Weiteren hat die Rückkühltechnik über die Rückkühltemperatur einen enormen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit und die Effizienz der Kälteanlage. Zur Anwendung kommen entweder offene oder geschlossene Rückkühlwerke [Bau04, S. 73]. Die benötigte Rückkühlleistung einer AKM ist, wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, das bis zu 2,5-Fache der Kälteleistung. Nur durch Kühltürme sind Absorptionskältemaschinen effizient zu betreiben, da durch die genutzte Verdunstungswärme eine hohe Kühlleistung erbracht werden kann. Trockene Rückkühler würden im Sommer, bei hohen Umgebungstemperaturen, nicht die erforderlichen tiefen Temperaturen für die benötigte Leistung der AKM liefern.

Zur Bestimmung der Investitionskosten für offene Kühltürme ist die Formel nach [Geb02] heranzuziehen:

$$k_{\text{Kühlturm}} \left[\frac{\text{€}}{\text{kW}_{\text{Kälte}}} \right] = 2.348,2 * \dot{Q}_0 [\text{kW}]^{-1,0398} + 26,15 \quad (5.31)$$

Es können aber durchaus auch Kombinationen verschiedener Rückkühltechniken zum Einsatz kommen.

5.2.1.3 Investitionskosten BHKW

Aktuelle Angaben zu Investitionskosten von BHKW-Anlagen sind in [ASU11] zu finden. Für ein Erdgas betriebenes BHKW sind die Investitionskosten nach folgender Funktion zu berechnen.

$$k_{\text{BHKW}} \left[\frac{\text{€}}{\text{kW}_{\text{el}}} \right] = 9.332,6 * P_{\text{el}}^{-0,461} \quad (5.32)$$

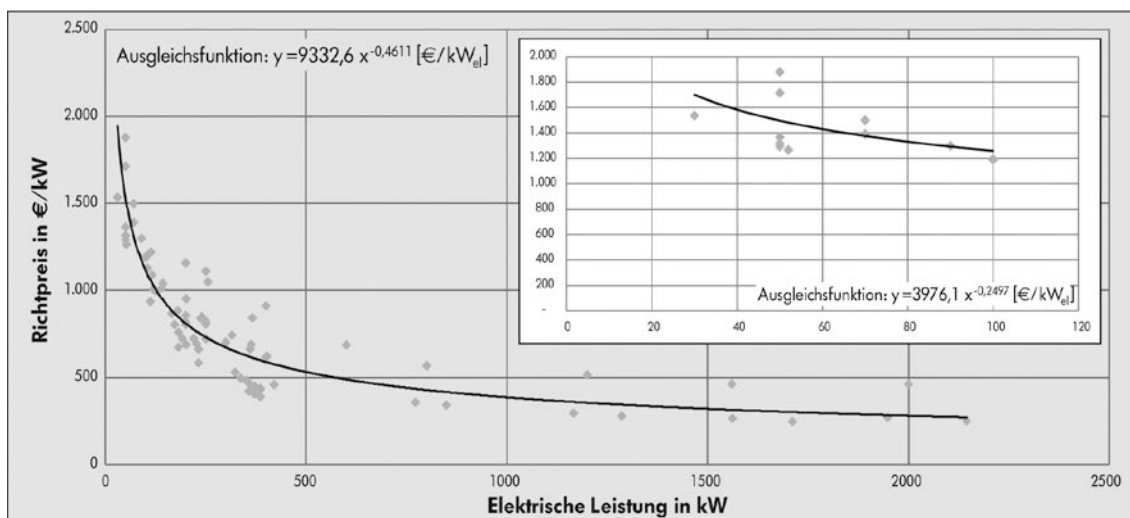


Abbildung 5.3 Spezifische Richtpreise der Investitionskosten für Erdgas-BHKW [ASU11, S. 12]

Möglicherweise müssen noch weitere Investitionskosten beachtet werden. Darunter können beispielsweise Einbindungskosten für Speicher oder die Anpassung des Aufstellraumes fallen. Für Biogas-BHKW und Pflanzenöl-BHKW stehen ebenfalls aktuelle Investitionskostenfunktionen zur Verfügung.

5.2.2 Bedarfsgebundene Kosten

Zu den bedarfsgebundenen Kosten gehören vor allem die Kosten für den Antrieb der Anlage. Bei der Kompressionskältemaschine sind die Stromkosten der Anlage die Antriebskosten. Bei der AKM ist dies die Wärmearbeit und bei einem Erdgas-BHKW sind es die Brennstoffkosten für das benötigte Erdgas. Des Weiteren gehören zu den bedarfsgebundenen Kosten die Kosten für Hilfsantriebe (z. B. für Pumpen) und die Kosten für die Kühlung (Wassereinsatz). Letztendlich sind die bedarfsgebundenen Kosten auf drei Kostengruppen zu reduzieren:

- Wärme
- Strom
- Wasser

Tabelle 5.9 Betriebskostenvergleich von AKM und KKM nach [Sch98, S. 4], [Hen09, S. 32]

	AKKM $\zeta = 0,7$	KKM $\epsilon = 4$
Antriebsenergie	1.400 kWh _{th} /MWh _{th, Kälte}	250 kWh _{el} /MWh _{th, Kälte}
Hilfsenergie	60 - 80 kWh _{th} /MWh _{th, Kälte}	40 - 50 kWh _{el} /MWh _{th, Kälte}
Wasserverbrauch	5 - 6 m ³ /MWh _{th, Kälte}	2,5 - 3,0 m ³ /MWh _{th, Kälte}

Die Brennstoff- und Energiepreise müssen nach den örtlichen Bedingungen berechnet und angesetzt werden. Der Preis wird üblicherweise in einen festen Grundpreis, einen Arbeitspreis und einen Messpreis aufgeteilt. Zu den bedarfsgebundenen Kosten sind auch die Kosten für Betriebsstoffe (z. B. Schmierstoffe) zu zählen.

5.2.3 Betriebsgebundene Kosten

Betriebsgebundene Kosten sind nach [VDI10] Aufwendungen für Instandhaltung, Wartung und Bedienung (Personal) der Anlage. Die Kosten für Wartung und Instandhaltung liegen nach [Hen09, S. 32] bei

- 1 % der Investitionskosten für Absorptionskältemaschinen und
- 4 % der Investitionskosten für Kompressionskältemaschinen.

Die Kosten für Wartung und Instandhaltung bei BHKW-Anlagen werden üblicherweise auf die erzeugte Strommenge bezogen und liegen bei ca. einigen Cent je kWh_{el}. Zusätzlich fallen

auch Kosten für die Grunderneuerung einer BHKW-Anlage nach ca. 40 000 bis 60 000 Betriebsstunden [HGC11] an.

Nach [ASU11] können die Richtpreise für Instandhaltung und Wartung nach folgender Formel berechnet werden

$$k_{\text{Instandhaltung}} \left[\frac{\text{ct}}{\text{kW}_{\text{el}}} \right] = 2,8046 * P_{\text{el}}^{-0,174} \quad (5.33)$$

Eine graphische Darstellung der Ergebnisse der ASUE e.V zeigt Abbildung 5.4. Die Kosten für eine Generalüberholung eines Erdgas-BHKW können mit nachfolgender Formel berechnet werden.

$$k_{\text{Generalüberholung}} \left[\frac{\text{€}}{\text{kW}_{\text{el}}} \right] = 1.004,8 * P_{\text{el}}^{-0,313} \quad (5.34)$$

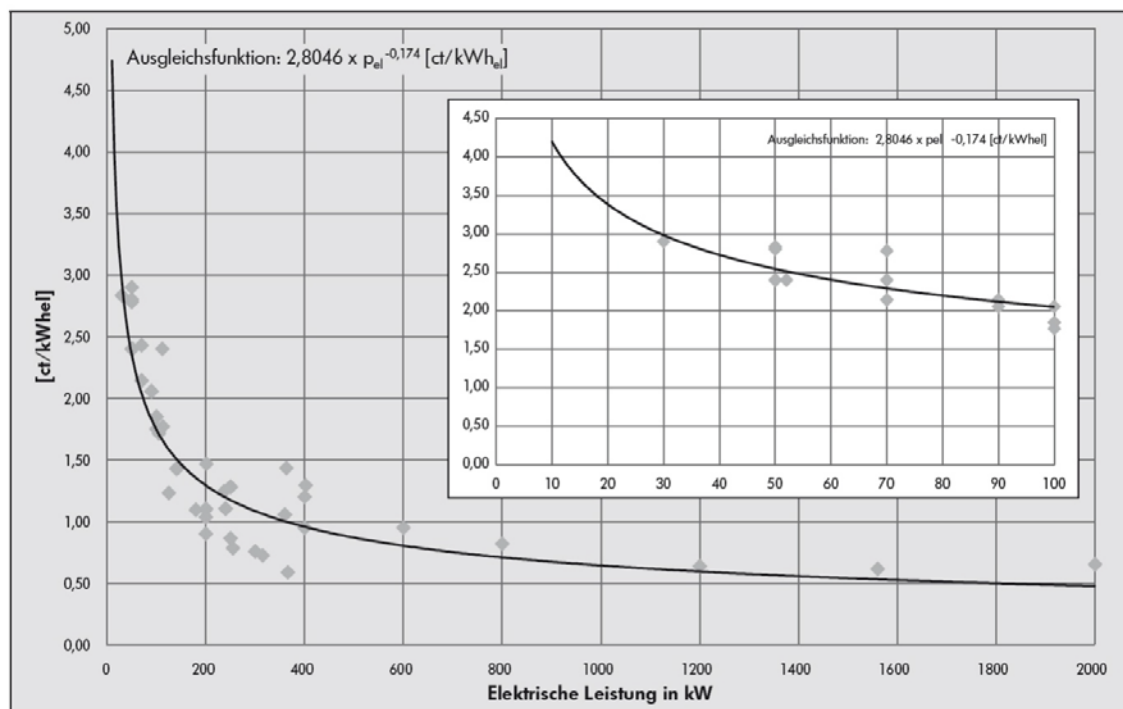


Abbildung 5.4 Spezifische Richtpreise von Instandhaltungsverträgen für Erdgas-BHKW [ASU11, S. 14]

5.3 Wirtschaftlichkeitsrechnung

In der Regel fällt die Entscheidung für eine Investition nur dann, wenn das gewählte System eine positiv wirtschaftliche Alternative zu anderen Vergleichssystemen darstellt. In diesem Abschnitt wird die Wirtschaftlichkeit von Absorptionskälteanlagen (BHKW- und fernwärmebeheizt) gegenüber herkömmlichen Kompressionskältemaschinen untersucht.

In Kapitel 5.1 und 5.2 wurden bereits die Randbedingungen für eine zuverlässige Bewertung dieser Konzepte festgelegt. Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit von Investitionen kommen nach VDI 2067 „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen“ [VDI10] folgende Verfahren in Frage:

- Annuitätsmethode
- Kapitalwertmethode
- interner Zinssatz

Für die folgende Berechnung der Wirtschaftlichkeit wurde die Annuitätsmethode gewählt, da sie ein gängiges Verfahren zur Berechnung von Kälte- und Wärmekosten darstellt.

5.3.1 Annuitätsmethode

Die Annuitätsmethode gehört zu den Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung. Durch das Annuitätsverfahren ist es möglich, alle Zahlungen, sowohl einmalige als auch laufende, mit Hilfe des Annuitätsfaktors über einen Betrachtungszeitraum zusammenzufassen. Die Gesamtannuität, die Summe der Differenz aus der Annuität der Erlöse (Einzahlungen) und der Summe aus den kapitalgebundenen, bedarfsgebundenen, betriebsgebundenen und den sonstigen Annuitäten, bildet das Ergebnis der Berechnung. Mit der Gesamtannuität können verschiedene Szenarien auf ihre Wirtschaftlichkeit überprüft werden. Dabei stellt die Variante mit der niedrigsten Gesamtannuität auch die wirtschaftlichste dar. Eine aussagekräftige Wirtschaftlichkeitsbewertung ist nur mit möglichst genauen Angaben zu den verschiedenen anfallenden Kostenarten zu realisieren.

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung nach der Annuitätsmethode sind laut [VDI10] folgende Formeln zu verwenden:

Annuität der kapitalgebundenen Kosten (siehe 5.2.1)

$$A_{N,K} = (A_0 + A_1 + A_2 + \dots + A_N - R_W) * a \quad (5.35)$$

$A_{N,K}$	Annuität der kapitalgebundenen Kosten [€a]
A_0	Investitionskosten gesamt [€]
$A_1 \dots A_N$	Barwert der ersten bis n-ten Ersatzbeschaffung
R_W	Restwertfaktor
a	Annuitätsfaktor [a]

Barwerte der Ersatzbeschaffung ergeben sich aus

$$A_N = A_0 \frac{r^n * T_N}{q^n * T_N} \quad (5.36)$$

n	erste, zweite, ...n-te Ersatzbeschaffung
r	Preisänderungsfaktor
q	Kapitalzins [%]
T	Betrachtungszeitraum [a]
T_N	Nutzungsdauer der Anlagenkomponenten [a]

Annuität der bedarfsgebundenen Kosten (siehe 5.2.2)

$$A_{N,V} = A_{V1,x} * ba_{V,x} \quad (5.37)$$

$A_{N,V}$	Annuität der bedarfsgebundenen Kosten [€a]
$A_{V1,x}$	bedarfsgebundene Kosten im ersten Jahr [€a]
$ba_{V,x}$	preisdynamischer Annuitätsfaktor
x	bedarfsgebundene Kostenart (Wasser, Strom, Wärme etc.)

