



## KWK-Inno.Net Krefeld

KWK-Modellkommune

### Arbeitspaket 3.4 – Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

*Ökonomisches und ökologisches Potenzial von innovativen Technologien:*  
Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungssysteme am Beispiel der Energieversorgung der  
Feuerwache Krefeld

Das Projekt wird gefördert von der Europäischen Union im Rahmen des Förderprogramms „Investition in Wachstum und Beschäftigung“.

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,  
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen



EUROPÄISCHE UNION  
Investition in unsere Zukunft  
Europäischer Fonds  
für regionale Entwicklung



**EFRE.NRW**  
Investitionen in Wachstum  
und Beschäftigung

Abschlussbericht zum Förderprojekt KWK-Inno.Net Krefeld, KWK-Inno.Net Krefeld, KWK-Modellkommune, Arbeitspaket 3.4 Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, Feuerwache Krefeld, Krefeld, Dezember 2019

Förderprojekt	KWK-Modellkommune, Phase 3 Umsetzungsphase KWK-Inno.Net Krefeld
Fördernummer	64.65-69 Kraft-Wärme-Kopplung 1053 B
Projektleitung	SWK E <sup>2</sup> – Institut für Energietechnik und Energiemanagement der Hochschule Niederrhein Prof. Dr.-Ing. Frank Alsmeyer <sup>1</sup>
Projektbearbeitung	Dipl.-Ing. Janine Bruchmann Charlotte Newiadomsky, M.Sc. Christian Schäfer, M.Sc. Marco Hurtado Martinez, B. Eng.

---

<sup>1</sup> Korrespondenzautor. E-Mail: frank.alsmeyer@hs-niederrhein.de

## Vorbemerkung

Die in diesem Bericht verwendeten weiblichen Formen von Personenbezeichnungen beziehen die der Gruppe zugehörigen männlichen Personen grundsätzlich mit ein.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	12
2	Energieversorgungssystem der Feuerwache Krefeld .....	14
2.1	Kraft-Wärme-Kopplung .....	16
2.2	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung.....	20
2.3	Varianten der Vergleichssysteme .....	21
3	Datengrundlage .....	23
3.1	Messpunkte .....	23
3.1.1	Stromzähler.....	23
3.1.2	Wärmemengenzähler.....	23
3.1.3	Kältemengenzähler .....	24
3.1.4	Gasmengenzähler.....	24
3.2	Energiekosten.....	25
4	Methode.....	26
4.1	Analyse der Verbrauchswerte.....	26
4.1.1	Stromverbrauch.....	26
4.1.2	Gasverbrauch.....	26
4.1.3	Wärmebilanz .....	26
4.1.4	Kältebilanz.....	27
4.1.5	Primärenergieverbrauch.....	27
4.1.6	CO <sub>2</sub> -Emission.....	28
4.2	Modellierung des Energieversorgungssystems und der Vergleichssysteme ...	29
4.2.1	Modellierung des Brennwertkessels.....	31
4.2.2	Modellierung des BHKW .....	32
4.2.3	Modellierung der AKM.....	32

4.2.4	Modellierung der KKM.....	32
4.2.5	Modellierung des Heißwasserpufferspeichers.....	33
4.2.6	Modellierung der Einsatzreihenfolge .....	33
4.3	Ökonomische Betrachtung .....	34
4.3.1	Investitionskosten.....	34
4.3.2	Betriebsgebundene Kosten .....	36
4.3.3	Verbrauchsgebundene Kosten.....	36
4.3.4	Einnahmen .....	37
4.3.5	Annuitätenmethode nach VDI 2067 .....	37
4.3.6	Sensitivitätsanalyse.....	41
4.4	Simulation der Versorgungsvarianten .....	41
4.4.1	Variante 1: Betrieb von BHKW, BWK und KKM .....	42
4.4.2	Variante 2: Betrieb von BWK und KKM.....	42
4.4.3	Variante 3: Betrieb von BWK und AKM.....	43
5	Ergebnisse.....	44
5.1	Verbrauchsanalyse des aktuellen Versorgungssystems.....	44
5.1.1	Stromverbrauch.....	44
5.1.2	Gasverbrauch.....	46
5.1.3	Kältebilanz.....	48
5.1.4	Wärmebilanz .....	50
5.1.5	Wärmebilanz des Versorgungssystems Variante 1 mit KKM .....	54
5.2	Kennzahlen aller Versorgungsvarianten .....	55
5.2.1	Aktuelles Versorgungssystem .....	56
5.2.2	Variante 1.....	58
5.2.3	Variante 2.....	60

5.2.4	Variante 3.....	62
5.3	Wirtschaftliche Betrachtung der Varianten des Versorgungssystems.....	63
5.3.1	Auswertung Annuitätenmethode .....	63
5.3.2	Sensitivitätsanalyse.....	66
6	Zusammenfassung .....	69
7	Literaturverzeichnis.....	71
8	Anhang .....	74

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fließbild der Energieversorgungsanlagen und Verteilung der Feuerwache Krefeld .....	15
Abbildung 2: Vereinfachtes Fließbild des Energieversorgungssystems der Feuerwache Krefeld .....	16
Abbildung 3: Energiefließbild zur Strom- und Wärmeversorgung in Wohngebäuden mittels Kraft-Wärme-Kopplung.....	17
Abbildung 4: Energiefließbild der konventionellen Strom- und Wärmeversorgung in Wohngebäuden .....	18
Abbildung 5: Aufteilung der eingesetzten Energiemenge zur Strom- und Wärmeversorgung der KWK-Anlage und der konventionellen Strom- und Wärmeversorgung .....	20
Abbildung 6: Vereinfachtes RI-Fließbild der Energieversorgung der Feuerwache Krefeld mit KKM .....	22
Abbildung 7: Vereinfachte Darstellung der Wärmeverteilung in der Feuerwache Krefeld .....	24
Abbildung 8: Monatliche Strombereitstellung des BHKW (orange), des Netzes (grau) und monatlicher Stromverbrauch der Feuerwache Krefeld (orange) .....	45
Abbildung 9: Monatliche Stromeinspeisung der Feuerwache Krefeld.....	46
Abbildung 10: Stundenwerte der Strombereitstellung des BHKW (blau), des Strombedarfs der Feuerwache (rot) und der Stromeinspeisung ins Verteilnetz (gelb)..	46
Abbildung 11: Monatlicher Gasverbrauch des BHKW (blau), des Brennwertkessels (orange) und der Feuerwache Krefeld insgesamt (grau) .....	47
Abbildung 12: Stundenwerte des Erdgasverbrauchs des BHKW (blau), des Brennwertkessels (rot) und der Feuerwache insgesamt (gelb).....	48
Abbildung 13: Monatliche Kältebedarf zur Kühlung des Serverraums (orange), zur Klimatisierung der Feuerwache Krefeld (blau) und der gesamte Kältebedarf (grau) ....	49
Abbildung 14: Monatliche Wärmebereitstellung des BHKW (blau), des Brennwertkessels (orange) und die Summe aus beiden Anlagen (grau) .....	51
Abbildung 15: Gemittelte Tageswerte der Wärmebereitstellung des BHKW (blau), des Kessels (rot) und des Wärmeverbrauchs der Feuerwache (gelb).....	52

Abbildung 16: Monatliche Wärmemenge zur Raumwärme- und Warmwasserversorgung der Feuerwache Krefeld (orange), zum Betrieb der AKM (blau) und die Summe der beiden Leistungen (grau)..... 53

Abbildung 17: Stundenwerte des Wärmeverbrauchs der AKM (blau), der Feuerwache zur Warmwasser- und Raumwärmeversorgung (rot) und der Feuerwache insgesamt (gelb). ..... 53

Abbildung 18: Wärmebereitstellung und -bedarf in der Variante 1..... 55

Abbildung 19: jährliche Kosten (Annuitäten) der jeweiligen Variante des Versorgungssystems ..... 65

Abbildung 20: Sensitivitätsanalyse Referenzsystem und Variante 1 des Versorgungssystems ..... 68

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Koeffizienten zur Ermittlung der spezifischen Investitionskosten der Anlagen im Versorgungsnetz der Feuerwache (Bez, 2012) (IUTA Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V., 2002) (Ciftci, 2018).....	35
Tabelle 2: Typ und Preis der BWK( (Viessmann Deutschland GmbH, 2017)) .....	36
Tabelle 3: Vergütungssätze für KWK-Strom (vgl. (Ciftci, 2018), (EEX, 2019), (KWKG, 2015)) .....	37
Tabelle 4: Faktoren der Annuitätenmethode (Bez, 2012) (Ciftci, 2018) .....	40
Tabelle 5: Monatliche Strombereitstellung des BHKW, monatlicher Stromverbrauch der Feuerwache Krefeld und monatliche Stromeinspeisung ins Verteilnetz .....	45
Tabelle 6: Monatlicher Gasverbrauch des BHKW, des Brennwertkessels und der Feuerwache Krefeld insgesamt, sowie der Anteil des BHKW am monatlichen Gasverbrauch .....	48
Tabelle 7: Monatliche Kältebereitstellung der AKM zur Kühlung des Serverraums und Klimatisierung der Feuerwache Krefeld .....	50
Tabelle 8: Monatliche Wärmebereitstellung des BHKW, des Brennwertkessels und die Summe aus beiden Anlagen, sowie der Anteil des BHKW an der monatlichen Wärmemenge .....	50
Tabelle 9: Wärmebilanz des simulierten Versorgungssystem mit KKM (Variante 1) ....	54
Tabelle 10: Nennwerte der Versorgungsanlagen.....	56
Tabelle 11: Übersicht Verbrauchsdaten und Kennzahlen des aktuellen Versorgungssystems .....	57
Tabelle 12: Ergebnisse der Variante 1 - BHKW und KKM .....	59
Tabelle 13: Ergebnisse der Versorgungsvariante 2 - BWK und KKM .....	61
Tabelle 14: Ergebnisse der Variante 3 - BWK und AKM.....	62
Tabelle 15: Konstante Werte und Zwischenergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....	64
Tabelle 16: Jährliche Kosten (Annuitäten) der jeweiligen Variante des Versorgungssystems .....	66
Tabelle 17: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse.....	67

## Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Formelzeichen	Einheit(en)	Bedeutung
COP	[-]	Leistungszahl von Kältemaschinen, Coefficient of Performance
E	[kWh]	Energie
H	[kWh/m <sup>3</sup> ]	Heizwert
$\eta$	[-]	Wirkungsgrad
Al	[-]	Auslastung
n	[-]	Anzahl
K	[kWh]	Kälte
m	[m <sup>3</sup> ]	Gasmenge
Q	[kWh]	Wärme
$\sigma$	[-]	Stromkennzahl

Indizes	Bedeutung
el.	elektrisch
Ges.	Gesamt
Kessel	Brennwertkessel

Abkürzung	Bedeutung
AKM	Absorptionskältemaschine
BHKW	Blockheizkraftwerk
BWK	Brennwertheizkessel
COP	Coefficient of Performance, Leistungszahl von Kältemaschinen
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
ct	Cent
EnEV	Energieeinsparverordnung
EZ	Zähler für elektrische Energie
KKM	Kompressionskältemaschine
KMZ	Kältemengenzähler
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
NRW	Nordrhein-Westfalen
SWK	Stadtwerke Krefeld
WMZ	Wärmemengenzähler

## 1 Einleitung

Das Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz der Bundesregierung Deutschland und seine entsprechenden Novellierungen (2008, 2012, 2016) unterstreichen die Bedeutung der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) als „Weichenstellung für die Energiewende“ und bei der Umsetzung der politischen Umwelt- und Klimaziele (Deutsche Bundesregierung, 2016). Die Studie „Potenzialerhebung von Kraft-Wärme-Kopplung in NRW“ zeigt auf, dass gerade Nordrhein-Westfalen (NRW) mit seinen vielfältigen Ballungsräumen im Bereich KWK über ausreichende Ausbaupotentiale verfügt (Eikmeier, et al., 2011). Um diese Potentiale zu nutzen, hat das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen im Oktober 2012 die Kommunen aufgerufen, den KWK-Ausbau vor Ort zu fördern. Die Stadt Krefeld ist diesem Aufruf gefolgt und hat gemeinsam mit den Stadtwerken Krefeld (SWK AG) und dem SWK E<sup>2</sup> - Institut für Energietechnik und Energiemanagement der Hochschule Niederrhein (SWK E<sup>2</sup>) das Forschungsprojekt KWK-Inno.Net Krefeld initiiert.