Annuität der betriebsgebundenen Kosten (siehe 5.2.3)

$$A_{N,B} = A_{B1} * ba_B \quad (5.38)$$

$A_{N,B}$	Annuität der betriebsgebundenen Kosten [€a]
A_{B1}	betriebsgebundene Kosten im ersten Jahr [€a]
ba_B	preisdynamischer Annuitätsfaktor für die betriebsgeb. Kosten

Annuität der betriebsgebundenen Kosten (siehe 5.2)

$$A_{N,S} = A_{S1} * ba_S \quad (5.39)$$

$A_{N,S}$	Annuität der sonstigen Kosten [€a]
A_{S1}	sonstige Kosten im ersten Jahr [€a]
ba_S	preisdynamischer Annuitätsfaktor für die sonstigen Kosten

Annuität der Erlöse (siehe 5.1)

$$A_{N,E} = E_1 * ba_E \quad (5.40)$$

$A_{N,E}$	Annuität der Erlöse [€a]
E_1	Erlöse im ersten Jahr [€a]
ba_E	preisdynamischer Annuitätsfaktor für Erlöse

Gesamtannuität

$$A_{N,ges} = A_{N,E} - (A_{N,K} + A_{N,V} + A_{N,B} + A_{N,S}) \quad (5.41)$$

$A_{N,ges}$	Gesamtannuität [€a]
$A_{N,K}$	Annuität der kapitalgebundenen Kosten [€a]
$A_{N,V}$	Annuität der bedarfsgebundenen Kosten [€a]
$A_{N,B}$	Annuität der betriebsgebundenen Kosten [€a]
$A_{N,S}$	Annuität der sonstigen Kosten [€a]

Für die einzelnen in den Formeln (5.35)-(5.41) enthaltenen Faktoren gelten:

Annuitätsfaktor a

$$a = \frac{q^T(q-1)}{q^T-1} = \frac{q-1}{1-q^{-T}} \quad (5.42)$$

a	Annuitätsfaktor
q	Zinsfaktor
T	Betrachtungszeitraum [a]

Barwertfaktor b

$$b = \frac{1 - \left(\frac{r}{q}\right)^T}{q - r} \quad (5.43)$$

b	Barwertfaktor
q	Zinsfaktor
T	Betrachtungszeitraum [a]
r	Preisänderungsfaktor

Zinsfaktor q

$$q = 1 + i_K \quad (5.44)$$

q	Zinsfaktor
i_K	kalkulatorischer Zinssatz [%]

Preisänderungsfaktor r

$$r = 1 + p_S \quad (5.45)$$

r	Preisänderungsfaktor
p_S	Preisänderung [%]

preisdynamischer Annuitätsfaktor ba

$$ba = b * a \quad (5.46)$$

ba	Preisänderungsfaktor
b	Barwertfaktor
a	Annuitätsfaktor

Restwertfaktor R_W

$$R_W = A_0 * r^{n*T_N} * \frac{(n+1)T_N - T}{T_N} * \frac{1}{q^T} \quad (5.47)$$

R_W	Restwertfaktor
q	Zinsfaktor
n	Anzahl der Ersatzbeschaffungen innerhalb des Betrachtungszeitraums

r	Preisänderungsfaktor
T	Betrachtungszeitraum [a]
T_N	Nutzungsdauer der Anlagenkomponenten [a]

5.3.2 Berechnungsgrundlagen

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach der Annuitätsmethode werden weitere Werte wie der Betrachtungszeitraum oder der kalkulatorische Zinssatz benötigt. Angaben zu den fehlenden Werten sind unter anderem im Text und auch in den beigefügten Tabellen (A1-A4) der VDI 2067 zu finden.

Preisänderung p_S

Für eine möglichst realitätsnahe Berechnung über einen langen Betrachtungszeitraum muss die jährliche Zins- und Preisentwicklung einbezogen werden. Über den Preisänderungsfaktor wird die jährliche Preisentwicklung berücksichtigt. Gerade die Preisentwicklung von Strom und Wärme hat einen starken Einfluss auf die Berechnungsergebnisse. Abbildung 5.5 zeigt die enormen Preissteigerungen für Energie seit 1991. Die VDI 2067 empfiehlt hier, die langjährigen statistischen Preisindizes des statistischen Bundesamtes (DESTATIS) heranzuziehen.

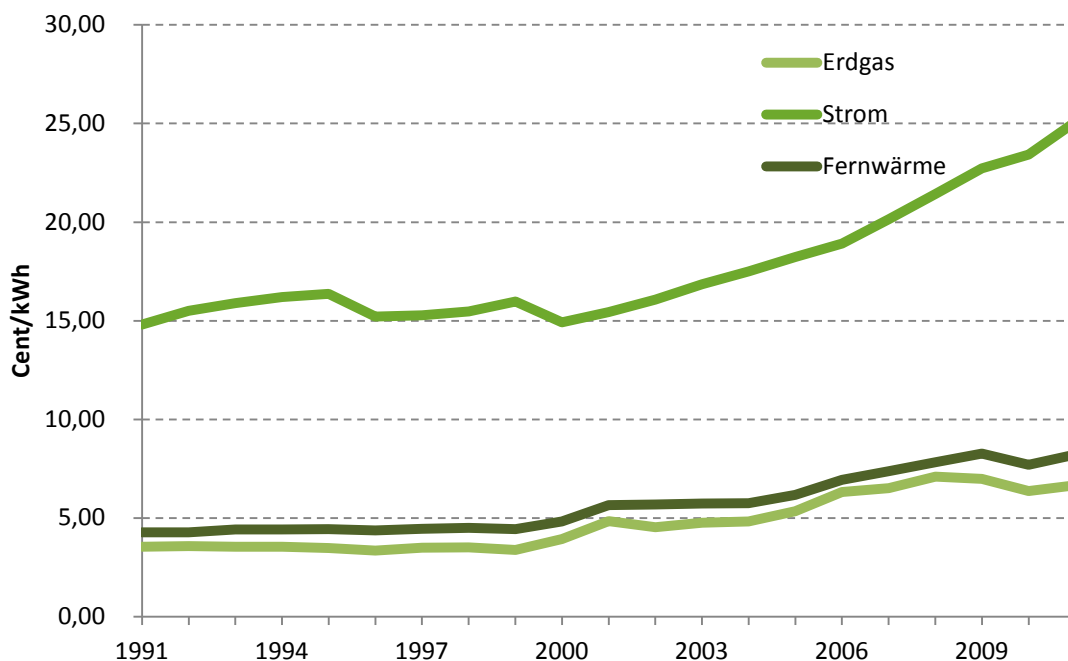


Abbildung 5.5 Preisentwicklung von Strom, Erdgas und Fernwärme. Datenquelle [Bun12]

Nach [Sta12] liegt die berechnete Preissteigerungsrate für Energie von 1996 bis 2011 bei durchschnittlich +5,6 % pro Jahr. Die Preissteigerungsrate für Strom, bei Abgabe an gewerbliche Anlagen, stieg in der Zeit von 2000 bis 2011 um +3,8 %.

Für andere anfallende Zahlungen kann eine Preissteigerung in Höhe der Inflationsrate angenommen werden. Im Jahr 2011 betrug die Inflationsrate ca. 2,3 %.

Energiekosten

Die für die nachfolgende Berechnung verwendeten Energiepreise sind in Tabelle 5.10 aufgeführt.

Tabelle 5.10 Annahmen relevanter Preise

Parameter	Preis	Einheit	Quelle
Wasser	3,76	€/m ³	Hamburger Wasserwerke Gesamtpreis
elektrischer Strom	25,08	ct/kWh	[Bun12]
Fernwärme	8,22	ct/kWh	[Bun12]
Erdgas	6,66	ct/kWh	[Bun12]

Die Energiepreise für Strom, Fernwärme und Erdgas setzen sich üblicherweise aus einem Grund-, einem Leistungs- und einem Messpreis zusammen. Die in Tabelle 5.10 aufgeführten Werte enthalten alle drei Kostengruppen, um den Vergleich zwischen den Anlagen zu erleichtern und zu vereinfachen.

Kalkulatorischer Zinssatz i_K

Durch den kalkulatorischen Zinssatz geht die Verzinsung des eingesetzten Kapitals in die Berechnung mit ein. Für den kalkulatorischen Zinssatz ist zu beachten, ob die Anlage aus Eigenkapital, Fremdkapital oder aus einer Kombination finanziert wird. Entsprechend muss der Zinssatz subjektiv gewählt werden. Für die folgende Berechnung wird ein kalkulatorischer Zinssatz von 5 % gewählt.

Betrachtungszeitraum T und Nutzungsdauer der Anlagenkomponenten T_N

Der für die Berechnung gewählte Betrachtungszeitraum richtet sich üblicherweise nach der Nutzungsdauer der Anlagenkomponenten. Werte für die Nutzungsdauer von technischen Anlagen sind in der VDI 2067 zu finden und in der Tabelle 5.11 aufgeführt.

Tabelle 5.11 Nutzungsdauer der Anlagenkomponenten

Komponente	rechn. Nutzungsdauer [Jahre]
BHKW	15
AKM	18
KKM	15

Für die Nutzungsdauer von Absorptionskältemaschinen sind in einschlägiger Fachliteratur auch Angaben von bis zu 20 Jahren [Ste96, S. 64] zu finden. Bei unterschiedlicher Nutzungsdauer der Anlagenkomponenten müssen diese in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung beachtet werden. Ist die Nutzungsdauer der Komponente länger als der gewählte Betrachtungszeitraum, muss dies über den Restwert in der Berechnung berücksichtigt werden. Bei einer kürzeren Lebensdauer fließt der Wiederbeschaffungswert der Komponente mit ein.

5.3.3 Technische Rahmenbedingungen

Für die durchgeführte Wirtschaftlichkeitsberechnung wurden die folgenden Anlagenkomponenten gewählt. Hier soll nur ein kurzer Überblick über die technische Rahmendaten der Anlagen gegeben werden. Weitere Informationen können den im Anhang beigefügten Datenblättern entnommen werden.

Kompressionskältemaschine (siehe Anhang A.1):

Modell	Airwell CLS STD 202
Kälteleistung	54,1 kW
elektrische Antriebsleistung	18,2 kW
COP	3

Absorptionskältemaschine (siehe Anhang A.2):

Modell	Absorber WEGRACAL SE 50
Kälteleistung	54 kW
thermische Antriebsleistung	72 kW
elektrische Antriebsleistung	3,0 kW
Wärmeverhältnis	0,75 bei 86 °C Heizwasservorlauftemp.

Blockheizkraftwerk (siehe Anhang A.3):

Modell	EW M 50 S
elektrische Leistung	50,0 kW
thermische Leistung	81,0 kW
Gesamtwirkungsgrad	90,4 %

Als Heizkessel wurde eine Vergleichsanlage mit der benötigten Heizleistung und einem Wirkungsgrad von 85 % gewählt.

5.3.4 Systemabgrenzung

Für die Berechnung wurden zwei Varianten mit einem Referenzsystem, bestehend aus einem konventionellen Heizkessel und einer Kompressionskältemaschine, zu einer Wirtschaftlichkeitsanalyse herangezogen und verglichen. Der Aufbau bzw. die Systemabgrenzung für das Referenzsystem ist Abbildung 5.6 zu entnehmen.

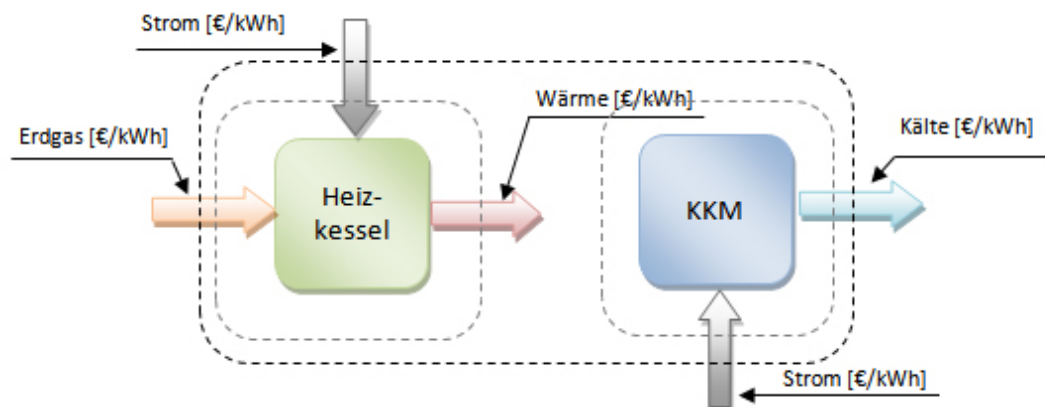


Abbildung 5.6 Referenzsystem Heizkessel und KKM

Variante 1

Für *Variante 1* wird eine mit der Abwärme eines BHKW beheizte Absorptionskältemaschine mit dem Referenzsystem verglichen. Für die Spitzenlastabdeckung, oder als Backup-System, sind ein Heizkessel und eine KKM mit eingeplant. Die Systemgrenzen für *Variante 1* sind in Abbildung 5.7 dargestellt.

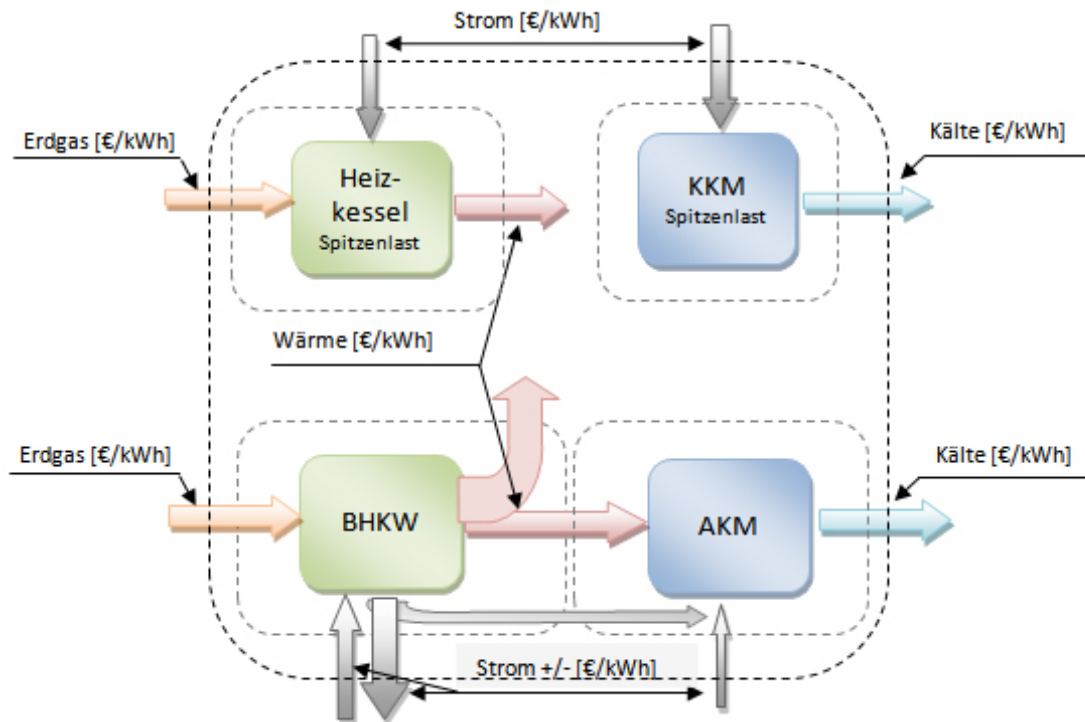


Abbildung 5.7 Variante 1: BHKW-beheizte Absorptionskältemaschine

Für einen direkten Vergleich von AKM und KKM werden die Wärmegestehungskosten des BHKW als Wärmepreis für die Antriebswärme der AKM festgelegt und anteilig für die Kälteerzeugung umgelegt.

Variante 2

Die Voraussetzung für *Variante 2* ist eine mit Fernwärme beheizte Absorptionskältemaschine. Die Wärme- und Kälteversorgung wird somit mittels Fernwärme realisiert. Abbildung 5.8 zeigt die Systemgrenzen für *Variante 2*.

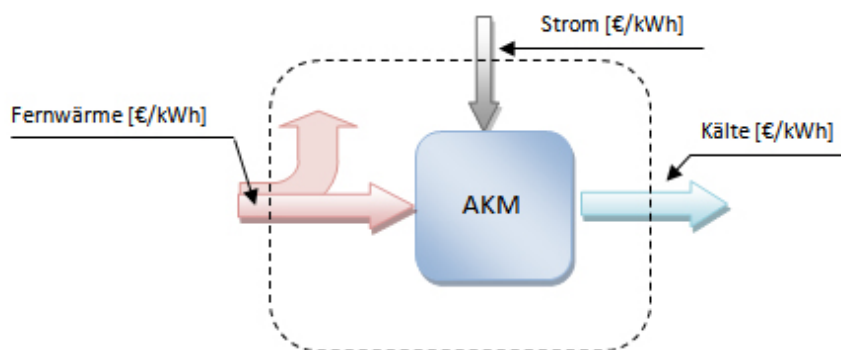


Abbildung 5.8 Variante 2: fernwärmebeheizte Absorptionskältemaschine

Für Variante 2 ist der Wärmepreis Tabelle 5.10 zu entnehmen. Die Kälteverteilung wird in der Berechnung nicht berücksichtigt. Kosten für den Bau einer Anschluss- bzw. Fernwärmeleitung finden ebenso keine Berücksichtigung.

5.3.5 Aufbau und Entwicklung einer Kalkulationstabelle

Im Zuge dieser Arbeit wurde für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach der Annuitätsmethode in Anlehnung an die VDI 2067 eine detaillierte Excel-Kalkulationstabelle entwickelt. Hiermit ist es möglich, die in Kapitel 5.3.4 beschriebenen Varianten mit einer Referenzanlage, bestehend aus Heizkessel und Kompressionskältemaschine, einem wirtschaftlichen Systemvergleich zu unterziehen. Für ein möglichst aussagekräftiges Ergebnis sind die für die Berechnung benötigten exakten Werte mit den dazugehörigen Einheiten einzutragen. Hinweise und spezielle bzw. nutzbare Angaben sind in dem jeweiligen Arbeitsblatt als Kommentar an entsprechender Stelle hinterlegt. Nachfolgend soll ein Überblick über den Aufbau der Kalkulationstabelle gegeben werden. Die Excel-Kalkulationstabelle besteht aus folgenden Arbeitsblättern:

1. Inhalt
2. Grund- und Verbrauchsdaten
3. Summenlinie Wärme/Kälte
4. Anlagendaten
5. Wirtschaftlichkeit
6. Zusammenfassung
7. Diagramme

Die Zusammenfassung der Berechnung kann dem Anhang B entnommen werden. Aufgrund des Umfangs wurde darauf verzichtet die detaillierte Tabelle dieser Arbeit beizufügen.

1. Excel-Tabelle: Inhalt

Hier sind Angaben zur Gliederung und Hinweise zu den einzelnen Excel-Arbeitsblättern zu finden.

2. Excel-Tabelle: Grund- und Verbrauchsdaten

In diesem Arbeitsblatt sind Preise für Energieträger, allgemeine Kennzahlen zum Standort, Emissionen und die Verbrauchs- bzw. Bedarfsdaten einzutragen. Die Bedarfsdaten werden mittels statistischer Vorgaben zu Heiz- und Kühlgradtagen auf die Monate eines Jahres

umgelegt. Dies wird durch ein dafür erstelltes Makro realisiert. Sind die Monatswerte bekannt, können diese auch direkt eingetragen werden. Die Berechnung zu den statistischen Vorgaben zu Heiz- und Kühlgradtagen sind im Arbeitsblatt „Summenlinie Wärme/Kälte“ hinterlegt und gegebenenfalls an das aktuelle Kalenderjahr anzupassen.

3. Excel-Tabelle: Summenlinie Wärme/Kälte

Hier wird mit den Angaben des Bedarfes aus dem Arbeitsblatt „Grund- und Verbrauchsdaten“ eine Jahresdauerlinie erstellt. Dazu sind lediglich die Daten zu sortieren. Dies wird über den Button „Werte sortieren“, dem ein Makro zugewiesen ist, ausgelöst. Nun kann eine erste Abschätzung der Betriebsstunden und der Leistungsgröße des BHKW durch Ablesen aus dem Diagramm „Jahresdauerlinie des Bedarfs (Wärme und Kälte)“ getroffen werden. Die Stunden sind danach in die dafür vorgesehenen Eingabefelder einzutragen. Die Werte für Heiz- und Kühlgradtage sind nur bei Bedarf anzupassen.

4. Excel-Tabelle: Anlagendaten

Hier sind alle Daten zu den verwendeten Anlagenkomponenten einzutragen. Folgende Eingabebereiche sind für die Berechnung vorgesehen:

- Kessel (Bestand und Spitzenlast)
- Blockheizkraftwerk
- Kompressionskältemaschine
- Absorptionskältemaschine
- Fernwärme

Unter anderem finden sich in diesem Arbeitsblatt aussagekräftige Ausgabewerte, um sich einen ersten Überblick über die Anlagenleistungsdaten zu verschaffen. Berechnet werden benötigte und bereitgestellte Energiemengen der verschiedenen Anlagen sowie CO₂-Emissionen und der Primärenergieaufwand bzw. die Primärenergieeinsparung.

5. Excel-Tabelle: Wirtschaftlichkeit

In diesem Arbeitsblatt wird die Wirtschaftlichkeitsberechnung für alle Anlagen detailliert aufgeführt. Es sind Angaben zu dem kalkulatorischen Zinssatz, dem Betrachtungszeitraum und anderen finanzmathematischen Kennzahlen notwendig. Das Arbeitsblatt ist aufgeteilt in die Bereiche kapitalgebundene, bedarfsgebundene, betriebsgebundene und sonstige Kosten sowie einem Bereich für Erlöse aus dem Betrieb der Anlagen. Es sind zu allen Kostengruppen genaue Angaben erforderlich, mit Ausnahme der bedarfsgebundenen Kosten. Diese werden

aus den angegebenen Anlagendaten und den bereits eingegebenen Energiepreisen berechnet. Als Hilfestellung sind für die einzelnen Kostengruppen Richtpreise hinterlegt. Das Ergebnis der Berechnung ist die Gesamtannuität der Anlagenkomponenten. Damit kann ein erster Überblick über die Wirtschaftlichkeit der Anlagen und deren Auswirkung auf die verschiedenen Varianten gewonnen werden.

6. Excel-Tabelle: Zusammenfassung

Hier sind keine Eingaben notwendig. Es sind alle wichtigen Ergebnisse übersichtlich in zwei Tabellen zusammengefasst. Eine Tabelle zeigt alle Werte zu den einzelnen Anlagen (BHKW, AKM etc.). In der anderen Tabelle sind die einzelnen Anlagenkomponenten für den direkten Vergleich der einzelnen Varianten übersichtlich dargestellt. Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer Variante werden die Gesamtannuitäten der Varianten angegeben. Außerdem werden die CO₂-Emission und der Primärenergieaufwand berechnet und für die Varianten angegeben.

7. Excel-Tabelle: Diagramme

Im Arbeitsblatt „Diagramme“ sind die Ergebnisse in Diagrammen anschaulich dargestellt.

- Diagramm 1 „Energiebedarfsstruktur über ein Jahr“:

In diesem Diagramm ist der Kälte- und Wärmeleistungsbedarf über ein Jahr abgebildet. Die Verbrauchswerte wurden mittels der Heiz- und Kühlgradtage auf die Monate eines Jahres umgelegt.

- Diagramm 2 „Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs“:

Der auf die Monate umgelegte Bedarf wird auf die Stunden eines Monats umgerechnet. Über diese vereinfachte Methode werden anschließend die Werte der Größe nach sortiert und über die Stunden eines Jahres aufgetragen. Die Jahresdauerlinie stellt die benötigte Wärmeleistung in Bezug auf die benötigten Stunden im Jahr dar. Die von der Jahresdauerlinie eingeschlossene Fläche ist der Gesamtbedarf über das Jahr. Über die Jahresdauerlinie kann eine Abschätzung der benötigten Größe des BHKW und der damit verbundenen Laufzeit getroffen werden.

- Diagramm 3 „Jahresdauerlinie des Bedarfs (Wärme und Kälte)“:

In diesem Diagramm sind der Wärmebedarf und der Kältebedarf zusammengefasst. Die anderen einzelnen Merkmale entsprechen denen des Diagramms 2. Die schwarzen Punkte

symbolisieren das BHKW. Im Vergleich von Diagramm 2 und 3 kann die Laufzeitverlängerung des BHKW abgelesen werden.

- Diagramm 4 „CO₂-Emission / Primärenergieaufwand“:

Für die Bewertung der Umwelteinflüsse kann das Diagramm 4 herangezogen werden. Auf der primären y-Achse (links) ist der Primärenergieaufwand und auf der sekundären y-Achse ist die CO₂-Emission der jeweiligen Variante aufgetragen.

- Diagramm 5 „Kostenstruktur“:

Einen Überblick über die Zusammensetzung und den Anteil der verschiedenen Kostengruppen gibt Diagramm 5. Zuschüsse und Erlöse sind in diesem Diagramm nicht berücksichtigt. Für die Höhe und die Zusammensetzung der Erlöse und Zuschüsse ist Diagramm 6 heranzuziehen.

- Diagramm 6 „Zuschüsse und Erlöse“:

Diagramm 6 gibt einen Überblick über die realisierbaren Zuschüsse zu den Investitionskosten und die Erlöse aus dem Betrieb der Anlagen. Zuschüsse mindern die Investitionskosten und Erlöse mindern die bedarfsgebundenen Kosten einer Anlage.

- Diagramm 7 „Annuitäten der Anlagen“:

Diagramm 7 zeigt die Annuität der Erlöse und Kosten. Zusätzlich wird die Gesamtannuität graphisch dargestellt. Dies ermöglicht eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Anlagen und ihre Auswirkung auf die verschiedenen Gesamtsysteme bzw. Varianten.

- Diagramm 8 „Annuität der Varianten“:

Im Gegensatz zu Diagramm 7 werden in Diagramm 8 die Annuitäten der Varianten nach Kostenarten graphisch unterteilt und dargestellt.

- Diagramm 9 „Amortisation“:

Dieses Diagramm stellt die jährlichen Einsparungen auf der sekundären y-Achse (rechts) und die statische Amortisation der Varianten gegenüber der Referenzanlage graphisch dar.