Ziel des Projektes ist die Umsetzung eines virtuellen Kraftwerks aus wirtschaftlich orientiert betriebenen Mini-Blockheizkraftwerken in Krefeld und die Übertragung des Konzeptes auf weitere Kommunen in NRW. Das Konzept KWK-Inno.Net Krefeld wurde für Wohngebäude in Krefeld entwickelt, um Anwohnerinnen, deren Wohngebäude nicht im Fernwärmeeinzugsgebiet liegen, eine KWK-Wärmeversorgung zu ermöglichen. Die Aufgaben des SWK E<sup>2</sup> sind die Unterstützung kommunaler Entscheidungsträgerinnen bei der Identifizierung ihres KWK-Ausbaupotentials und die ökologische und ökonomische Bewertung der geplanten Maßnahmen sowie möglicher ergänzender Technologien aus Sicht der Kundinnen. Das SWK E<sup>2</sup> bewertet hierzu im vorliegenden Arbeitspaket 3.4 die Möglichkeit der Erweiterung eines KWK-Systems um eine Kältemaschine, weil dadurch das Problem des geringeren Wärmebedarfs im Sommer potenziell gemindert werden kann und sich damit die Gesamtpotentiale für KWK-Technologien erhöhen könnten. In diesem Arbeitspaket werden zwei verschiedene Arten der Kälteerzeugung miteinander verglichen; zum einen die Kälteerzeugung mit einer Absorptionskältemaschine (AKM), die mit (Ab-)Wärme betrieben wird und zum anderen die Kälteerzeugung mit einer Kompressionskältemaschine (KKM), die mit Strom betrieben wird. Die SWK AG führt

ähnliche Untersuchungen für die Ergänzung des KWK-Systems um Brennstoffzellen, Mikroturbinen, Solarthermieanlagen und Wärmepumpen durch.

In diesem Bericht wird die Erweiterung eines KWK-Systems um eine AKM zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) energetisch bewertet und mit einem KWK-System ergänzt um eine KKM verglichen. Anschließend werden die unterschiedlichen Auswirkungen der beiden Kältemaschinen auf die Auslastung des KWK-Systems analysiert. Grundlage der Untersuchung ist das bereits existierende KWKK-System der Feuerwache Krefeld. Die Energieversorgung der Feuerwache Krefeld erfolgt neben dem Stromnetzanschluss mit einem BHKW, einem Brennwertkessel, einer AKM sowie zwei thermischen Speichern, einem Warmwasser- und einem Kaltwasserspeicher. Die realen Verbräuche an Strom, Wärme und Kälte der Feuerwache werden ausgewertet und bilden die Grundlage, um die beiden Energieversorgungssysteme miteinander zu vergleichen.

## 2 Energieversorgungssystem der Feuerwache Krefeld

Die Energieversorgung der Feuerwache Krefeld erfolgt mittels einem BHKW, einem Brennwertkessel, einer AKM und dem Netzanschluss. Eine solche Anlagenkombination nennt man auch Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung. Das BHKW hat eine installierte thermische Leistung von 115 kW und eine installierte elektrische Leistung von 70 kW<sub>el</sub>. Der Brennwertkessel hat eine installierte thermische Leistung von 460 kW und die AKM eine installierte Kälteleistung von 116 kW. Die AKM wird mit einem Rückkühler oder einem Freikühler gekühlt. Der Freikühler hat eine installierte Leistung von 116 kW und kann die Absorptionskältemaschine bis zu einer Außentemperatur von 5°C kühlen. Der Rückkühler hat eine installierte Leistung von 282 kW. Das Versorgungssystem enthält zusätzlich 2 thermische Speicher, einen Wärmespeicher mit 9.000 Litern Fassungsvermögen und einen Kältespeicher mit 2.000 Litern Fassungsvermögen. Abbildung 1 zeigt das RI-Fließbild des Energieversorgungssystems der Feuerwache Krefeld. In der Abbildung 2 ist das RI-Fließbild der Feuerwache vereinfacht dargestellt. Dargestellt werden nur die Eingangs- und Ausgangsgrößen, die Energieversorgungsanlagen sowie –speicher. Es wird auf die Darstellung der Verteilung und der Rückkühlanlagen verzichtet. Außerdem sind nur die für die weitere Analyse benötigten Messpunkte dargestellt, nämlich Zähler für elektrische Energie (EZ), Gaszähler, Wärmemengenzähler (WMZ) und Kältemengenzähler (KMZ).

Die vom BHKW und Brennwertkessel bereitgestellte Wärme wird zur Raumwärme- und Warmwasserversorgung genutzt, zusätzlich wird mit der Wärme die AKM angetrieben. Die bereitgestellte Kälte dient der Kühlung des Serverraums und bei Bedarf der Klimatisierung der Aufenthaltsbereiche.



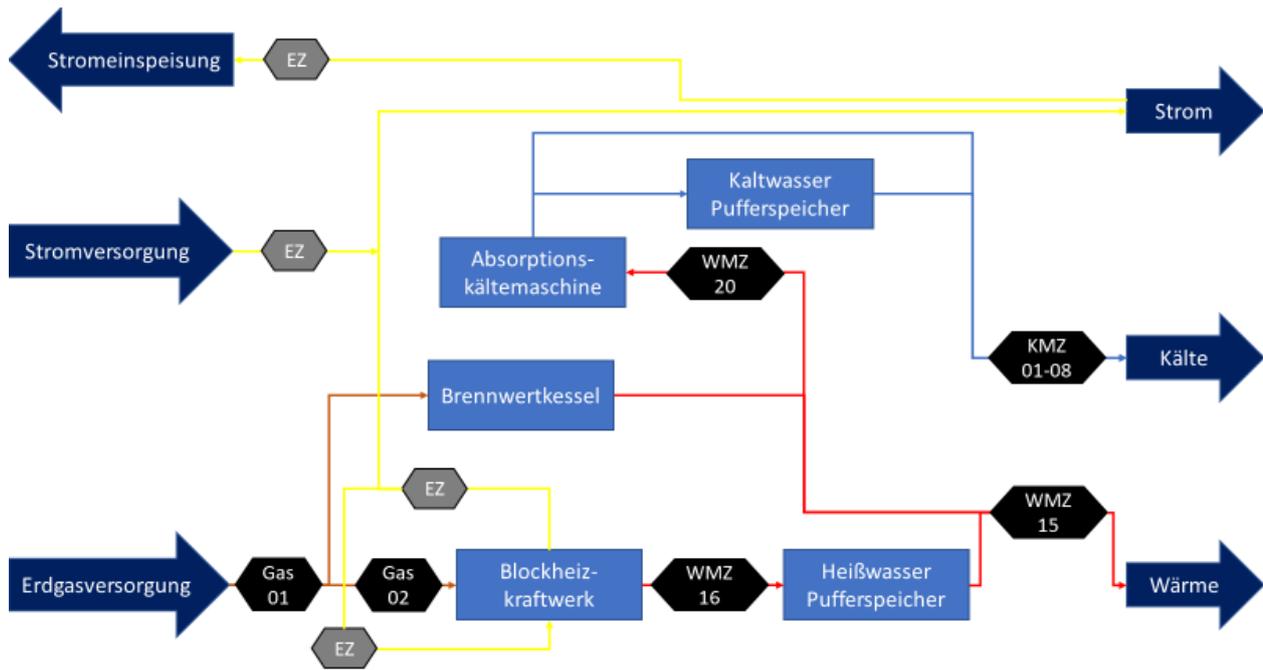


Abbildung 2: Vereinfachtes Fließbild des Energieversorgungssystems der Feuerwache Krefeld

## 2.1 Kraft-Wärme-Kopplung

Kraft-Wärme-Kopplung bezeichnet ein Energieversorgungssystem, welches sowohl Strom<sup>2</sup> als auch Wärme<sup>3</sup> bereitstellt. Dadurch können der Bedarf an Brennstoff und die Emission an CO<sub>2</sub> im Vergleich zur konventionellen Energieversorgung verringert werden. Zu den KWK-Anlagen zählen Verbrennungs-, Dampf- und Stirling-Motoren, Gas- und Dampfturbinen sowie Brennstoffzellen. Eingesetzt werden diese sowohl zentral als auch dezentral. Beispiel für zentrale KWK-Anlagen sind

- Gas- und Dampfkraftwerke,
- dampfauskoppelnde Kohlekraftwerke und
- Müllverbrennungsanlagen,

deren Wärme in Fernwärmenetzen zu den Endverbraucherinnen transportiert wird. Dezentrale KWK-Anlagen stehen ortsnahe zur Endverbraucherin, wie z.B. Mini- oder

<sup>2</sup> In diesem Bericht wird für den fachlich korrekten Begriff „elektrische Energie“, zum besseren Verständnis das allgemein gebräuchliche Synonym „Strom“ verwendet.

<sup>3</sup> In diesem Bericht wird für den fachlich korrekten Begriff „thermische Energie“ in einem Prozess zur Temperaturerhöhung das allgemein gebräuchliche Synonym „Wärme“ verwendet.

Mikro-Blockheizkraftwerke (BHKW) und Brennstoffzellen und versorgen einzelne Gebäude, kleine Wohnsiedlungen oder zusammenhängende Gebäudekomplexe.

Der Vorteil der KWK zeigt sich z.B. im Vergleich der Strom- und Wärmeversorgung eines Wohngebäudes mit einem konventionellen System (i.d.R. Netzanschluss zur Stromversorgung und Brennstoffkessel zur Wärmeversorgung).

Abbildung 3 zeigt den Energiefluss der Strom- und Wärmeversorgung von Wohngebäuden mittels KWK. Das BHKW hat in diesem Beispiel einen Gesamtwirkungsgrad von 87% bezogen auf den Heizwert<sup>4</sup> des Erdgases. Wird die Menge Erdgas im BHKW eingesetzt, die einem Heizwert von 100 kWh entspricht, kann der Verbraucher mit 51 kWh Wärme und 36 kWh Strom versorgt werden. Mit dem Primärenergiefaktor für Erdgas von 1,1 werden für diese Versorgung 110 kWh Primärenergie eingesetzt. Durch den Primärenergiefaktor wird die Energie, die zur Förderung, Aufbereitung und Verteilung des Erdgases benötigt wird, berücksichtigt.

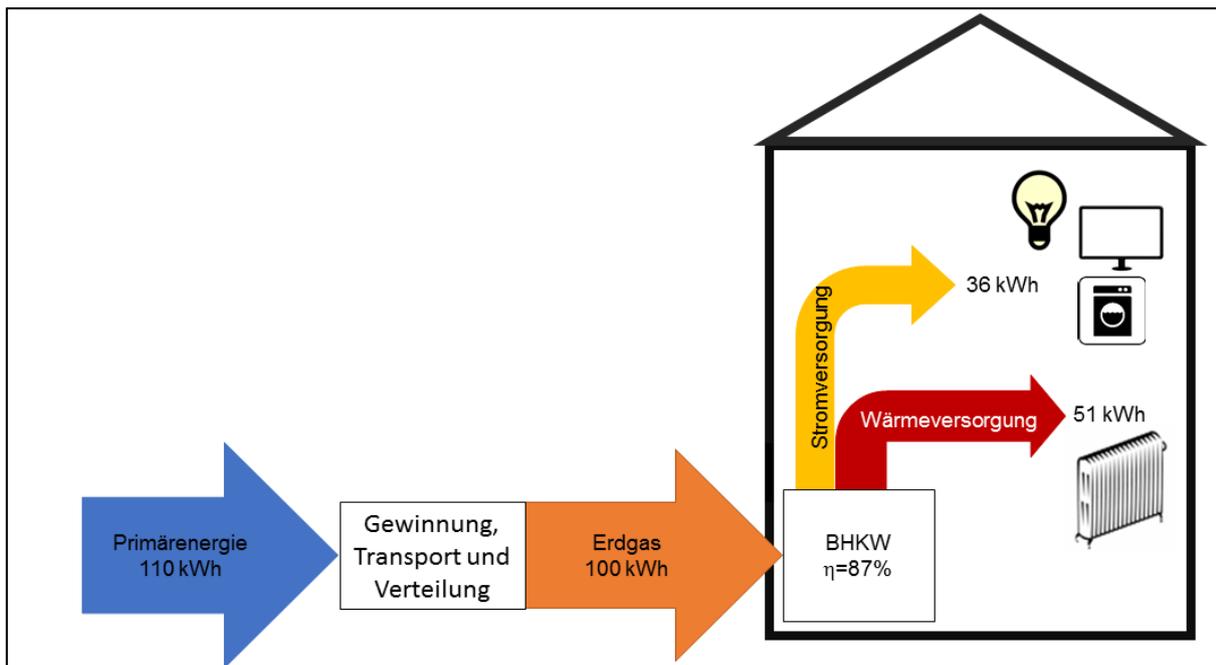


Abbildung 3: Energiefließbild zur Strom- und Wärmeversorgung in Wohngebäuden mittels Kraft-Wärme-Kopplung

<sup>4</sup> „Der Heizwert (früher auch unterer Heizwert genannt) ist die auf die Brennstoffmenge bezogenen Energie, die bei vollständiger Verbrennung bei konstanten Druck frei wird, wenn die Verbrennungsprodukte auf die Bezugstemperatur zurückgeführt werden, der Wasserdampf jedoch dampfförmig gedacht bleibt. Als Bezugsgröße ist nach internationalen Empfehlungen 25°C vereinbart.“ (Cerbe & Hoffmann, 1990)

Abbildung 4 zeigt den Energiefluss der konventionellen Strom- und Wärmeversorgung von Wohngebäuden. Um die gleiche Menge Strom und Wärme zur Versorgung des Verbrauchs wie im vorherigen Beispiel bereitzustellen, werden zwei getrennte Systeme verwendet. Für die Wärmeversorgung mit 51 kWh wird, z.B. in einem Brennwertkessel<sup>5</sup> mit einem Wirkungsgrad von 99% (bezogen auf den Heizwert) die Menge Erdgas eingesetzt, die einem Heizwert von 52 kWh und somit einem Primärenergieeinsatz von 57 kWh entspricht. Für die Stromversorgung mit 36 kWh durch den deutschen Kraftwerkspark mit einem Wirkungsgrad von 45% im Jahr 2014 (BDEW; AG Energiebilanzen e.V., 2016) werden weitere 80 kWh Primärenergie benötigt.

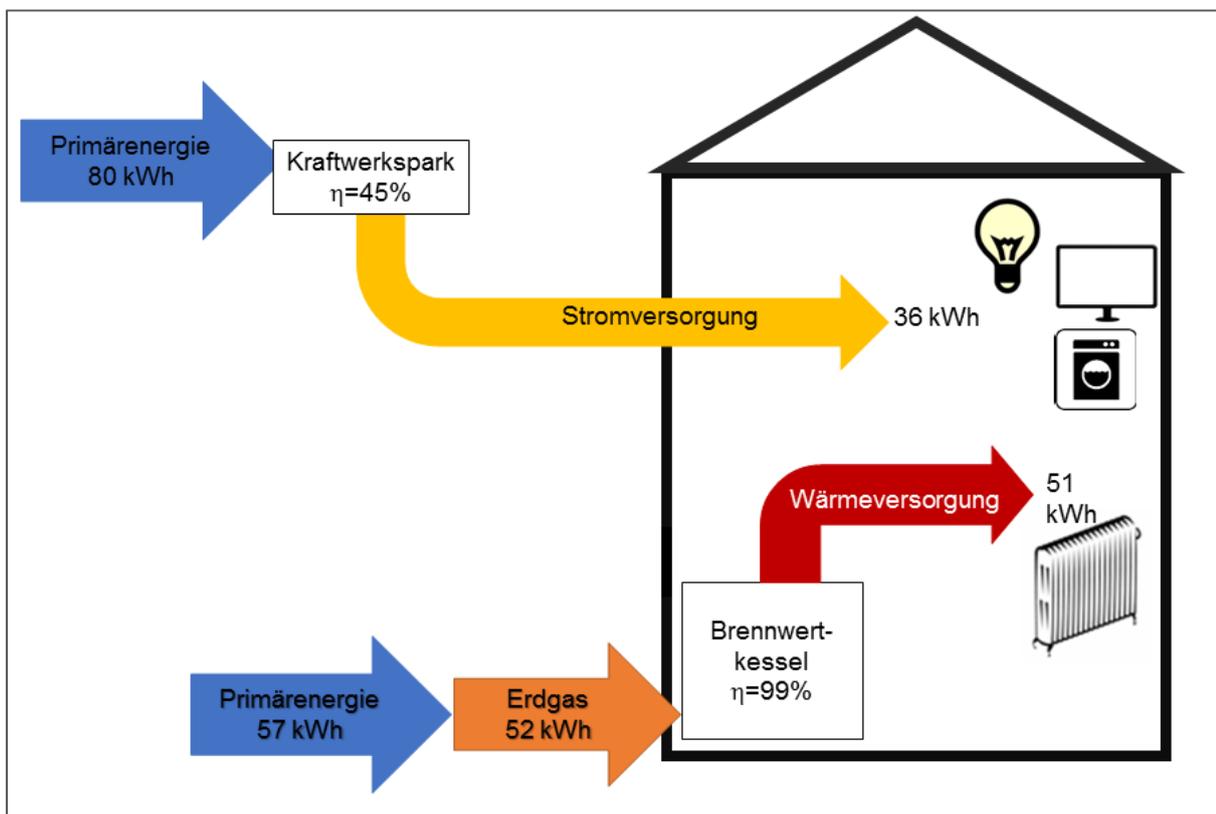


Abbildung 4: Energiefließbild der konventionellen Strom- und Wärmeversorgung in Wohngebäuden

<sup>5</sup> „Der Brennwert (früher oberer Heizwert genannt) ist die auf die Brennstoffmenge bezogene Energie, die bei vollständiger Verbrennung bei konstantem Druck frei wird, wenn die Verbrennungsprodukte auf die Bezugstemperatur zurückgekühlt werden. Bei der Bestimmung des Brennwertes kondensiert der vom Brennstoff verursachte Wasserdampf und gibt seine Kondensationsenthalpie ab.“ (Cerbe & Hoffmann, 1990)

Es wird deutlich, dass bei der konventionellen Strom- und Wärmeversorgung im Vergleich zur Versorgung mittels KWK-Anlagen ein höherer Primärenergieeinsatz notwendig ist, um die gleichen Mengen an Nutzenergie bereitzustellen (Abbildung 5). Allerdings zeigt sich auch, dass die Energieeinsparung durch den Einsatz von KWK-Anlagen nur erzielt wird, wenn beide Energieformen – Strom und Wärme – gleichzeitig genutzt werden. Dezentrale KWK-Anlagen werden selten auf die Spitzenlast des Wärmebedarfs ausgelegt, sondern auf die Grundlast des Wärmebedarfs. Dadurch kann die Anlage über lange Zeiträume mit einer konstanten Leistung schonender betrieben werden. Häufiges An- und Abschalten führt zu kürzeren Wartungszyklen und im Teillastbetrieb sind die Anlagen weniger effizient. Durch die zeitliche Entkopplung des lokalen Wärme- und Strombedarfs z.B. über Energiespeicher könnte die Einsparung auch genutzt werden, obwohl die Bedarfe zu unterschiedlichen Zeiten vorliegen. Dabei sind aber weitere Investitionen und die Energieverluste durch die Speichertechnologie zu berücksichtigen. Ohne Energiespeicher muss der Strom in Zeiten, in denen zwar ein Wärmebedarf aber kein ausreichend hoher Strombedarf vorliegt, ins Verteilnetz eingespeist werden. Da der verstärkte Ausbau von Wind- und Photovoltaikanlagen zu fluktuierenden Netzauslastungen und damit verbundenen Strompreisschwankungen am Energiemarkt führt, stellt die ungesteuerte Einspeisung von Strom durch dezentrale Energieanlagen die Verteilnetzbetreiber vor Herausforderungen. Mit zentralen KWK-Anlagen, die die Wärme in ein Fernwärmenetz und den Strom ins Stromnetz einspeisen, wird die Bedingung der gleichzeitigen Nutzung von Strom und Wärme durch einen (oder einige wenige) Verbraucher aufgelöst. Das gleiche trifft auch auf virtuelle Kraftwerke aus dezentralen KWK-Anlagen zu, auf die im nächsten Abschnitt näher eingegangen wird.