5.3.6 Ergebnisse

Bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde untersucht, welche der Kälteversorgungsvarianten die niedrigsten Jahreskosten verursacht. Die Berechnung wurde nach der Annuitätsmethode auf der Grundlage der VDI 2067 erstellt. Da sich die Systeme stark im Aufbau und in der Funktion unterscheiden, ist es schwierig, spezifische Kosten zu ermitteln. Als Grundlage der Berechnung dienten die in Kapitel 5 behandelten Parameter. Für die Ermittlung der Bedarfe von Kälte und Wärme wurde von einem fiktiven Gebäude ausgegangen. Der Kältebedarf wurde mit $177\,600\text{ kWh/a}$ und der Wärmebedarf mit $784\,800\text{ kWh/a}$ gewählt. Die Energiebedarfsstruktur von Wärme- und Kältebedarf über ein Jahr zeigt Abbildung 5.9.

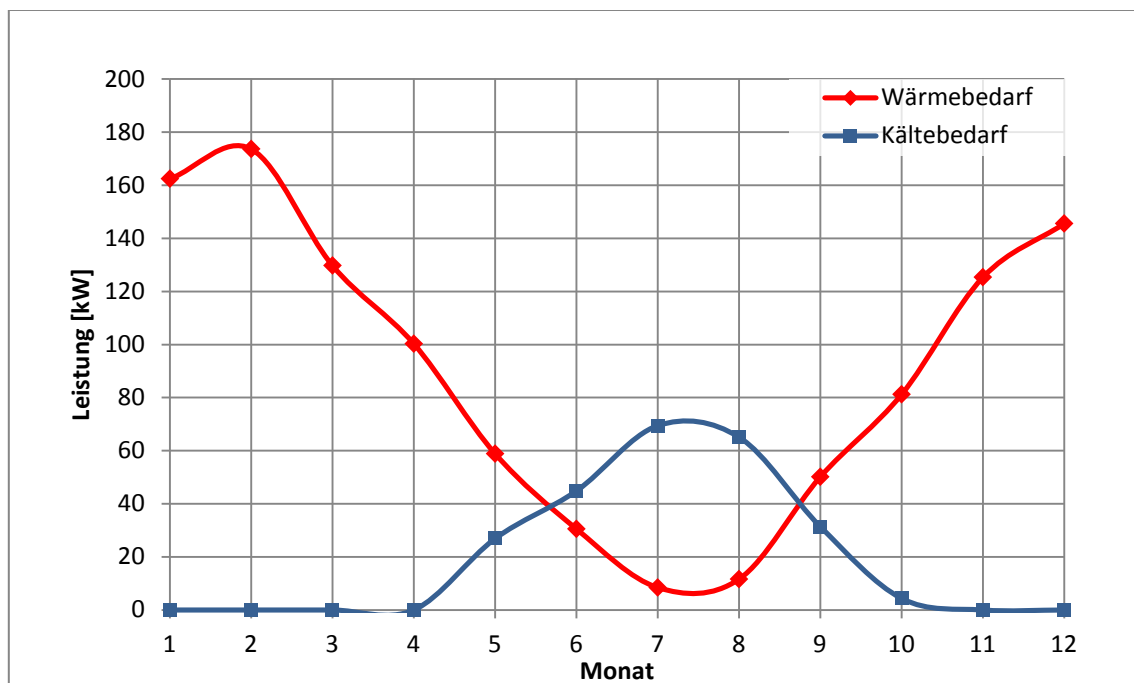


Abbildung 5.9 Energiebedarfsstruktur von Wärme- und Kältebedarf über ein Jahr

Daraus abgeleitet ergibt sich die in Abbildung 5.10 dargestellte Jahresdauerlinie. Anhand der schwarzen Punkte lassen sich die Vollbenutzungsstunden für das ausgewählte BHKW mit einer thermischen Leistung von 81 kW_{th} ablesen.

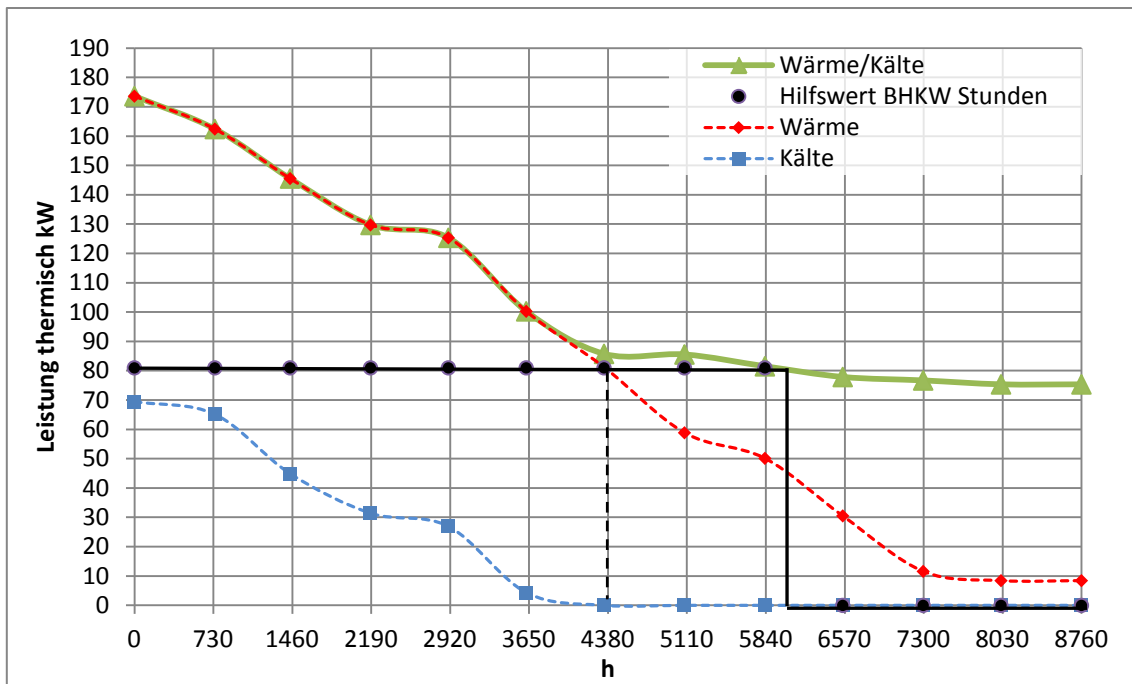


Abbildung 5.10 Jahresdauerlinie (Wärme und Kälte)

Ebenfalls ist in Abbildung 5.10 zu erkennen, dass sich die Jahresauslastung des BHKW, durch die zusätzlich benötigte Wärme für die Kälteerzeugung, erheblich steigern lässt. Die Vollbenutzungsstunden des BHKW erhöhen sich von 4 380 h/a auf 6 200 h/a. Wobei 1 000 h/a für den Betrieb der Absorptionskältemaschine veranschlagt wurden.

Vor der Bewertung der verschiedenen Varianten sollen zuerst die Kompressions- und Absorptionskältemaschinen direkt miteinander verglichen werden. Dafür sind, gemäß der Systemabgrenzung, die Wärmegestehungskosten der durch das BHKW erzeugten Wärme festzulegen. Die berechneten Wärmegestehungskosten werden als Wärmeantriebskosten für die Absorptionskältemaschine angesetzt und liegen bei $0,0236 \text{ €/kWh}_{\text{Wärme}}$.

Abbildung 5.11 zeigt die Kostenstruktur der beiden Systeme im direkten Vergleich, wobei die Absorptionskältemaschine mit und ohne Investitionskostenzuschüsse abgebildet ist. Zuschüsse sind in diesem Fall für den Standort Hamburg berechnet (siehe Kapitel 5.1). Deutlich werden die erheblich höheren Investitionskosten für die Absorptionskältetechnik und die im Verhältnis zur Kompressionskältetechnik geringen bedarfsgebundenen Kosten. Diese setzen sich bei der Absorptionskältetechnik aus Stromkosten, Wasserkosten für das Rückkühlwerk und die Kosten für die Antriebswärme zusammen.

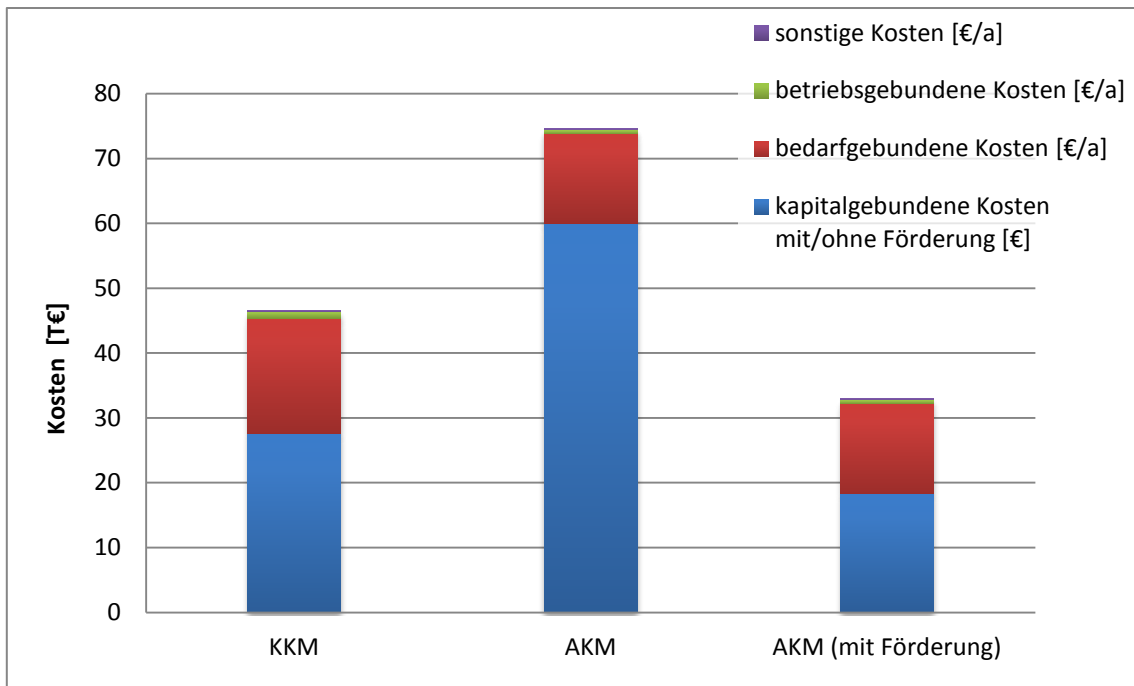


Abbildung 5.11 Kostenstruktur von AKM und KKM

Bei der Gegenüberstellung der errechneten Gesamtannuität stellt die bedarfsgebundene Annuität den größten Anteil. Bei der Kompressionskältemaschine haben die Strombezugskosten den größten Einfluss auf die bedarfsgebundenen Kosten und sind somit der treibende Faktor für die Größe der Gesamtannuität. Zuschüsse zu den Investitionskosten machen die Absorptionskältetechnik gegenüber der Kompressionskältetechnik wirtschaftlich noch konkurrenzfähiger, dies zeigt auch Abbildung 5.12.

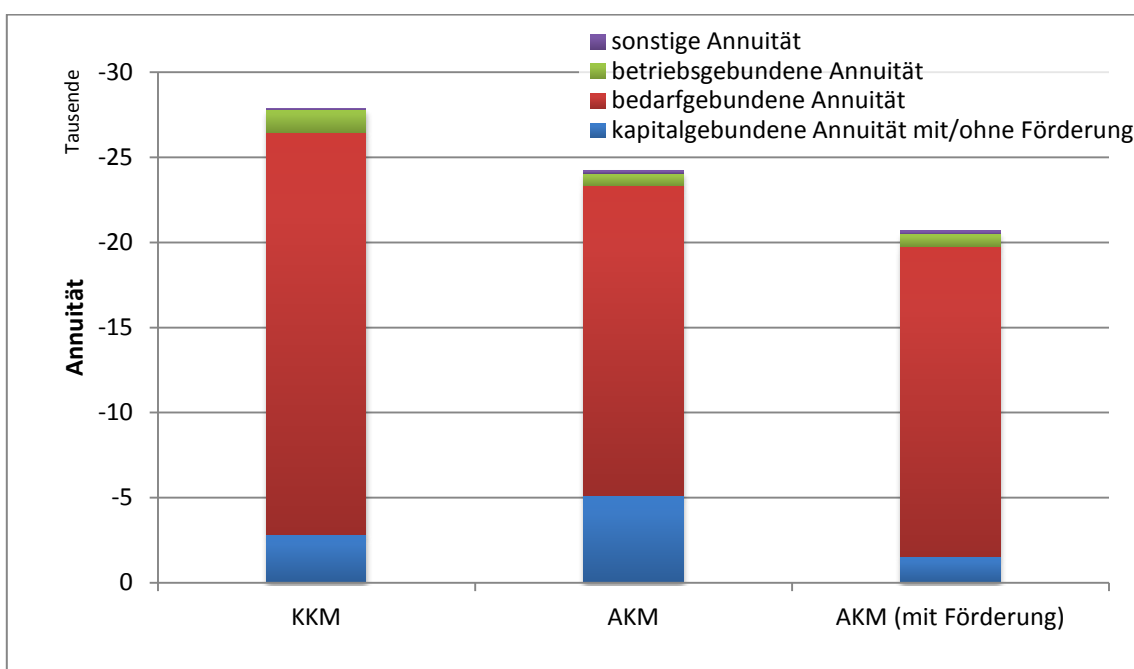


Abbildung 5.12 Gesamtannuität von AKM und KKM

Nach den Ergebnissen der Berechnung hat sich die Investition in die Absorptionskältetechnik im konkreten Beispiel, bei einem jährlichen Ersparnis von 4 234,60 €, nach der statischen Amortisationsrechnung in 4,33 Jahren und nach der dynamischen Berechnung nach 5,0 Jahren amortisiert. Der CO₂-Ausstoß ist bei der AKM im Vergleich zur KKM um 38 % geringer.