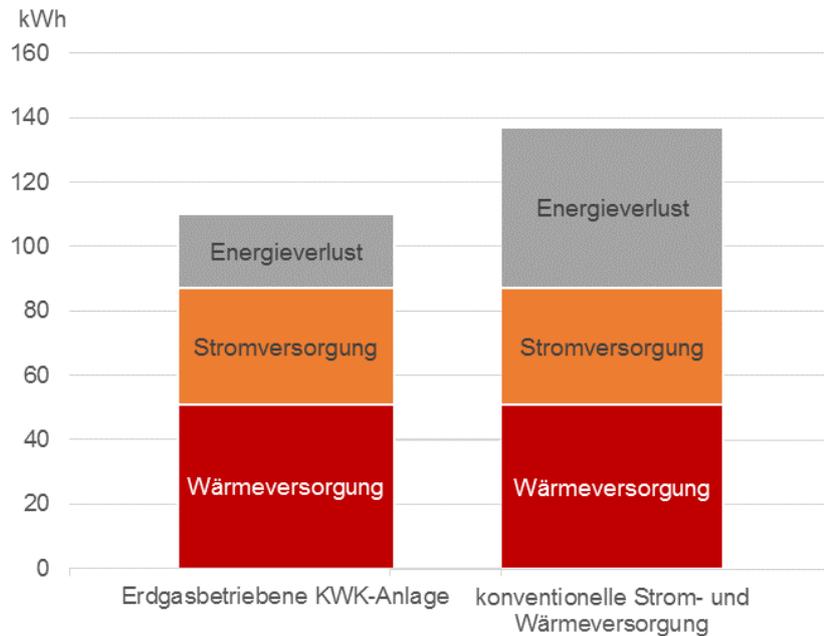


Abbildung 5: Aufteilung der eingesetzten Energiemenge zur Strom- und Wärmeversorgung der KWK-Anlage und der konventionellen Strom- und Wärmeversorgung

## 2.2 Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

Bei der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung werden verschiedene Energieanlagen zur Versorgung eines Verbrauchers, z.B. der Feuerwache Krefeld mit Strom, Wärme und Kälte zu einem Versorgungssystem kombiniert. Die KWKK wird von den KWK-Systemen abgeleitet, so dass das Versorgungssystem mindestens aus einer KWK-Anlage und einer Kältemaschine besteht. Da die KWK-Anlage selten zur Spitzenlastdeckung des Wärmebedarfs ausgelegt wird, wird das Versorgungssystem häufig um einen Brennwärtekessel erweitert. Strombedarfe, die nicht über die KWK-Anlage gedeckt werden können, werden vom Verteilnetz bezogen. Die Kälteversorgung kann durch zwei unterschiedliche Arten der Kälteerzeugung erfolgen. Zum einen mittels Kompressionskältemaschinen, die mit Strom betrieben werden, zum anderen mit Absorptionskältemaschinen, die hauptsächlich mit Wärme angetrieben werden.

Die Art der Kälteerzeugung mit einer AKM und einer KKM ähnelt sich prinzipiell. In einem Verdampfer verdampft das Kältemittel auf niedrigem Temperatur- und Druckniveau und nimmt dabei Energie in Form von Wärme auf. Diese wird einem Kühlraum entzogen, welcher sich daraufhin abkühlt.

Bei der KKM wird das Kältemittel als Gas in einem mechanischen Verdichter auf ein höheres Druckniveau gebracht, bevor es in einem Verflüssiger seine Wärme wieder abgibt und kondensiert. Nachdem das Kältemittel durch ein Expansionsventil wieder entspannt wurde, steht es dem Kreislauf von neuem zur Verfügung.

Im Gegensatz dazu arbeitet eine AKM mit einem so genannten „thermischen Verdichter“. Das Kältemittel wird nach der Verdampfung von einem weiteren, flüssigen Stoff absorbiert, der eine Erniedrigung des Sättigungsdampfdrucks und analog dazu eine Erhöhung des Siedepunktes bewirkt. Das Stoffpaar kann nun als Flüssigkeit mit geringem mechanischem Aufwand auf einen höheren Druck gebracht werden. Die Druckerhöhung in der Gasphase (KKM) ist auf Grund der größeren Volumenänderung um ein Vielfaches energieintensiver als in der Flüssigphase (AKM). Unter Wärmezufuhr wird das Stoffpaar in einer AKM wieder voneinander getrennt. Anschließend wird das gasförmige Kältemittel dem Verflüssiger zugeführt, wo es wiederum kondensiert.

Wichtige Kenngröße bei der Bewertung von Kälteprozessen ist die Leistungsziffer, COP (engl. Coefficient of Performance), das Verhältnis zwischen Nutzenergie – dem Kältestrom  $K$  – und aufgewendeter Energie – der elektrischen Energie  $E_{el.,KKM}$  für die KKM bzw. der thermischen Energie  $Q_{AKM}$  für die AKM. Der COP einer KKM ist definiert als

$$COP_{KKM} = \frac{K}{E_{el.,KKM}} \tag{Gl. 1}$$

und liegt für Klimaprozesse bei etwa 4 (Fa. Gertec GmbH, 2010).

Der COP einer AKM ist definiert als

$$COP_{AKM} = \frac{K}{Q_{AKM}} \tag{Gl. 2}$$

und liegt für Klimaprozesse bei etwa 0,67 (von Cube, et al., 1997).

### 2.3 Varianten der Vergleichssysteme

Zur Bewertung der energetischen und wirtschaftlichen Effizienz des installierten Energieversorgungssystems werden die Energieverbrauchswerte und die damit verbundenen Kosten mit theoretischen Energieversorgungssystemen verglichen. Es wird untersucht, wie sich das Versorgungssystem gestaltet, wenn verschiedene Anlagen des

aktuellen Versorgungssystem ausgetauscht werden oder wegfallen. Dabei werden 3 Varianten untersucht.

In der Variante 1 besteht das theoretische Versorgungssystem aus dem BHKW, dem Brennwertkessel und den thermischen Speichern des realen Systems, anstatt mit der AKM wird die Kälteversorgung im theoretischen System mit einer KKM sichergestellt. In Abbildung 6 ist das vereinfachte Fließbild der Energieversorgung der Feuerwache mit einer KKM dargestellt.

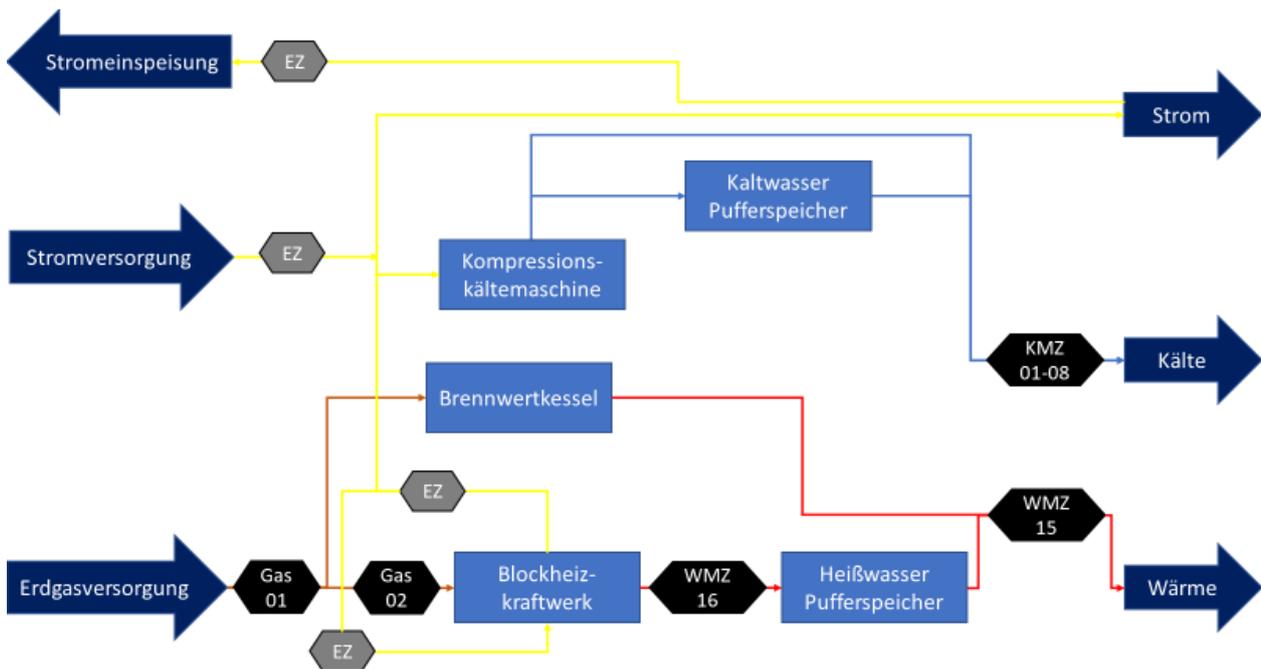


Abbildung 6: Vereinfachtes RI-Fließbild der Energieversorgung der Feuerwache Krefeld mit KKM

In der Variante 2 wird untersucht, welche Auswirkungen sich auf das theoretische System aus Variante 1 ergeben, wenn das BHKW nicht betrieben wird und die Wärmeversorgung nur durch den BWK sichergestellt werden.

In der Variante 3 wird untersucht, welche Auswirkungen sich ergeben, wenn das aktuell installierte System nur mit dem BWK und der AKM betrieben wird.

## 3 Datengrundlage

Die Werte der einzelnen Messpunkte in der Feuerwache Krefeld wurden von der SWK zur Verfügung gestellt. Die Be- und Entlademengen der thermischen Speicher liegen nicht vor. Die Messpunkte werden nachfolgend beschrieben.

### 3.1 Messpunkte

Von der SWK werden in der Feuerwache Krefeld insgesamt vier Stromzähler, 28 Wärmemengenzähler, sieben Kältemengenzähler und zwei Gasmengenzähler erfasst und ausgelesen (Abbildung 2, Details Abbildung 1). Die Kälte- und Wärmemengenzähler erfassen die Verbrauchswerte alle 15 Minuten, außer dem Wärmemengenzähler des BHKW, dessen Werte nur jede Stunde erfasst werden. Der Gasmengenzähler der Feuerwache erfasst die Verbrauchswerte ebenfalls nur jede Stunde, allerdings erfasst der Gasmengenzähler des BHKW die Verbrauchswerte alle 5 Minuten.

#### 3.1.1 Stromzähler

Für die Stromabrechnung der SWK mit der Feuerwache werden die Strombezüge aus dem Verteilnetz und die Stromeinspeisung ins Verteilnetz in 15-Minutenwerten erfasst. Ebenfalls ist ein KWK-Stromzähler installiert, der den gesamten KWK-Strom des BHKW erfasst. Zusätzlich gibt es einen Zähler für den Eigenstromverbrauch des BHKW.

#### 3.1.2 Wärmemengenzähler

Für die in diesem Projekt erstellten Auswertungen und Analysen sind folgende Wärmemengenzähler relevant:

- Wärmebereitstellung des BHKW,
- Wärmeversorgung der AKM und
- Wärmeversorgung des Heizungssystems (inkl. Warmwasserversorgung).

Die Wärmeversorgung wird durch das BHKW und den BWK geleistet. Das BHKW speist die Wärme in den Pufferspeicher ein. Aus diesem wird dann die Wärme in die Wärmeverteilung oder zur AKM geleitet. Ist der Wärmebedarf höher als die ausspeicherbare Wärme des Pufferspeichers, wird der BWK dazugeschaltet.

Die Wärme wird über den WMZ 15 auf die Hauptverteilung geleitet. Die Hauptverteilung gliedert sich in Verteilstränge zu den Anlagen der Klimatechnik und zwei Unterverteilungen. Diese unterteilen sich in weitere Verteilstränge für Klimatechnik. Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, ist die Warmwasserversorgung im Heizungs-/Klimasystem integriert. Dadurch, dass nur zwei der drei Warmwasserboiler einzeln erfasst werden, kann die Wärmemenge zur Warmwasserversorgung nicht separat betrachtet werden.