Für den Vergleich der verschiedenen Varianten wurde die Berechnung für die in Kapitel 5.3.4 beschriebenen Varianten durchgeführt.

- Die Referenzanlage besteht aus einer KKM und einem Heizkessel.
- Variante 1 besteht aus einem BHKW, einer AKM und für die Spitzenlastabdeckung einem Heizkessel sowie einer KKM.
- Variante 2 besteht aus einer Fernwärmeversorgung für die Deckung des Wärmebedarfs und als Antriebsenergie für die AKM.

Bei der Analyse von Abbildung 5.13 lässt sich ablesen, dass Variante 1 die größten Gesamtkosten aufweist. Allerdings sind in Abbildung 5.13 Zuschüsse und Erlöse noch nicht berücksichtigt, diese reduzieren die Gesamtkosten noch erheblich. Wie bei dem direkten Vergleich von AKM und KKM lässt sich ebenfalls feststellen, dass die bedarfsgebundenen Kosten auch hier den größten Anteil der Gesamtkosten ausmachen. Allerdings haben die hohen kapitalgebundenen Kosten der Variante 1 ebenfalls einen großen Einfluss auf die jährlichen Gesamtkosten dieser Variante.

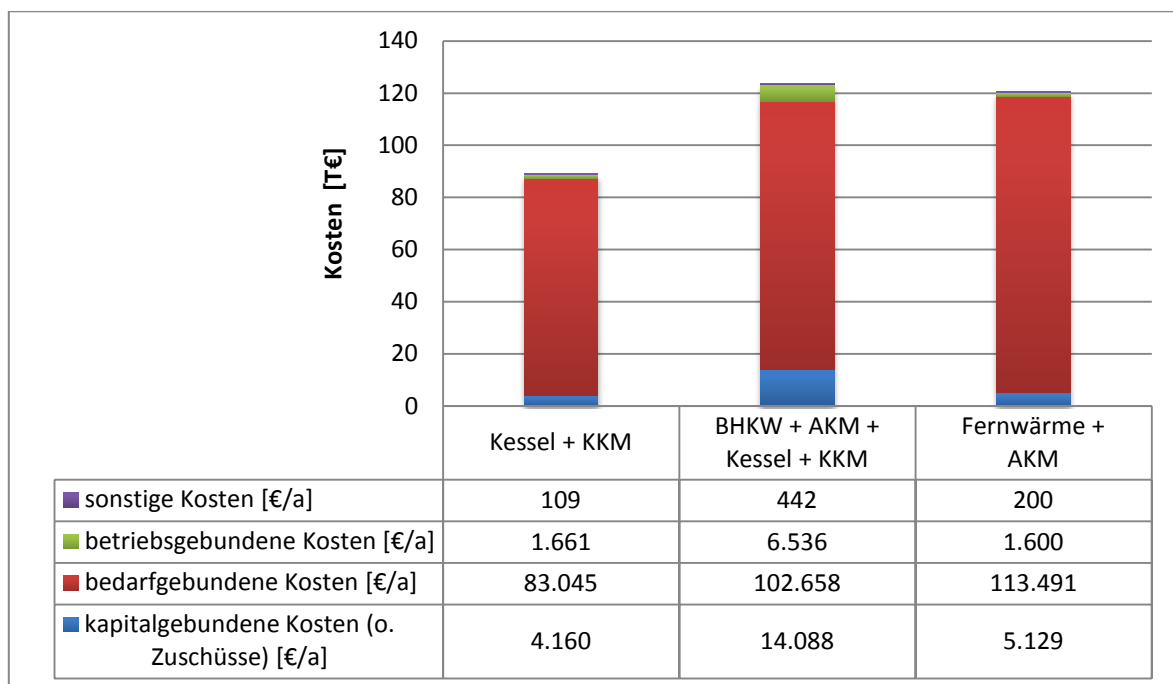


Abbildung 5.13 Kostenstruktur der untersuchten Varianten

Durch die bei einem BHKW kombinierte Erzeugung von Strom und Wärme lassen sich für den erzeugten Strom Erlöse erzielen. Zu den Erlösen zählen die Förderungen durch das KWK-Gesetz, die Einspeisevergütung, das vermiedene Netznutzungsentgelt und die Mineralölsteuerrückerstattung. Zusätzlich gibt es einmalige Zuschüsse zu den Investitionskosten, die sich regional stark unterscheiden. Die Zuschüsse für die Berechnung wurden für den Standort Hamburg errechnet und in Abzug gebracht. Damit sind die Kosten für Variante 1, wie in Abbildung 5.14 aufgeführt, niedriger als die der Referenzanlage. Für Variante 2 gibt es zwar Investitionskostenzuschüsse, es sind aber keine Erlöse zu erzielen. Durch einen hohen Energiepreis weist diese Variante zu hohe bedarfsgebundene Kosten auf und lässt einen wirtschaftlichen Betrieb zu diesen Konditionen nicht zu.

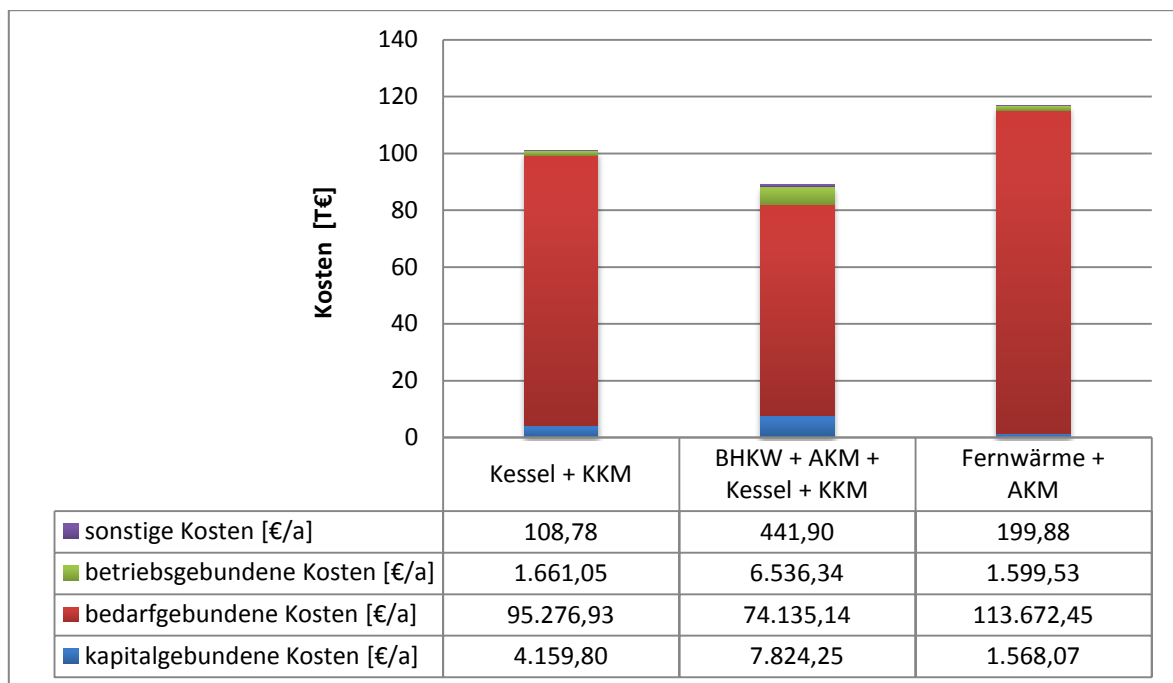


Abbildung 5.14 Kostenstruktur nach Abzug von Zuschüssen und Erlösen

Die in der Annuitätsmethode errechnete Gesamtannuität der verschiedenen Varianten zeigt Abbildung 5.15. Die Variante mit der niedrigsten Annuität ist die Variante, die am wenigsten Kosten verursacht. In diesem Fall weist Variante 1 die niedrigste Gesamtannuität auf. Dies bedeutet, Variante 1 ist nach der Annuitätsmethode die wirtschaftlichste Variante.

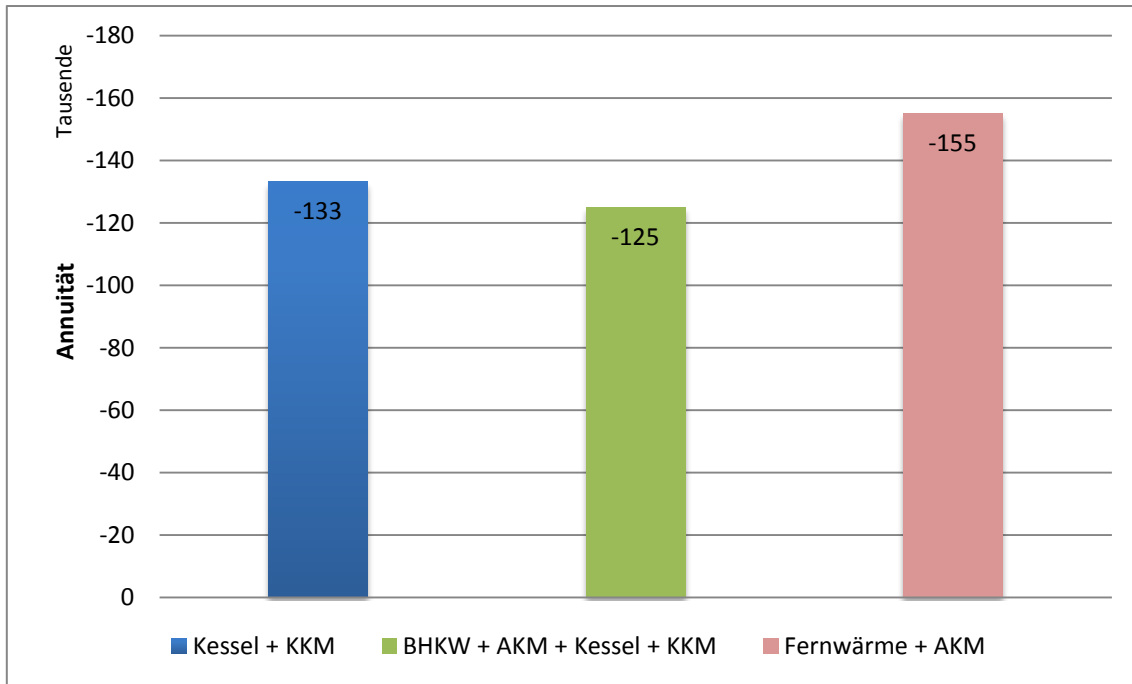


Abbildung 5.15 Gesamtannuität der Varianten mit Förderung

Insgesamt lassen sich durch Variante 1 jährliche Einsparungen von 15 229,97 € erzielen. Hierdurch kann eine statische Amortisationszeit von 6,80 Jahren realisiert werden. Die dynamische Amortisation liegt bei 8,51 Jahren. Für Variante 2 liegt keine Amortisation vor, da die Gesamtkosten über denen der Referenzanlage liegen.

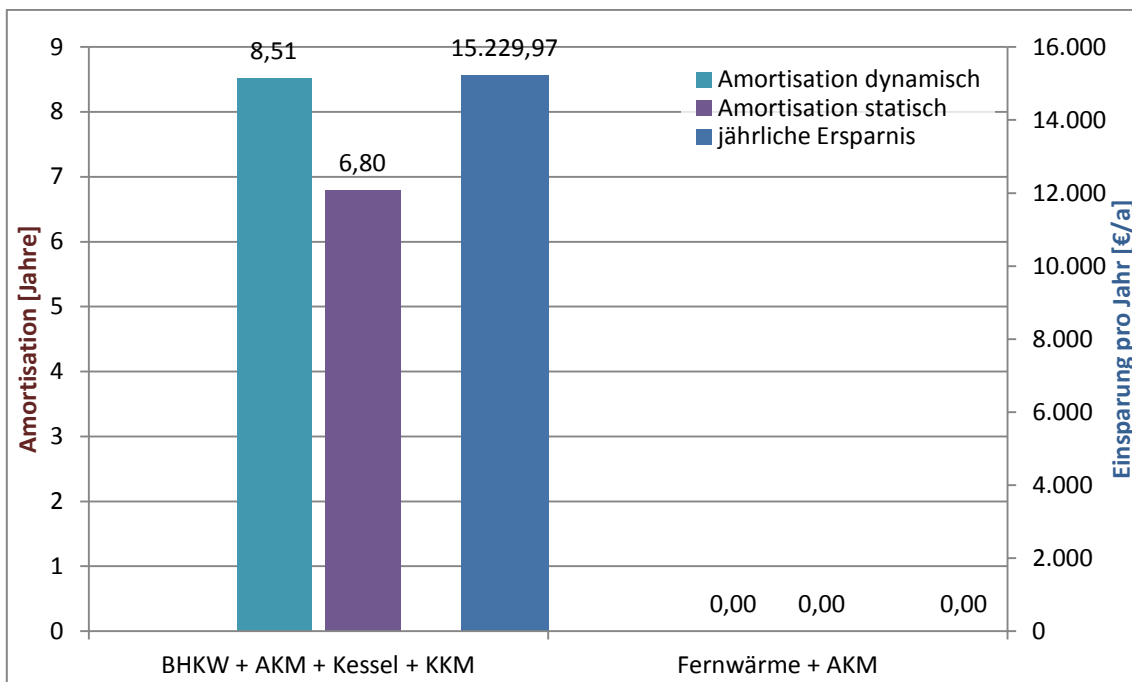


Abbildung 5.16 Einsparung und Amortisation

Für eine Bewertung nach umwelttechnischen Gesichtspunkten werden die CO₂-Emission und die Einsparung von Primärenergie herangezogen. Abbildung 5.17 zeigt den Primärenergieaufwand und die CO₂-Emission der verschiedenen Varianten im Vergleich.