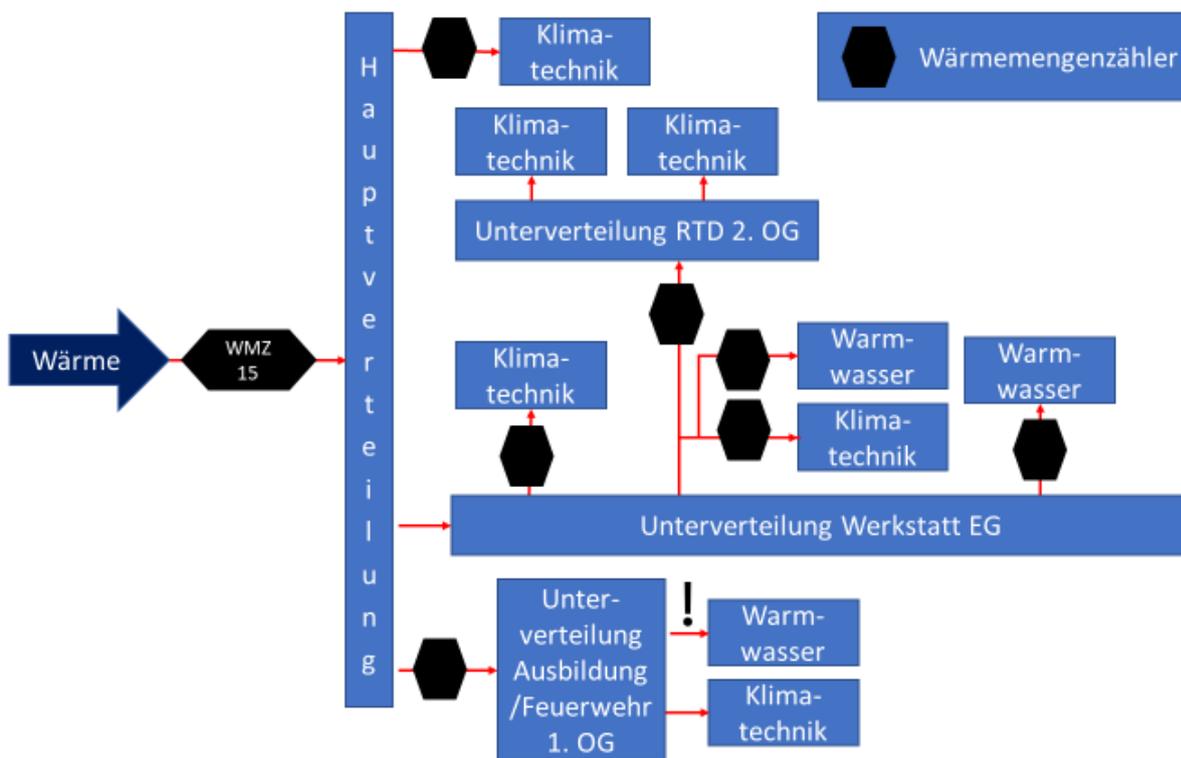


Abbildung 7: Vereinfachte Darstellung der Wärmeverteilung in der Feuerwache Krefeld

### 3.1.3 Kältemengenzähler

Die Kälteversorgung erfolgt über vier Verteilstränge, von denen sich einer in zwei weitere Verteilstränge aufgliedert.

### 3.1.4 Gasmengenzähler

Für die Gasabrechnung der SWK mit der Feuerwache werden die Gas Mengen zum Betrieb des BHKW und der Gesamtgasverbrauch der Feuerwache erfasst. Der Zähler für

das BHKW erfasst die Durchflussmenge  $m_{Gas}$  in  $m^3/h$ , der Zähler am Brennwertkessel berechnet über den Heizwert für Erdgas  $H_{Gas}$  gemäß

$$E_{Gas} = m_{Gas} \cdot H_{Gas} \quad \text{Gl. 3}$$

aus der Durchflussmenge den Energiegehalt des verbrauchten Gases  $E_{Gas}$ , der dann abgespeichert wird. Der Heizwert für Erdgas (L-Gas) liegt bei  $9,76 \text{ kWh/m}^3$ .

### 3.2 Energiekosten

Der Arbeitspreis für Strom wird für die Feuerwache Krefeld mit  $14,9 \text{ ct/kWh}$  und der Arbeitspreis für Gas mit  $2,69 \text{ ct/kWh}$  angenommen, das entspricht dem mittleren Strom- bzw. Gaspreis für Industriebetriebe in Deutschland im Jahr 2017 (Bundesnetzagentur, 2017). Da die Feuerwache ein Großkunde der SWK ist, gehen wir von vergünstigten Energiepreisen aus.

## 4 Methode

Die Auswertung der Energieverbräuche und die Simulation des alternativen Versorgungssystems erfolgt in Matlab<sup>®</sup>. Dazu werden die Messwerte in Matlab<sup>®</sup> eingelesen und fehlende Datenpunkte werden für die Visualisierung in Diagrammen mit entsprechendem Datum und Uhrzeit, allerdings ohne Verbrauchswerte eingefügt. Da für den Gasverbrauch des BHKW nur Stundenwerte vorliegen, werden alle Verbrauchswerte zu Stundenwerten zusammengefasst. Die Datengrundlage umfasst 11 Monate und dient allen Berechnungen und Simulationen, deshalb wird in diesem Bericht der Begriff Perioden verwendet, um die 11 Monate zu beschreiben.

### 4.1 Analyse der Verbrauchswerte

Die Strom-, Wärme- und Kälteverbräuche der gesamten Feuerwache werden als Summen der einzelnen Zähler berechnet.

#### 4.1.1 Stromverbrauch

Der Stromverbrauch der Feuerwache  $E_{el.,Ges}$  ergibt sich aus dem vom Verteilnetz bezogenen Strom  $E_{el.,Netzbezug}$  und dem vom BHKW bereitgestellten Strom  $E_{el.,BHKW}$ , abzüglich dem ins Verteilnetz eingespeisten Strom  $E_{el.,Netzeinspeisung}$  sowie dem Eigenstromverbrauch des BHKW  $E_{el.,BHKW,Eigenbedarf}$  zu

$$E_{el.,Ges.} = E_{el.,Netzbezug} + E_{el.,BHKW} - (E_{el.,Netzeinspeisung} + E_{el.,BHKW,Eigenbedarf}). \quad \text{Gl. 4}$$

#### 4.1.2 Gasverbrauch

Der Gasverbrauch des Brennwertkessels der Feuerwache  $E_{Gas,Kessel}$  ergibt sich aus der Differenz der Gasverbräuche des Gesamtgasverbrauch der Feuerwache  $E_{Gas,Ges.}$  und des BHKW  $E_{Gas,BHKW}$ .

$$E_{Gas,Kessel} = E_{Gas,Ges} - E_{Gas,BHKW}. \quad \text{Gl. 5}$$

#### 4.1.3 Wärmebilanz

Die bereitgestellte Wärmemenge des BHKW  $Q_{BHKW}$  wird am Wärmemengenzähler 16 erfasst. Der Wärmeverbrauch der Feuerwache zur Raumwärme- und Warmwasserversorgung  $Q_{FW}$  wird am Wärmemengenzähler 15 (WMZ15, Abbildung 2)

erfasst, der Wärmeverbrauch der AKM  $Q_{AKM}$  am Wärmemengenzähler 20 (WMZ 20, Abbildung 2). Die bereitgestellte Wärme des Brennwertkessels  $Q_{Kessel}$  ergibt sich aus der Bilanz dieser drei Wärmemengenzähler zu

$$Q_{Kessel} = Q_{FW} + Q_{AKM} - Q_{BHKW}. \quad \text{Gl. 6}$$

Der gesamte Wärmebedarf der Feuerwache  $Q_{Bedarf}$  setzt sich zusammen gemäß

$$Q_{Bedarf} = Q_{FW} + Q_{AKM}. \quad \text{Gl. 7}$$

Da die Speicherstände des thermischen Speichers zwischen dem BHKW und dem Brennwertkessel variieren, ist die stationäre (zeitpunktbezogene) Berechnung nach Gl. 3 nicht ganz korrekt. Leider liegen auch keine Messwerte zum Speicherstand vor. Durch den Betrachtungszeitraum über mehrere Monate ist der Fehler durch die stationäre Betrachtung der Wärmebilanz aber nicht allzu groß, da der Speicher die Wärme nicht über mehrere Tage speichert.

#### 4.1.4 Kältebilanz

Der Kälteverbrauch der Feuerwache ergibt sich aus der Summe der einzelnen Kältemengenzähler zu

$$K_{Ges.} = K_{KMZ1} + K_{KMZ2} + K_{KMZ3} + K_{KMZ4} + K_{KMZ6} + K_{KMZ7} + K_{KMZ8}. \quad \text{Gl. 8}$$

#### 4.1.5 Primärenergieverbrauch

Der Primärenergieverbrauch umfasst zusätzlich zum eigentlichen Energiebedarf an einem Energieträger die Energiemenge, die durch vorgelagerte Prozesse bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung des Energieträgers benötigt wird. Beispielsweise müssen 0,1 kWh Erdgas eingesetzt werden, damit 1 kWh Erdgas von der Förderung bis zum Kunden gelangt. Die Energie, die einem Konsumenten zur Verfügung steht, nennt man Endenergie (z.B. 1 Liter Benzin). Das Verhältnis von Primärenergie zur Endenergie wird von Primärenergiefaktoren beschrieben. Der Primärenergieverbrauch für den Gasverbrauch der Feuerwache ergibt sich aus dem Gasverbrauch  $E_{Gas,Ges}$  der Feuerwache und dem Primärenergiefaktor für Erdgas  $PEF_{Erdgas}$  zu

$$E_{Primär,Erdgas} = E_{Gas,Ges} \cdot PEF_{Erdgas} \quad \text{Gl. 9}$$

Der Primärenergiefaktor für Erdgas  $PEF_{Erdgas}$  beträgt 1,1 kWh/kWh. Der Primärenergieverbrauch für den Strom, der dem Netz entnommen wird, ergibt sich aus dem Strombezug aus dem Netz  $E_{el.,Netzbezug}$  und dem  $PEF_{Strommix}$  zu

$$E_{Primär,Strom} = E_{el.,Netzbezug} \cdot PEF_{Strommix} \quad \text{Gl. 10}$$

Der  $PEF_{Strommix}$  beträgt 1,8 kWh/kWh.

Der gesamte Primärenergieverbrauch ergibt sich dann aus

$$E_{Primär,Ges} = E_{Primär,Strom} + E_{Primär,Erdgas} \quad \text{Gl. 11}$$

(Wuppertal Institut, 2015)

#### 4.1.6 CO<sub>2</sub>-Emission

Bei der Verbrennung von Kohle, Gas oder Erdöl entsteht das Treibhausgas CO<sub>2</sub>. Das CO<sub>2</sub> hat dabei den größten Einfluss auf den Treibhauseffekt und somit auch auf die Klimaproblematik. Um das aktuelle Versorgungssystem der Feuerwache und das Vergleichs-Versorgungssystem ökologisch zu bewerten, werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Feuerwache berechnet.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Feuerwache  $CO_{2,Ges}$  in Krefeld berechnen sich aus den CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch die Verwendung von Erdgas und durch den Strombezug aus dem Netz entstehen. Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen  $CO_{2,spez.Erdgas}$  von Erdgas betragen 201 g/kWh. Für die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch den Strombezug aus dem Netz entstehen, werden die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen für den deutschen Strommix der Jahre 2016 (516 g/kWh) und 2017 (489 g/kWh) über die relevanten Monate gewichtet ermittelt (Gl. 11). Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen für den Strommix  $CO_{2,spez.Strom}$  in Deutschland betragen damit für diesen Zeitraum 491 g/kWh:

$$CO_{2,spez.Strom} = \frac{516 \frac{g}{kWh} * 1 Mt. + 489 \frac{g}{kWh} * 10 Mt.}{11 Mt.} = 491 \frac{g}{kWh} \quad \text{Gl. 12}$$

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die dem Versorgungssystem der Feuerwache zugerechnet werden können, berechnen sich zu

$$CO2_{Ges} = E_{el.,Netzbezug} \cdot CO2_{spez.Strom} + E_{Gas,Ges} \cdot CO2_{spez.Erdgas} \quad \text{Gl. 13}$$

(Icha, 2019)

## 4.2 Modellierung des Energieversorgungssystems und der Vergleichssysteme

Für die energetische Bewertung der Anlagen, die mittleren Kennzahlen und die Vergleichsanalyse der beiden Versorgungssysteme werden die Daten unterschiedlich behandelt:

- Bei Stunden- oder Tageswerten werden nur Daten von Zeitpunkten verwendet, zu denen alle benötigten Werte vorliegen. D.h., fehlen zu einem Zeitpunkt ein oder mehrere Werte, wird der komplette Zeitpunkt mit allen zugehörigen Werten aus der Datenmenge gelöscht.
- Werden Monats- oder Jahresmittelwerte betrachtet, werden alle Daten verwendet. In diesen Fällen ist die Grundgesamtheit der Daten groß genug, um die Datenmenge zusammenzufassen und aus dieser die Werte zu beziehen.

Zusätzlich wird geprüft, ob das Ergebnis für den Kennwert des jeweiligen Zeitpunktes oder Zeitraumes realistisch ist. Dafür werden in der Auswertung Grenzwerte oder Intervalle festgelegt, innerhalb derer sich die Werte bewegen müssen. Verletzt für einen Zeitpunkt der Wert der Kennzahl die Grenzwerte, wird der Zeitpunkt aus der Berechnung herausgenommen.

Zur Bewertung und anschließenden Modellierung des Energieversorgungssystems werden folgende Kennzahlen der Anlagen benötigt:

- Volllaststunden  $T_V$  der Anlagen,
- Auslastung  $A$  der Anlagen
- Wirkungsgrad  $\eta$  der Anlage,
- Stromkennzahl  $\alpha$  des BHKW und

- Leistungszahl COP der AKM.

Für den betrachteten Zeitraum werden die Volllaststunden  $T_V$  gemäß

$$T_V = \frac{P_{Ges}}{P_{Inst}} \quad \text{Gl. 14}$$

aus der im betrachteten Zeitraum erbrachten Gesamtleistung  $P_{Ges}$  und der installierten Anlagenleistung  $P_{Inst}$  berechnet. Die Auslastung der Anlagen  $A$  wird gemäß

$$A = \frac{T_V}{T_{Ges}} \quad \text{Gl. 15}$$

aus den Volllaststunden und der gesamten Zeitraum  $T_{Ges}$  berechnet.

Mit Volllaststunden wird die Zeit bezeichnet, über die eine Anlage bei Nennleistung betrieben werden müsste, um die Gesamtleistung zu erbringen, die die Anlage innerhalb eines festgelegten Zeitraums tatsächlich erbracht hat. Die Auslastung entspricht dem Anteil der Volllaststunden im betrachteten Zeitraum.

Der Wirkungsgrad  $\eta$  einer Anlage berechnet sich aus der Nutzenergie  $E_{Nutz}$  und der eingesetzten Energiemenge  $E_{Einsatz}$  gemäß

$$\eta = \frac{E_{Nutz}}{E_{Einsatz}}. \quad \text{Gl. 16}$$

Der Wirkungsgrad gibt an, wieviel Energie die Anlage benötigt, um die Nutzenergie bereitzustellen.

Die Stromkennzahl ist das Verhältnis der bereitgestellten elektrischen Energie und der bereitgestellten Wärmemenge. Mit der Stromkennzahl kann man somit bei Kenntnis der bereitgestellten Menge einer Energieform auf die bereitgestellte Menge der anderen Energieform schließen. Die Stromkennzahl  $\sigma$  berechnet sich aus der vom BHKW bereitgestellten Strommenge  $E_{el.,BHKW}$  und der vom BHKW bereitgestellten Wärmemenge  $Q_{BHKW}$  gemäß

$$\sigma = \frac{E_{el.,BHKW}}{Q_{BHKW}}. \quad \text{Gl. 17}$$

Die Leistungszahl (COP) der AKM  $COP_{AKM}$  berechnet sich wie der Wirkungsgrad von Anlagen aus der Nutzenergie – dem Kältestrom  $K$  – und der eingesetzten Energie  $Q_{AKM}$  gemäß

$$COP_{AKM} = \frac{K}{Q_{AKM}} \quad \text{Gl. 1}$$

und gibt an, wieviel thermische Energie die AKM benötigt, um den Kältestrom bereitzustellen.

Da das BHKW und der Brennwertkessel im Vergleichssystem erhalten bleiben, werden für die Simulation die mittleren Wirkungsgrade  $\bar{\eta}$  der beiden Anlagen aus den Wirkungsgraden  $\eta_t$  zu jedem Zeitpunkt  $t$  und der Anzahl der Zeitpunkte  $n_t$  gemäß

$$\bar{\eta} = \frac{\sum_t \eta_t}{n_t} \quad \text{Gl. 2}$$

berechnet. Die mittlere Stromkennzahl des BHKW  $\bar{\sigma}$  wird aus den Stromkennzahlen zu jedem Zeitpunkt  $\sigma_t$  zu jedem Zeitpunkt  $t$  und der Anzahl der Zeitpunkte  $n_t$  gemäß

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_t \sigma_t}{n_t} \quad \text{Gl. 18}$$

berechnet.

Mit den mittleren Kennzahlen werden die Anlagen im Vergleichssystem simuliert.

#### 4.2.1 Modellierung des Brennwertkessels

Zur energetischen Bewertung des Brennwertkessels werden für jeden Zeitpunkt die Wirkungsgrade des Brennwertkessels  $\eta_{Kessel}$  aus der bereitgestellten Wärmemenge  $Q_{Kessel}$  und der eingesetzten Energiemenge  $E_{Gas,Kessel}$  gemäß

$$\eta_{Kessel} = \frac{Q_{Kessel}}{E_{Gas,Kessel}} \quad \text{Gl. 19}$$

berechnet. Der in diesem Bericht ausgewiesene Wert entspricht dem Mittelwert der  $\eta_{Kessel}$  über den Betrachtungszeitraum. Der in der Feuerwache installierte Kessel ist mit einem Normnutzungsgrad (Wirkungsgrad) von 109% bezogen auf den  $H_s$  ausgewiesen. Überschreitet der  $\eta_{Kessel}$  in einem Zeitpunkt den Wert von 109% wird der Wert des Zeitpunktes auf 109% gesetzt.

#### 4.2.2 Modellierung des BHKW

Zur energetischen Bewertung des BHKW werden für jeden Zeitpunkt die thermischen Wirkungsgrade  $\eta_{th.,BHKW}$  aus der vom BHKW bereitgestellten Wärmemenge  $Q_{BHKW}$  und der vom BHKW benötigten Energiemenge in Form von Gas  $E_{Gas,BHKW}$  gemäß

$$\eta_{th.,BHKW} = \frac{Q_{BHKW}}{E_{Gas,BHKW}} \quad \text{Gl. 20}$$

und die Gesamtwirkungsgrade aus der insgesamt bereitgestellten Energiemenge  $Q_{BHKW} + E_{el.,BHKW}$  und der vom BHKW benötigten Energiemenge in Form von Gas  $E_{Gas,BHKW}$  gemäß

$$\eta_{ges.,BHKW} = \frac{Q_{BHKW} + E_{el.,BHKW}}{E_{Gas,BHKW}} \quad \text{Gl. 21}$$

berechnet.

Bei der Auswertung wird geprüft, ob die Herstellerangaben für den Wirkungsgrad überschritten werden. Für den Wirkungsgrad für Strom des BHKW wird der Maximalwert auf 34,3% gesetzt und der Wirkungsgrad für Wärme des BHKW auf 56,4%.

#### 4.2.3 Modellierung der AKM

Bei der Auswertung des COP der AKM wird geprüft, ob der COP-Wert des Zeitpunktes die Herstellerangabe von 0,7 überschreitet. Ist dies der Fall, wird der Wert auf die Herstellerangabe von 0,7 angepasst. Zusätzlich wurden in diesem Fall die Tageswerte für den Wärmebedarf der AKM  $Q_{AKM}$  und den Kältebedarf  $K$  der Feuerwache verwendet. Eine Berechnung auf Grundlage der Stundenwerte war in diesem Fall nicht möglich.

#### 4.2.4 Modellierung der KKM

Die in den verschiedenen Varianten der Versorgungssysteme betriebene Kompressionskältemaschine ersetzt die AKM. Für die KKM wird angenommen, dass diese die gleiche Kälteleistung erbringt wie die AKM. Die KKM hat somit eine Kälteleistung von 116 kW. Übliche COP-Werte heutiger KKM schwanken zwischen 3 und 5. Für die KKM kann ein COP von 4 angenommen werden (Österreichische Energieagentur, 2015).

In der Praxis kann davon ausgegangen werden, dass es zu Abweichungen des Nennwert-COP kommt, z.B. durch An- bzw. Abfahrprozesse oder anderweitige Verluste. Um die Simulation der KKM praxisnah zu gestalten, wird ein COP von 3 (untere Grenze des o.g. Schwankungsbereichs) angenommen.

#### 4.2.5 Modellierung des Heißwasserpufferspeichers

Der Pufferspeicher (HPS) besitzt ein Fassungsvermögen von 9.000 l bzw. kg. Die speicherbare Wärme des Speichers ergibt sich gemäß

$$Q_{HPS} = m_{HPS} \cdot c_{p,Wasser} \cdot (T_2 - T_1). \quad \text{Gl. 22}$$

$m_{HPS}$	Fassungsvermögen Heißwasserpufferspeicher
$c_{p,Wasser}$	Wärmekapazität Wasser 4,19 kJ/kgK
$T_2$	Maximale Temperatur (Vorlauf) 90 °C
$T_1$	Minimale Temperatur (Rücklauf) 60 °C

Nach Gl. 22 besitzt der Speicher eine Kapazität von 314 kWh. Im Fließbild der Feuerwache ist zu erkennen, dass der Speicher nur von dem BHKW gespeist wird.

#### 4.2.6 Modellierung der Einsatzreihenfolge

In der Simulation der Betriebsweise des BHKW in der Variante 1 mit KKM und BWK wird eine Einsatzreihenfolge festgelegt. Dies geschieht über Bedingungen und Prioritäten.

Der Wärmebedarf ist durch die Zeitreihe des WMZ 15 vorgegeben. Der Speicher und der BWK sind voll regelbar, d.h. deren Einspeisemenge zur Wärmeversorgung kann zwischen Null und der maximalen Leistung eingestellt werden. Die Einspeisemenge des BHKW ist an Bedingungen gekoppelt, sodass diese nur der maximalen Leistung entspricht. Das BHKW ist deshalb nur bedingt über die Einspeisezeit regelbar.