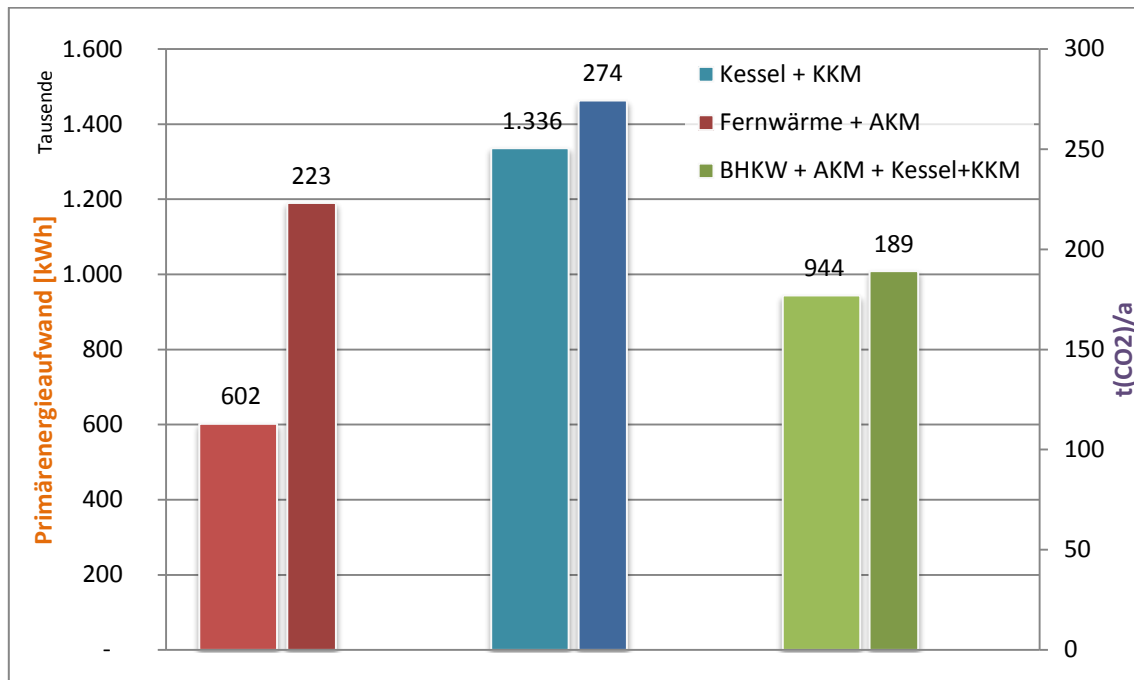


Abbildung 5.17 Vergleich von Primärenergieaufwand und CO₂-Emission

Der Primärenergieaufwand der unterschiedlichen Systeme ist stark abhängig von den verschiedenen Primärenergiefaktoren der eingesetzten Energieträger. Der Primärenergiefaktor für den deutschen Strommix liegt bei 2,6 und ist in den letzten Jahren aufgrund eines immer größer werdenden Anteils an erneuerbaren Energien nach unten korrigiert worden. Für Erdgas liegt der Primärenergiefaktor bei 1,07 und für die Fernwärme des Hamburger Stadtnetzes liegt er bei 0,568. Das Referenzsystem hat mit einer Strombezugsmenge von 134 711 kWh den größten Stromverbrauch. Der Stromverbrauch eines Systems hat durch den hohen Primärenergiefaktor einen entscheidenden Einfluss auf den Primärenergieaufwand. Variante 2 hat mit dem geringsten Primärenergiefaktor einen um 55 % niedrigeren Primärenergieaufwand im Verhältnis zur Referenzanlage. Mit Variante 1 werden 392 017 kWh/a weniger Primärenergie benötigt, dies entspricht einer Einsparung von 29 % gegenüber dem Referenzsystem.

Bei der Bewertung der CO₂-Emission weist Variante 1 mit 189 t (CO₂)/a den niedrigsten Wert auf. Bei der Berechnung der endgültigen CO₂-Emission des BHKW ist im konkreten Fall, für den erzeugten KWK-Strom, eine vermiedene CO₂-Emission von 186 t (CO₂)/a dem System gutgeschrieben worden. Dies bedeutet eine Gesamteinsparung der Variante 1

gegenüber der Referenzanlage von 31 %. Als CO_2 -Äquivalent wurden für den deutschen Strommix $601 \text{ g}(\text{CO}_2)/\text{kWh}_{el}$ angesetzt, für Erdgas $251 \text{ g}(\text{CO}_2)/\text{kWh}_{el}$ und für Fernwärme $214 \text{ g}(\text{CO}_2)/\text{kWh}_{el}$.

Es zeigt sich, dass sowohl Variante 1 als auch Variante 2 einen erheblichen Beitrag zur Primärenergieeinsparung und zu einer Reduzierung der CO_2 -Emissionen leisten können. Die bedarfsgebundenen Kosten stellen den größten Anteil an den Gesamtkosten und haben somit einen zentralen Einfluss auf die Gesamthöhe der Kosten. Die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Varianten wird deshalb stark von den Energiepreisen beeinflusst. So ist der sensibelste technische Parameter der elektrische Nutzungsgrad des BHKW. Verbesserungen des elektrischen Nutzungsgrades können zu großen Energiekosten- und Primärenergieeinsparungen führen. Abbildung 5.18 zeigt, dass die elektrische Leistungsaufnahme mit zunehmender Kälteleistung bei KKM und AKM unterschiedlich ausfällt. Dies bedeutet, dass nicht nur die Strompreisentwicklung einen zentralen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit hat, sondern auch die Anlagengröße und ihr damit verbundener Stromverbrauch.

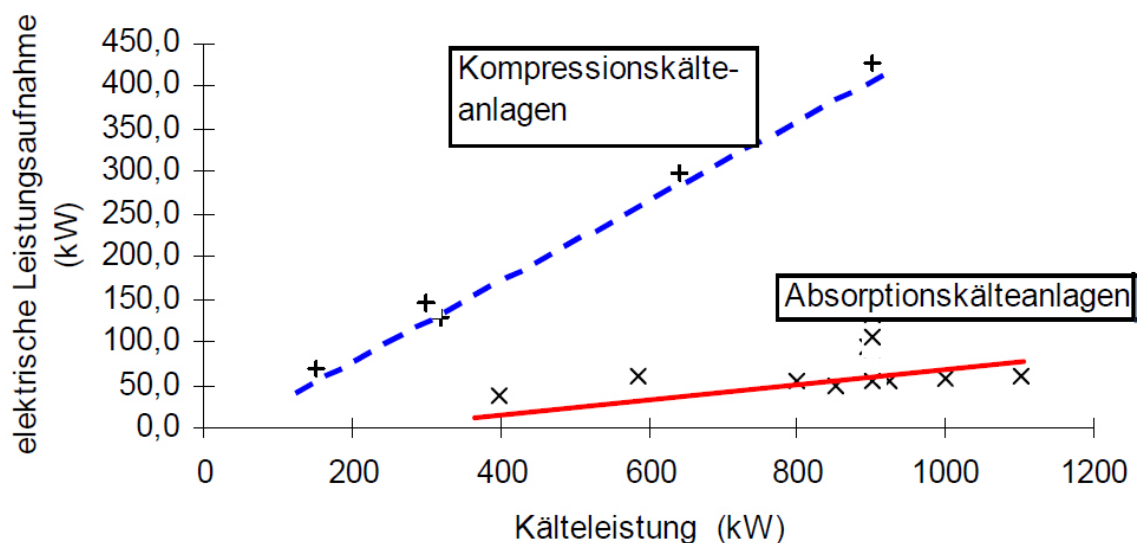


Abbildung 5.18 Strombedarf von Absorptions- und Kompressionskälteanlagen [Sch10, S. 208]

Eine Reduzierung der Energiepreise hat, wie die Berechnungen zeigen konnten, einen entscheidenden Einfluss auf einen wirtschaftlichen Betrieb der verschiedenen Varianten. Bei der fernwärmebetriebenen AKM kann beispielsweise eine Reduzierung des Fernwärme-arbeitspreises von $0,0822 \text{ €/kWh}$ auf $0,0622 \text{ €/kWh}$ die thermische Kälteerzeugung in

einen wirtschaftlich lohnenswerten Bereich bringen. Die dynamische Amortisation liegt dann bei 12,5 Jahren. Ein Vorteil von Variante 2 sind die sehr geringen Investitionskosten.

Weitere Einflüsse auf einen wirtschaftlichen Betrieb der verschiedenen Varianten haben unter anderem die zu erzielenden Erlöse und Zuschüsse. Für Variante 1 ist festzustellen, dass der Eigenverbrauch des durch das BHKW erzeugten Stroms eine weitere Eingriffsmöglichkeit für einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb bietet. Die übrigen Parameter zeigen einen nicht allzu großen Einflussfaktor auf die Wirtschaftlichkeit der Varianten.

Daraus lässt sich ableiten, dass sich keine allgemeine Aussage über einen wirtschaftlichen Betrieb der Varianten treffen lässt. Ein wirtschaftlicher Einsatz der gewählten Varianten kann nur nach einer ausführlichen Prüfung der örtlichen und regionalen Parameter und Voraussetzungen sowie einer gründlichen Planung erfolgen. Die Berechnung zeigt, trotz aller schwer abzuschätzenden Parameter, dass ein wirtschaftlicher Betrieb der gewählten Varianten verbunden mit einem erheblichen Einsparpotential gegenüber der Referenzanlage möglich ist.

6 Schlussbetrachtung

Für eine genaue Auswertung der Möglichkeiten der mit Kraft-Wärme-Kopplung beheizten Absorptionskältemaschine im Vergleich zur Kompressionskältemaschine unter wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten wurden im Rahmen dieser Arbeit zuerst die Funktionsprinzipien und Merkmale der verschiedenen Systeme bewertet.

Die Absorptionskältemaschine unterscheidet sich von der Kompressionskältemaschine vor allem durch ihr Verdichtungsprinzip. Die Verdichtung der Absorptionskältemaschine erfolgt durch Wärme, bei der Kompressionskältemaschine hingegen durch Strom. Die Wärme zum Antrieb der Absorptionskältemaschinen kann aus KWK-Anlagen, industriellen Prozessen, solarthermischen Anlagen oder Brennstoffzellen stammen.

Für die durchgeführte Untersuchung wurden eine durch ein BHKW (dezentrale Kraft-Wärme-Kältekopplung/Variante 1) und eine durch Fernwärme (zentrale Kraft-Wärme-Kältekopplung/Variante 2) beheizte Absorptionskältemaschine mit einer Referenzanlage, bestehend aus einem herkömmlichen Heizkessel und einer Kompressionskältemaschine, verglichen.

Der Vorteil der Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen ist die vergleichsweise hohe Brennstoffausnutzung durch die gekoppelte Produktion von Wärme und Strom und der damit einhergehende niedrige Primärenergieaufwand. Der primärenergetische Nutzen dieser Systeme ist eng mit der Nutzung der Wärme verbunden, da der elektrische Wirkungsgrad gegenüber den Kraftwerken meist zu gering ist. Die Ergebnisse zeigen, dass die Höhe der Primärenergieeinsparung durch den Betrieb einer KWKK-Anlage letztendlich stark vom Einzelfall abhängig ist.

Für den wirtschaftlichen Betrieb einer KWK-Anlage ist eine möglichst hohe Auslastung über das gesamte Jahr notwendig. Einer hohen Auslastung steht aber üblicherweise der niedrige Wärmebedarf im Sommerhalbjahr entgegen. Die thermische Kälteerzeugung mit Absorptionskältemaschinen steigert die Auslastung der Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen durch eine Erhöhung der Nachfrage an Wärme im Sommerhalbjahr. Bei dem konkret

untersuchten Beispiel konnte so eine Steigerung der Vollbenutzungsstunden des BHKW um 1 820 h/a erzielt werden.

Für die Bewertung sowohl des Primärenergieverbrauches und der CO₂-Emission als auch einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach der Annuitätsmethode wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Excel-Berechnungstabelle entwickelt. Die durchgeführte Berechnung bestätigt, dass sich der Primärenergieverbrauch bei Variante 1 um 29 % gegenüber der Referenzanlage reduziert. Die CO₂-Emission reduziert sich sogar um rund 31 %. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach der Annuitätsmethode zeigt, dass die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen untersuchten Varianten stark von den Energiepreisen abhängt. Schon geringe Schwankungen der Energiepreise haben auf das Ergebnis der Berechnung entscheidende Auswirkungen. Bei der fernwärmebetriebenen AKM bringt eine Reduzierung des Fernwärmearbeitspreises von 8,22 Cent/kWh auf 6,22 Cent/kWh die thermische Kälteerzeugung in einen wirtschaftlich lohnenswerten Bereich.