Die Anlagenkomponenten verhalten sich wie folgt (geordnet nach Priorität des Einschaltens):

##### 1. BHKW:

Das BHKW läuft auf Vollast, solange ein ausreichender Wärmebedarf oder ausreichende Speicherkapazität im Pufferspeicher (oder eine Kombination aus beidem) vorliegt. Sobald es zu der Situation kommt, dass das BHKW nicht mehr

eine volle Stunde auf Volllast laufen kann, produziert dieses die Fehlmenge aus der Summe des Wärmebedarfs und der freien Kapazität des Pufferspeichers. Das BHKW wird dann heruntergefahren und erst wieder hochgefahren, wenn der Pufferspeicher den Wärmebedarf nicht mehr decken kann. Die Anfahrprozesse sind auf 4 pro Tag begrenzt.

2. Pufferspeicher:

Die gespeicherte Wärme im Pufferspeicher wird immer zur Deckung des Wärmebedarfs verwendet.

3. BWK:

Der BWK deckt alle Fehlmengen, die nach dem BHKW und dem Pufferspeicher noch vorliegen.

### 4.3 Ökonomische Betrachtung

Um das aktuelle Versorgungssystem der Feuerwache ökonomisch bewerten zu können, werden die Kosten des aktuellen Systems mit den Kosten des Vergleichssystems verglichen. Innerhalb der ökonomischen Betrachtung werden die Verbrauchsdaten des Versorgungssystems als konstant angenommen. Für den wirtschaftlichen Vergleich gibt es verschiedene Methoden, in diesem Bericht wird die Annuitätenmethode nach VDI 2067 verwendet. In der Annuitätenmethode werden einmalige Zahlungen und laufende Zahlungen über den Betrachtungszeitraum zusammengefasst.

#### 4.3.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten  $K_{Inv}$  der AKM, der KKM und des BHKW werden über die spezifischen Investitionskosten  $k_{Inv}$  und eine Anlagenkenngröße  $x_{Anl}$  gemäß

$$K_{Inv} = x_{Anl} \cdot k_{Inv} \tag{Gl. 23}$$

berechnet.

Die spezifischen Investitionskosten der Anlagen werden über die Kostenfunktion

$$k_{Inv} = a \cdot (Q)^b + c \tag{Gl. 24}$$

ermittelt.

Q ist für die Kältemaschinen die Kälteleistung und für das BHKW die elektrische Leistung. Die Koeffizienten a, b und c der Funktion für die jeweiligen Anlagentypen sind in der Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Koeffizienten zur Ermittlung der spezifischen Investitionskosten der Anlagen im Versorgungsnetz der Feuerwache (Bez, 2012) (IUTA Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V., 2002) (Ciftci, 2018)

Anlagentyp	Koeffizienten
KKM; gültig für Kälteleistung: 10 bis 10.000 kW	$a = 4.991,34$ $b = -0,6794$ $c = 179,63$
AKM (mit Rückkühlanlage); gültig für Kälteleistung: 200 bis 1600kW	$a = 17.554,18$ $b = -0,5655$ $c = 0$
AKM (ohne RKA); gültig für Kälteleistung: 50 bis 4750kW	$a = 14.740,3$ $b = -0,6849$ $c = 3,29$
BHKW (ohne Einbindungskosten)	$a = 9332,6$ $b = -0,462$ $c = 0$

Die Kälteleistung der AKM in der Feuerwache beträgt 116kW. Es ergibt sich ein Preis für die AKM mit Rückkühlanlage (RKA) von 138.480€. Die AKM ohne RKA kostet 66.302€. Eine KKM würde 43.750€ kosten.

Für das BHKW ergeben sich Investitionskosten in Höhe von 92.153€. Für das BHKW fallen noch Einbindungskosten in Höhe von 12.767€ an (Suttor, 2014). Insgesamt betragen die Investitionskosten für das BHKW 104.920€.

Auch die Investitionskosten des Brennwert-Heizkessels wurden der Vollständigkeit halber berechnet. Anders als zuvor wurde der Mittelwert der Preise über 6 vergleichbare Modelle eines Herstellers gebildet. In Tabelle 2 sind der Typ, die Nennleistung und der Preis der BWK aufgeführt. Der Investitionspreis des BWK der Feuerwache beträgt damit etwa 32.528 €.

Tabelle 2: Typ und Preis der BWK( (Viessmann Deutschland GmbH, 2017))

Typ	Nennleistung	Preis	Bemerkung
Vitocrossal 300 Typ CT3U	460 kW	32.348 €	
Vitocrossal 300 Typ CT3U <sup>1</sup>	460 kW	33.044 €	
Vitocrossal 200 Typ CI	440 kW	33.634 €	Mehrkesseanlage
Vitocrossal 200 Typ CI <sup>1</sup>	516 kW	37.542 €	Mehrkesseanlage
Vitocrossal 300 Typ CT3B	460 kW	28.951 €	
Vitocrossal 300 Typ CT3B <sup>1</sup>	461 kW	29.647 €	
Mittelwert		32.528 €	
<sup>1</sup> andere Leistung oder technische Ausstattung des Heizkessels			

### 4.3.2 Betriebsgebundene Kosten

Die Betriebskosten umfassen die Kosten für Wartung und Instandhaltung der betrachteten Anlagen. Die Betriebskosten einer AKM betragen 1% der Investitionskosten und die Betriebskosten einer KKM 4% der Investitionskosten. Die Betriebskosten des BWK betragen 2% der Investitionskosten. (IUTA Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V., 2002)

Die spezifischen Betriebskosten des BHKW sind in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung angegeben und werden grafisch aus Diagrammen ermittelt (ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., 2011). Für das BHKW der Feuerwache ergeben sich spezifische Betriebskosten von

$$2 \frac{ct}{kWh_{el}}$$

### 4.3.3 Verbrauchsgebundene Kosten

Die verbrauchsgebundenen Kosten der Feuerwache sind die Energiekosten, die durch die Verwendung des KWKK-Systems in der Feuerwache anfallen. Die Energiekosten werden über die spezifischen Kosten für Energie und die verbrauchten Energiemengen gemäß

$$K_{Ges,E} = E_{el.,Netzbezug} \cdot k_{Strom} + E_{Gas,Ges} \cdot k_{Erdgas} \quad \text{Gl. 25}$$

berechnet.

Die spezifischen Kosten für Erdgas  $k_{Erdgas}$  betragen 2,69 ct/kWh, jene für Strom  $k_{Strom}$  14,9 ct/kWh. (Bundesnetzagentur, 2017)

#### 4.3.4 Einnahmen

Das BHKW erwirtschaftet zusätzlich Einnahmen durch den Eigenverbrauch des Stroms innerhalb der Feuerwache und durch die Einspeisung von Strom in das allgemeine Versorgungsnetz. Für den Eigenverbrauch von Strom aus KWK-Anlagen erhält der Betreiber der KWK-Anlage eine Vergütung. Diese setzt sich aus einem Zuschlag nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG), dem mittleren Quartalspreis für Grundlaststrom der Leipziger Strombörse EEX und vermiedenen Netzkosten zusammen. Die Höhe der Zuschläge für Eigenverbrauch und Einspeisung sind der Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Vergütungssätze für KWK-Strom (vgl. (Ciftci, 2018), (EEX, 2019), (KWKG, 2015))

	Vergütung für KWK-Strom bei Eigenverbrauch	Vergütung für KWK-Strom bei Einspeisung ins Versorgungsnetz
KWKG-Zuschlag	3 ct/kWh	6 ct/kWh
Vermiedene Netzkosten	0,5 ct/kWh	0,5 ct/kWh
Durchschnittlicher Strompreis EEX	3,49 ct/kWh	3,49 ct/kWh
Gesamte Vergütung	6,99 ct/kWh	9,99 ct/kWh

Für das BHKW mit einer elektrischen Leistung von 50 kW bis 100 kW gelten die Zuschläge nur für die ersten 30.000 Vollbenutzungsstunden (KWKG, 2015). Die Einnahmen für den Eigenverbrauch  $e_{EV}$  und die Einspeisungen  $e_{Einspeisung}$  werden nun mittels der Produktionswerte  $E_{EV}$  bzw.  $E_{Einspeisung}$  und der aufgeführten Vergütungen  $v_{EV}$  bzw.  $v_{Einspeisung}$  gemäß

$$e_{EV} = E_{EV} \cdot v_{EV} \tag{Gl. 26}$$

berechnet. Analog wird die Gl. 26 für die Einspeisewerte verwendet. (Ciftci, 2018)

#### 4.3.5 Annuitätenmethode nach VDI 2067

Bei geplanten Investitionen müssen Kapitalkosten berücksichtigt werden. Mit Hilfe der Annuitätenmethode werden die anfallenden Zahlungen auf den Betrachtungszeitraum

verteilt. Die berechneten Annuitäten bilden die Entscheidungsgrundlage für oder gegen eine Investition. Die Investition mit der höchsten Annuität ist die wirtschaftlichste.

Die kapitalgebundenen Kosten berechnet sich gemäß:

$$A_{N,K} = (A_0 - R_W) \cdot a \quad \text{Gl. 27}$$

$$R_W = A_0 \cdot r^{n \cdot T_N} \cdot \frac{(n + 1) \cdot T_N - T}{T_N} \cdot \frac{1}{q^T} \quad \text{Gl. 28}$$

$$a = \frac{q - 1}{1 - q^{-T}} \quad \text{Gl. 29}$$

$A_{N,K}$	Annuität der kapitalgebundenen Kosten
$A_0$	Investitionsbetrag
$R_W$	Restwert
$a$	Annuitätsfaktor
$r$	Preisänderungsfaktor
$q$	Zinsfaktor
$T_N$	Nutzungsdauer der Anlagen
$T$	Betrachtungszeitraum in Jahren

Die laufenden Kosten und Erlöse sind aufgrund von Preisänderungen anzupassen. Dies geschieht über den preisdynamischen Barwertfaktor, der sich gemäß

$$b = \frac{1 - \left(\frac{r}{q}\right)^T}{q - r} \quad \text{Gl. 30}$$

berechnet.

Die Annuität der verbrauchsgebundenen Kosten berechnet sich gemäß:

$$A_{N,V} = K_{Ges,E} \cdot a \cdot b_V \quad \text{Gl. 31}$$

$A_{N,V}$	Annuität der verbrauchsgebundenen Kosten (Verbrauchsdaten)
$K_{Ges,E}$	Gesamtkosten für Verbrauch von Energie
$b_V$	preisdynamischer Barwertfaktor für Verbrauchskosten (Energiekosten)

Die Annuität der betriebsgebundenen Kosten berechnet sich gemäß:

$$A_{N,B} = K_B \cdot a \cdot b_B \quad \text{Gl. 32}$$

$A_{N,B}$  Annuität der betriebsgebundenen Kosten  
 $b_B$  preisdynamischer Barwertfaktor für Betriebskosten

(Kranebitter, 2015)

Die Annuität der Erlöse berechnet sich gemäß:

$$A_{N,E} = e_{Ges} \cdot a \cdot b_E \quad \text{Gl. 33}$$

$A_{N,E}$  Annuität der Erlöse  
 $e_{Ges,1}$  Gesamterlöse aus Eigenverbrauch und Einspeisung in der 1. Periode  
 $b_E$  Preisdynamischer Barwertfaktor für Erlöse

Die Gesamtannuität berechnet sich gemäß:

$$A_N = A_{N,E} - (A_{N,K} + A_{N,B} + A_{N,V}) \quad \text{Gl. 34}$$

(Bez, 2012)

Die Werte, die als konstante Faktoren in der Berechnung verwendet werden, sind in der Tabelle 4 ausgewiesen.