Letztendlich lässt sich feststellen, dass durch den Einsatz von Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlagen eine Einsparung an Primärenergie und eine Reduktion des CO₂-Ausstoßes im Vergleich zu herkömmlichen Anlagen möglich ist. Die einzige nachhaltige und wirksamste Möglichkeit der Energieeinsparung stellt jedoch immer noch die Vermeidung eines Bedarfes dar.

Eine pauschale Aussage zu einem wirtschaftlichen Betrieb lässt sich nicht treffen. Dies zeigt vielmehr die Notwendigkeit einer möglichst exakten Anpassung, Planung und Auslegung der Absorptionskälteanlage an die jeweiligen örtlichen Rahmenbedingungen und Betriebskonditionen. Aufbauend auf die in dieser Arbeit angestellten Untersuchungen sind an einem konkreten Objekt, mit realen Energiebedarfsprofilen und individuell auf das Projekt bezogenen Herstelleranfragen zu Preisen und exakten technischen Daten, die erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse weiter zu verfeinern und zu untermauern.

Literaturverzeichnis

- [ASU95] ASUE, Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch, [Hrsg.]. 1995. *Absorptionskälteanlagen: Grundlagen und Referenzen*. Hamburg : Rationeller Erdgaseinsatz, 1995. Best. Nr. 06 10 95.
- [ASU11] ASUE, Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., [Hrsg.]. 2011. *BHKW-Kenndaten 2011 - Module Anbieter Kosten* -. Essen : energieDRUCK Verlag für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch, 2011. Best. Nr 050311.
- [Bau04] Baumann, Detlef. 2004. *Energiewirtschaftliche Bewertung der dezentralen Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2004. Bd. Reihe 6 Nr. 514. 3-18-351406-0.
- [Bau08] Baumgarth, Siegfried, Hörner, Berndt und Reeker, Josef. 2008. *Handbuch der Klimatechnik*. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage 2008. Heidelberg : C. F. Müller Verlag, 2008.
- [Beh09] Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt. 2009. Unternehmen für Ressourcenschutz. *Förderrichtlinie Unternehmen für Ressourcenschutz*. Hamburg : s.n., 2009.
<http://www.hamburg.de/contentblob/1077484/data/foerderrichtlinie-antrag.pdf>.
- [Bod09] Bodenschatz, Karl-Heinz. 2009. Mit Sonne und Abwärme nachhaltig kühlen. [Hrsg.] SVK Schweizerischer Verein für Kältetechnik. *friscaldo*. 2009, Oktober.
- [Bre09] Breidert, Hans-Joachim. 2009. *Projektierung von Kälteanlagen*. Heidelberg, München, Landsberg, Frechen, Hamburg : C. F. Müller, 2009. 978-3-7880-7825-6.
- [Bun121] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 2012. Richtlinien zur Förderung von KWK-Anlagen bis 20 kW(el). *Vom 17. Januar 2012*. Berlin : s.n., 2012.

http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/mini_kwk_anlagen/vorschriften/rili_minikwk.pdf.

- [Bun09] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 2009.** Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen an gewerblichen Kälteanlagen. 2009.
- [Bun12] **Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Referat III C 3. Stand 25.01.2012.** Zahlen und Fakten. *Energiedaten. Nationale und internationale Entwicklung.* Berlin : s.n., Stand 25.01.2012. <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Statistik-und-Prognosen/energiedaten.html>.
- [Cha04] **Chartčenko, Nikolaj V. 2004.** *Thermische Solaranlagen.* 2., überarb. und verb. Aufl. Berlin : VWF, 2004. 978-3-89700-372-9.
- [DIN07] **Deutsches Institut für Normung e. V. 2011.** Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen - Teil 4-5: Wärmeerzeugung für die Raumheizung, Leistungsdaten und Effizienz von Nah- und Fernwärmesystemen. *DIN EN 15316-4-5:2007 [Norm].* Düsseldorf : Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [EEG08] **EEG. 2008.** Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien. *Zuletzt geändert durch Art. 2 Abs. 69 G v. 22.12.2011 I 3044.* 2008. (http://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2009/).
- [Eic12] **Eicker, Ursula. 2012.** *Solare Technologien für Gebäude.* 2., vollständig überarbeitet Auflage 2012. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2012. 978-3-8348-1281-0.
- [Elm09] **Elmar, Bollin. 2009.** *Automation regenerativer Wärme und Kälteversorgung von Gebäuden.* 1. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2009. 978-3-8348-0327-6.
- [Ene06] **EnergieStG. 2006.** Energiesteuergesetz. *Zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 1.3.2011 I 282.* 2006. <http://www.gesetze-im-internet.de/energiestg/index.html>.
- [Geb02] **Gebhardt, M., Kohl, H. und Steinrötter, Th. 2002.** *Ableitung von Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energienutzung.* Duisburg-Rheinhausen : Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA), 2002.

Forschungsvorhaben Nr. S 511.

www.stenum.at/media/documents/preisatlas_komplett.PDF.

- [Hen09] **Henning, Hans-Martin, Urbaneck, Thorsten und u.a. 2009.** *Kühlen und Klimatisieren mit Wärme*. [Hrsg.] FIZ Karlsruhe, Solarpraxis AG und BINE Informationsdienst. 1. Auflage. Berlin : Solarpraxis AG, 2009. 978-3-934595-81-1.
- [Hes12] **Hesselbach, Jens. 2012.** *Energie- und klimaeffiziente Produktion*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2012. 978-3-8348-0448-8.
- [HGC11] **HGC Hamburg Gas Consult GmbH. 2011.** BHKW-Check Handbuch zur Ermittlung von Einsparpotenzialen durch den Einsatz von Blockheizkraftwerken. Hamburg : Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, 2011. 2. Auflage.
- [Int08] **International Energy Agency (IEA). 2008.** Promoting Energy Efficiency Investments. *Case Studies in the Residential Sector*. Paris : Maulde et Renou, 2008. 978-92-64-04214-8.
- [Kar07] **Karno, Ali. 2007.** *Simulation und Optimierung der Betriebsweise einer solarthermisch betriebenen Absorptionskältemaschine unter Berücksichtigung verschiedener Arbeitsstoffpaare*. Ilmenau : Verlag ISLE, 2007. 978-3-938843-26-0.
- [Kel08] **Keller, Daniel und Ochsner, Erwin. 2008.** Absorptionskältemaschinen als Alternative. [Hrsg.] SVK Schweizerischer Verein für Kältetechnik. *friscaldo*. 2008, 5.
- [Koc09] **Koch, Heinz Peter und u.a. 2009.** *Engineering-Know-How der Drees & Sommer-Gruppe*. Stuttgart : s.n., 2009. [nicht veröffentlicht].
- [KWK02] **KWKG. 2002.** Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz). *Zuletzt geändert durch Art. 11 G v. 28.7.2011 I 1634*. 2002. http://www.gesetze-im-internet.de/kwkg_2002/.
- [Lan06] **Langeheinecke, Klaus, Jany, Peter und Thieleke, Gerd. 2006.** *Thermodynamik für Ingenieure*. [Hrsg.] Klaus Langeheinecke. Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2006. 3-8348-0103-8.

- [Mar97] Marko, Achim und Braun, Peter, [Hrsg.]. 1997. *Thermische Solarenergienutzung an Gebäuden*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1997. 3-540-60369-7.
- [Noe06] Noeres, Peter. 2006. *Solare Kühlung*. Birkenfeld : Fraunhofer Institut Umwelt-, Sicherheit-, Energietechnik UMSICHT, 2006.
- [Now12] Nowak, Wolfgang und Arthkamp, Jochen. 2012. *BHKW-Fibel*. [Hrsg.] ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. Berlin : energieDRUCK, 2012. 05.02.2012.
- [Pec05] Pech, Anton und Jens, Klaus. 2005. *Heizung und Kühlung*. Wien : Springer-Verlag, 2005. 3-211-21501-8.
- [Plu08] Plura, Stefan. 2008. Entwicklung einer zweistufigen Absorptionskältemaschine. [Online] 2008. [Zitat vom: 08.04.2012.] Dissertation. <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20080610-652942-1-8>.
- [Qua10] Quaschnig, Volker. 2010. *Erneuerbare Energien und Klimaschutz*. 2., aktualisierte Auflage. München : Carl Hanser Verlag, 2010. 978-3-446-41961-2.
- [Saf03] Safarik, Mathias. 2003. Solare Klimakälteerzeugung - Technologie, Erprobung und Simulation. *Uni Magdeburg*. [Online] 2003. [Zitat vom: 20.04.2012.] <http://diglib.uni-magdeburg.de/Dissertationen/2003/matsafarik.pdf>.
- [Sch09] Schaal, Frank. 2009. *Membranabsorber für die Absorptionskältetechnik*. Berlin : Logos Verlag Berlin GmbH, 2009. 978-3-8325-2143-1.
- [Sch081] Schäfer, Volkmar und Negele, Bernhard. 2008. Absorptionskältemaschine - Anwendungsbeispiele. [Hrsg.] Uwe Franzke. *KI – Fachzeitschrift für die Kälte • Luft • Klimatechnik*. 2008, Juli/August.
- [Sch10] Schaumann, Gunter und Schmitz, Karl W. 2010. *Kraft-Wärme-Kopplung*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2010. 978-3-642-01424-6.
- [Sch01] Schlott, Siegfried. 2001. *Kälteerzeugung für die Klimatechnik mit einer Kompressions- oder Absorptionsmaschine mit Fernwärme*. Zwickau : s.n., 2001.
- [Sch06] Schmidt-Pleschka, Schmidt und Milles, Uwe. 2006. *Energie sparen bei der Kälteerzeugung*. [Hrsg.] FIZ Karlsruhe GmbH. 2006. 1438-3802.

-
- [Sch98] **Schönberg, Ingo und Noeres, Peter. 1998.** *Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung.* [Hrsg.] FIZ Karlsruhe GmbH. 1998. 1436-2066.
- [Scr09] **Schramek, Ernst-Rudolf. 2009.** *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik.* 74. Auflage. München : Oldenbourg Industrieverlag, 2009. 978-3-8356-3134-2.
- [Sch99] **Schweigler, Christian. 1999.** *Kälte aus Fernwärme.* Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 1999. 3-118-312119-0.
- [Sta12] **Statistisches Bundesamt (DESTATIS). 2012.** Index der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (Inlandsabsatz). - *Lange Reihen der Fachserie 17, Reihe 2 von Januar 1995 bis März 2012* -. Wiesbaden : s.n., 20.04.2012. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Erzeugerpreise/ErzeugerpreiseLangeReihenPDF_5612401.pdf?__blob=publicationFile. 5612401121034.
- [Ste96] **Steimle, Fritz und Arbeitsgemeinschaft für Sparsamen und Umweltfreundlichen Energieverbrauch, & Internationale ASUE-Fachtagung, [Hrsg.]. 1996.** *Wärme macht Kälte - Absorptionskälteerzeugung in der Praxis: Internationale ASUE-Fachtagung 24. und 25. Januar 1996, Dresden.* Essen : Vulkan Verlag, 1996. Bd. 17. 3-8027-5245-7.
- [Str99] **StromStG. 1999.** Stromsteuergesetz. *Zuletzt geändert durch Art. 2 G v. 1.3.2011 I* 282. 1999. <http://www.gesetze-im-internet.de/stromstg/index.html>.
- [Tra09] **Transferstelle Bingen, [Hrsg.]. 2009.** *Rationelle und Regenerative Energienutzung.* Heidelberg : C. F. Müller, 2009. 3-7880-7794-8.
- [Umw11] **Umweltbundesamt. 2011.** Umweltbundesamt - Für Mensch und Umwelt. *Zielsetzungen der Europäischen Union (EU-15 und EU-27) zur Minderung der Treibhausgas-Emissionen.* [Online] 12 2011. [Zitat vom: 30.05.2012.] <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do;jsessionid=7E9764BA91B4583357E66FD0F7DD0D2B?nodeIdent=2504>.
- [VDI10] **Verein deutscher Ingenieure. 2010.** Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen Grundlagen und Kostenberechnung. *VDI 2067 Blatt 1 [Norm].* Düsseldorf : Beuth Verlag GmbH, 2010.

Anhang

A Technische Datenblätter

A.1 Datenblatt Kompressionskältemaschine

Operating Limits - CLS Units

CLS 182 to 302

CLS			182		202		242		302			
			Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.		
Chiller	Liquid outlet temperature	Water	°C								+6 to +15	
		Brine (for low liquid temperature application)	°C								-8 to +5	
		Temperature difference	K								3 to 7	
	Flow rate	l/h		3902	9106	6731	15705	7949	18547	9104	21242	
	Max. operating pressure - Water side	bar		10								
Ambient air	Air entering temperature	Cooling - STD/LN/HPF	°C	15	46	15	46	15	46	15	46	
		Cooling - ELN	°C	-18	46	-18	46	-18	46	-18	46	
		Cooling - HT	°C	15	48	15	48	15	48	15	48	
	External static pressure	Standard fans	Pa	0								
		High pressure fans - HPF version	Pa	80								
Recommended system chilled water volume		litres	200		280		330		370			
Nominal supply voltage		400 V / 3 Ph / 50 Hz										

Abbildung A.1.1 Datenblatt Allgemein KKM CLS 202

Physical Data - CLS STD

CLS STD sizes		182	202	242	302	352	402	502	552	602
Nominal cooling capacity (1)	kW	40.9	54.1	64.9	74.3	90.0	105.3	121.4	130.7	140.0
Compressor power input - Cooling	kW	12.3	18.2	24.2	27.7	33.2	37.5	46.2	54	60.4
Maximum power input (2)	kW	18.8	25.4	30.0	35.6	42.5	49.0	59.4	66.7	73.2
EER		3.3	3.0	2.7	2.7	2.7	2.8	2.6	2.4	2.3
Number of refrigerant circuits		2	2	2	2	2	2	2	2	2
Total unit capacity steps	%	50/100	50/100	50/100	50/100	43-57/100	50/100	50/100	43-57/100	50/100
REFRIGERANT										
Type		HFC 407 C								
Charge	kg	7	7	9	10	12	12	17	18.5	20
COMPRESSORS										
Number		2	2	2	2	2	2	2	2	2
Type		Scroll	Scroll	Scroll	Scroll	Scroll	Scroll	Scroll	Scroll	Scroll
EVAPORATORS										
Number		2	2	2	2	2	2	2	2	2
Type		Plate	Plate	Plate	Plate	Plate	Plate	Plate	Plate	Plate
Antifreeze heater power input	W	2 x 35	2 x 35	2 x 35	2 x 35	2 x 35	2 x 35	2 x 35	2 x 35	2 x 35
AIR COOLED CONDENSERS										
Number		2	2	2	2	2	2	2	2	2
Total coil face area per coil	m ²	2.1	2.1	2.1	2.1	2.85	2.85	3.6	3.6	3.6
Number of rows		2	2	3	4	3	4	4	5	5
FANS										
Number		2	2	2	2	3	3	3	2	2
Total air flow	m ³ /h	21000	21000	20300	19700	30000	28700	30000	38000	38000
Power input	kW	0.96	0.96	0.96	0.96	1.44	1.44	1.44	3.6	3.6
WATER CONNECTION										
Type		Male gas threaded								
Inlet diameter	inch	2"	2"	2"	2"	2"	2"	2"	2"	2"
Outlet diameter	inch	2"	2"	2"	2"	2"	2"	2"	2"	2"
DIMENSIONS										
Length	mm	2110	2110	2110	2110	2760	2760	3110	3110	3110
Width	mm	1110	1110	1110	1110	1110	1110	1110	1110	1110
Height	mm	1750	1750	1750	1750	1750	1750	1750	1920	1920
WEIGHT										
Basic - Shipping / Operating	kg	600 / 610	630 / 640	754 / 764	808 / 818	888 / 898	962 / 972	1050 / 1060	1185 / 1195	1220 / 1230
1 pump - Shipping / Operating	kg	632 / 642	662 / 672	786 / 796	840 / 850	920 / 930	994 / 1004	1082 / 1092	1217 / 1227	1252 / 1262
2 pumps - Shipping / Operating	kg	652 / 662	682 / 692	806 / 816	860 / 870	940 / 950	1014 / 1024	1102 / 1112	1237 / 1247	1272 / 1282
Water tank + 1 pump - Shipping/Operating	kg	697 / 907	727 / 937	851 / 1061	905 / 1115	1020 / 1350	1094 / 1424	1202 / 1602	1337 / 1737	1372 / 1772
Water tank + 2 pumps - Shipping/Operating	kg	717 / 927	747 / 957	871 / 1081	925 / 1135	1040 / 1370	1114 / 1444	1222 / 1622	1357 / 1757	1392 / 1792
SOUND LEVELS										
Sound power levels	dB(A)	84	84	86	86	89	89	90	90.3	90.3
Sound pressure levels at 10 meters (3)	dB(A)	52	52	54	54	57	57	58	58.3	58.3

- (1) Data based on 7 °C leaving chilled water temperature and 35 °C ambient air temperature.
(2) Maximum power input includes : maximum compressor power input and maximum fan power input.
(3) Sound pressure level values refer to ISO standard 3744.

A.2 Datenblatt Absorptionskältemaschine

Technische Beschreibung Stand: März 2012
Absorptionskälteanlagen Typ WEGRACAL SE 50



2.1 Technische Daten WEGRACAL SE 50

Kälteleistung	in kW	54
Wärmeverhältnis	COP	0,75
Kaltwasser	Eintrittstemperatur (in °C)	15,0
	Austrittstemperatur (in °C)	9,0
	Menge (in m ³ /h)	7,7
	Druckverlust (in mbar)	65
	Nenndruck PN (in bar)	6
	Anschluss (DN)	DN 50
Heizwasser	Heizleistung (in kW)	72,0
	Eintrittstemperatur (in °C)	86
	Austrittstemperatur (in °C)	71
	Menge (in m ³ /h)	4,1
	Druckverlust (in mbar)	50
	Nenndruck PN (in bar)	6
	Anschluss (DN)	DN 40
Kühlwasser	Rückkühlleistung (in kW)	126
	Eintrittstemperatur (in °C)	27
	Austrittstemperatur (in °C)	32
	Menge (in m ³ /h)	22
	Druckverlust (in mbar)	450
	Nenndruck PN (in bar)	6
	Anschluss (DN)	DN 80
Elektrische Daten	Spannung (in V) / Frequenz (in Hz)	400/230/50
	Leistungsaufnahme (in kW)	3,4
Abmessungen	Länge (in mm)	ca. 2.950
	Breite (in mm)	ca. 1.100
	Höhe (in mm)	ca. 2.311
Gewicht	Transportgewicht (in kg)	ca. 1.900
	Betriebsgewicht (in kg)	ca. 2.250

EAW Energieanlagenbau Westenfeld GmbH – Oberes Tor 106 – 98631 Westenfeld
Telefon 036948 84-132 – Telefax 036948 84-152
E-Mail info@eaw-energieanlagenbau.de – Homepage www.eaw-energieanlagenbau.de

Änderungen bedingt durch den techn. Fortschritt vorbehalten

Seite 4 von 9

Abbildung A.2.1 Technisches Datenblatt AKM WEGRACAL SE 50

A.3 Datenblatt Blockheizkraftwerk

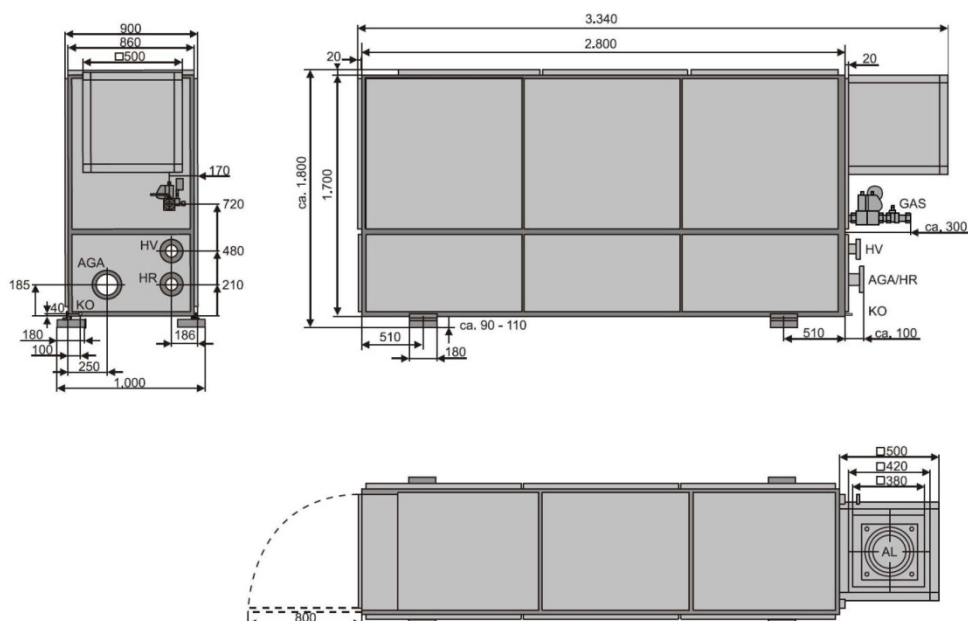


Blockheizkraftwerk EW M 50 S (Erdgas)



Elektrische Leistung	50 kW (34,5 %)
Wärmeleistung	81 kW (55,9 %)
Energieeinsatz (bezogen auf HU)	145 kW (90,3 %)

Abmessungen (Rahmenmaß), Gewichte	
Länge (mit Abluftventilatorbox)	3.340 mm
Breite	900 mm
Höhe (einschl. Schalldämmhaube und Füßen)	1.800 mm
Leergewicht, ca.	2.000 kg
Betriebsgewicht, ca.	2.200 kg
Motorgewicht, ca.	430 kg



Anschlüsse	Ausführung	Dimension
Abgasanschluß	Flansch	DN 80 / PN 10
Kondensatablauf	Rohr	∅ 22 x 1,2
Gaseintritt	Gaskugelhahn	Rp 1 "
Heizwasser VL/RL	Flansch	DN 40 / PN 16

EAW Energieanlagenbau Westenfeld GmbH – Oberes Tor 106 – 98631 Westenfeld
 Telefon 036948 84132 Telefax 036948 84152 E-Mail info@eaw-energieanlagenbau.de Homepage www.eaw-energieanlagenbau.de

Änderungen bedingt durch den technischen Fortschritt, vorbehalten

Abbildung A.3.1 Technisches Datenblatt BHKW EW M 50 S

B Berechnungsergebnisse

Zusammenfassung

Bedarf	
	kWh/a
Wärme	784.800
Kälte	177.600
Summe	962.400,00

	Vergleich der Varianten		
	Kessel + KKM (Referenzanlage)	BHKW + AKM + Kessel + KKM	Fernwärme + AKM
Kapitalgebundene Kosten			
Investitionskosten	43.511,05	176.759,64	59.953,46 €
Summe	43.511,05	176.759,64	59.953,46 €
Zuschüsse	0,00	0,00	0,00 €
KWK-impulsprogramm (BAFA) bis 20 kWel	0,00	0,00	0,00 €
Unternehmen für Ressourcenschutz (nur HH)	0,00	58.231,72	26.634,98 €
Basisförderung (BAFA)	0,00	14.988,36	14.988,36 €
Summe	0,00	73.220,08	41.623,35 €
Annuität mit Förderung	4.159,80	7.824,25	1.568,07 €/a
Annuität ohne Förderung	4.159,80	14.087,95	5.128,79 €/a

Bedarfsgebundene Kosten					
Bezugsmengen	Erdgas	923.294,12	1.360.204,34	-	kWh/a
	Strom	134.711,11	82.320,00	9.400,00	kWh/a
	Wasser	-	180.000,00	180.000,00	l/a
	Wärme	-	72.000,00	1.021.600,00	kWh/a
Energiekosten	Wasser	-	676,80	676,80	€/a
	Strom	33.785,55	17.856,96	501,60	€/a
	Erdgas	61.491,39	90.589,61	-	€/a
	Wärme	-	-	112.494,05	€/a
	Summe	95.276,93	109.123,37	113.672,45	€/a
	Annuität bedarfsgebundene Kosten	126.944,02	143.879,94	151.453,63	

Betriebsgebundene Kosten					
Kosten	Wartung und Instandhaltung	1.661,05	6.536,34	1.599,53	€/a
	Summe	1.661,05	6.536,34	1.599,53	€/a
	Annuität betriebsgebundene Kosten	1.969,97	7.751,97	1.897,02	

Sonstige Kosten					
Kosten	Versicherung etc.	108,78	441,90	199,88	€/a
	Summe	108,78	441,90	199,88	€/a
	Annuität sonst. Kosten	129,01	524,08	237,06	

Erlöse				
Förderung Energie	Jährliche KWK Förderung	-	15.841,00	- €/a
	Einspeisevergütung	-	13.476,99	- €/a
	verm. Netznutzungsentgelt	-	25,69	- €/a
	Mineralölsteuerrückerstattung	-	4.941,14	- €/a
	Summe	-	34.284,82	- €/a
Annuität Erlöse		0,00	34.988,23	0,00

Vergleich und Kennzahlen				
	Summe Investitionskosten	43.511,05	103.539,55	18.330,11 €
	Summe Kosten	97.046,76	116.101,61	115.471,87 €/a
	Summe Erlöse	0	34.284,82	0,00 €/a
	Summe (Kosten - Erlöse)	97.046,76	81.816,79	115.471,87 €/a
	jährliche Ersparnis		15.229,97	0,00 €/a
	Amortisation statisch		6,80	- a
	Amortisation dynamisch		8,51	k.A. a

Kennzahlen	Gesamtannuität m. Förderung	-133.202,80	-124.992,01	-155.155,77
	Differenz		8.210,78	0,00
	Gesamtannuität o. Förderung	-133.202,80	-131.255,71	-158.716,49
	Differenz		1.947,08	0,00
	Wärmegestehungskosten Kessel		0,0899	€/kWh _{wärme}
	Wärmegestehungskosten BHKW		0,0236	€/kWh _{wärme}
	Kältegestehungskosten KKM		0,1570	€/kWh _{kälte}
	Kältegestehungskosten AKM (BHKW beheizt)		0,0977	€/kWh _{kälte}
	Kältegestehungskosten AKM (Fernwärme beheizt)		0,2789	€/kWh _{kälte}

Emission	CO ₂		274,24	189,16	223,07 t CO ₂ /a
	Summe		274	189	223 t CO ₂ /a
	Differenz (jährl. Einsparungen)			85,09	51,17 t CO ₂ /a
	Vermeidung in %			31%	19%
Primärenergie	Primärenergieaufwand		1.335.887	943.870	602.129 kWh/a
	Summe		1.335.887	943.870	602.129 kWh/a
	Differenz (jährl. Einsparungen)			392.017,46	733.758,05 kWh/a
	Vermeidung in %			29%	55%