Tabelle 4: Faktoren der Annuitätenmethode (Bez, 2012) (Ciftci, 2018)

<i>Annuitätenmethode</i>	<i>Wert</i>	<i>Einheit</i>
<i>Betrachtungszeitraum</i>	15,0	a
<i>Betrachtungszeitraum</i>	16,4	Perioden
<i>Nutzungsdauer BHKW / KKM</i>	15,0	a
<i>Nutzungsdauer BHKW / KKM</i>	16,4	Perioden
<i>Nutzungsdauer AKM / BWK</i>	18,0	a
<i>Nutzungsdauer AKM / BWK</i>	19,6	Perioden
<i>Zinssatz</i>	8,0	%
<i>Zinsfaktor q</i>	1,08	
<i>Preisänderung Strom</i>	2,00	%
<i>Preisänderung Erdgas</i>	3,40	%
<i>Preisänderung Inflation</i>	1,42	%
<i>Preisänderungsfaktor Energie</i>	1,03	
<i>Preisänderungsfaktor Strom</i>	1,02	
<i>Preisänderungsfaktor Erdgas</i>	1,03	
<i>Preisänderungsfaktor Dienstleistungen / Kapital</i>	1,01	
<i>Preisänderung Erlöse</i>	1,00	
<i>Annuitätenfaktor</i>	0,11	
<i>Barwertfaktor Energie</i>	10,59	
<i>Barwertfaktor Strom</i>	10,12	
<i>Barwertfaktor Erdgas</i>	11,08	
<i>Barwertfaktor Dienstleistungen</i>	9,76	
<i>Barwertfaktor Erlöse</i>	8,95	
<i>Anzahl Ersatzbeschaffungen</i>	0,00	

<sup>1</sup> Eine Periode sind 11 Monate (Datengrundlage) die Umrechnung von Jahren in Perioden erfolgt mittels des Faktors  $\frac{12}{11}$  bzw. 1,09.

Der Betrachtungszeitraum kann frei gewählt werden, wobei die VDI 2067 kürzere Betrachtungszeiträume empfiehlt. In dieser Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde der Betrachtungszeitraum entsprechend der kürzesten Nutzungsdauer einer Anlage des Versorgungssystems gewählt. Dies entspricht 15 Jahren oder 16,4 Perioden. Die Nutzungsdauer der einzelnen Anlagen wurde der VDI 2067 entnommen. (Bez, 2012)

Der kalkulatorische Zinssatz fließt bei der Verzinsung des eingesetzten Kapitals über den Zinsfaktor q mit in die Berechnung ein. Für den kalkulatorischen Zinssatz ist zu beachten, inwiefern eine Anlage eigen- oder fremdfinanziert wird. In dieser Betrachtung wird ein Zinssatz von 8% angenommen.

Die Preisänderung für Strom und Erdgas entspricht der mittleren jährlichen Preisänderung für Industriekunden in den Jahren 1996 bis 2018. In diesem Zeitraum ist der Preis für Erdgas im Mittel um 3,4% gestiegen. Der Strompreis für Industriekunden ist um 2% im Mittel gestiegen. (BMW, 2019)

Analog wurde die Änderung des Verbraucherpreisindex (Inflation) für Dienstleistungen und Investitionskosten zugrunde gelegt. Diese beträgt 1,4% im Mittel im Zeitraum 1996 bis 2018. (Destatis, 2019)

Die in der Betrachtung aufgeführten Vergütungssätze werden als konstant angenommen, da sich diese zum größten Teil aus gesetzlich festen Werten zusammensetzen. Dies entspricht einer Preisänderung von 0 und einem Preisänderungsfaktor von 1.

#### 4.3.6 Sensitivitätsanalyse

Um die Auswirkung einer Änderung eines Parameters auf die Annuitäten bewerten zu können, werden bestimmte Parameter einer Sensitivitätsanalyse unterzogen. Es wurden die Parameter Preisänderung, Investitionskosten und Zins in „-50%“- und „+50%“-Szenarien untersucht. Ziel war es herauszufinden, wie stark sich die Änderung dieser Parameter auf die Gesamtkosten (Annuitäten) auswirkt. Dafür werden die Parameter jeweils mit den Faktoren 0,5, 1 und 1,5 multipliziert.

#### 4.4 Simulation der Versorgungsvarianten

Die realen Bedarfe an Strom, Wärme und Kälte der Feuerwache bilden die Grundlage, um die Energieverbräuche und Energiekosten der verschiedenen Varianten des aktuellen Energieversorgungssystems (Referenzsystem) miteinander zu vergleichen. Je nach Versorgungsvariante (nachfolgend Variante 1 bis 3 genannt) wird z.B. der Wärmebedarf der Feuerwache um den Wärmeverbrauch zum Betrieb der AKM reduziert. Die benötigte Gasmenge der Anlagen wird entsprechend der Betriebsweise angepasst. Falls das BHKW weniger Wärme bereitstellen kann, wird die vom BHKW bereitgestellte Strommenge ebenfalls entsprechend angepasst. Weitere Verbrauchsdaten und Kennzahlen, die sich durch Änderungen der Betriebsweisen der Anlagen in den theoretischen Versorgungsvarianten ergeben, werden entsprechend der Gleichungen aus den vorherigen Abschnitten des Kapitel 4 angepasst.

#### 4.4.1 Variante 1: Betrieb von BHKW, BWK und KKM

Der Strombedarf zur Kältebereitstellung mittels der KKM  $E_{el.,KKM}$  ergibt sich aus dem Kälteverbrauch der Feuerwache  $K_{Ges.}$  und der Leistungszahl  $COP_{KKM}$  gemäß

$$E_{el.,KKM} = \frac{K_{Ges.}}{COP_{KKM}} \quad \text{Gl. 35}$$

Der Strombedarf der Feuerwache besteht in der aktuellen Versorgungsvariante nur aus Bedarfen für die Feuerwache. Der Gesamtstromverbrauch der Feuerwache wird also um den Stromverbrauch der KKM erweitert gemäß

$$E_{el.,Ges.} = E_{el.,Netzbezug} + E_{el.,KKM} + E_{el.,BHKW} - E_{el.,BHKW,Eigenbedarf} \quad \text{Gl. 36}$$

Durch Umstellen der Gl. 20 und Gl. 21 werden der Erdgasverbrauch und die Stromproduktion aus der Wärmebereitstellung berechnet. Der Eigenbedarf des BHKW wird über das Verhältnis der Volllaststunden Neuberechnet gemäß

$$E_{el.,BHKW,Eigenbedarf,neu} = \frac{T_{V,neu}}{T_{V,alt}} \cdot E_{el.,BHKW,Eigenbedarf,alt} \quad \text{Gl. 37}$$

Es wird angenommen, dass es durch den zusätzlichen Stromverbrauch der KKM nicht mehr zu Einspeisungen in das Versorgungsnetz von KWK-Strom kommt.

#### 4.4.2 Variante 2: Betrieb von BWK und KKM

Diese Variante stellt das Versorgungssystem ohne BHKW dar. Es wird angenommen, dass der BWK und die Pufferspeicher den gesamten Wärmebedarf der Feuerwache decken können. Der Kältebedarf wird über eine KKM gedeckt. Aus dem Wärmebedarf wird mittels des Wirkungsgrades des BWK der Erdgasbedarf der Feuerwache gemäß

$$Q_{Kessel} = Q_{FW}, \quad \text{Gl. 38}$$

$$E_{Gas,Ges} = E_{Gas,Kessel} = \frac{Q_{Kessel}}{\eta_{Kessel}} \quad \text{Gl. 39}$$

ermittelt.

Der Strombedarf der KKM wird mittels Gl. 35 ermittelt. Der Strombedarf der Feuerwache wird komplett dem Versorgungsnetz entnommen und berechnet sich gemäß

$$E_{el.,Ges.} = E_{el.,Netzbezug} = E_{el.,FW} + E_{el.,KKM}. \quad \text{Gl. 40}$$

#### 4.4.3 Variante 3: Betrieb von BWK und AKM

In dieser Variante wird angenommen, dass der BWK und die Pufferspeicher den gesamten Wärmebedarf decken. Der Kältebedarf wird mittels der AKM gedeckt. Der gesamte Wärmebedarf ergibt sich gemäß

$$Q_{Kessel} = Q_{FW} + Q_{AKM}. \quad \text{Gl. 41}$$

Der Erdgasverbrauch der Feuerwache ergibt sich aus Gl. 39.

Der Stromverbrauch bleibt unverändert und wird ausschließlich dem Versorgungssystem entnommen.

## 5 Ergebnisse

Zunächst werden die Ergebnisse der Verbrauchsanalyse des aktuellen Versorgungssystems aufgeführt. Die Ergebnisse der untersuchten Versorgungsvarianten werden dann mit den Ergebnissen des aktuellen Versorgungssystems verglichen.

### 5.1 Verbrauchsanalyse des aktuellen Versorgungssystems

Zur energetischen Bewertung des Energieversorgungssystems werden jeweils die Gesamtverbräuche der Feuerwache Krefeld an Strom, Gas, Wärme und Kälte dargestellt, sowie die Leistungen des BHKW und der Absorptionskältemaschine. Die Verbräuche und Leistungen der Energieanlagen werden ins Verhältnis zu den Gesamtverbräuchen gesetzt. Anschließend wird die Anlagenauslastung berechnet. Die Werte des realen Betriebs werden dann mit den simulierten Werten des alternativen Versorgungssystems verglichen.

#### 5.1.1 Stromverbrauch

In Abbildung 8 und Tabelle 5 ist die Strombereitstellung des BHKW und der Stromverbrauch der Feuerwache für die einzelnen Monate dargestellt. Die Feuerwache verbraucht im Monat zwischen 80.000 kWh und 90.000 kWh Strom. Das BHKW stellt im Monat zwischen 30.000 kWh und 45.000 kWh Strom bereit, das entspricht je nach Monat 38 % bis 51 % des Strombedarfs. Die Abbildung 9 zeigt die monatliche Stromeinspeisung ins Verteilnetz. Zu Zeiten, zu denen das BHKW Strom bereitstellt, die Feuerwache aber die gesamte Menge nicht selbst benötigt, wird der sog. Überschussstrom ins Verteilnetz eingespeist. Je nach Monat schwankt die eingespeiste Strommenge zwischen 10 kWh und 100 kWh. Die Einspeisemengen sind so niedrig, weil die Feuerwache insgesamt mehr als doppelt so viel Strom benötigt, wie das BHKW bereitstellt. Dennoch gibt es vereinzelte Stunden im Jahr, in denen das BHKW mehr Strom bereitstellt als benötigt wird, in diesen Stunden kann die Feuerwache Strom ins Verteilnetz einspeisen. Abbildung 10 zeigt die Stundenwerte der Strombereitstellung des BHKW, des Strombedarfs der Feuerwache und der Stromeinspeisung ins Verteilnetz.

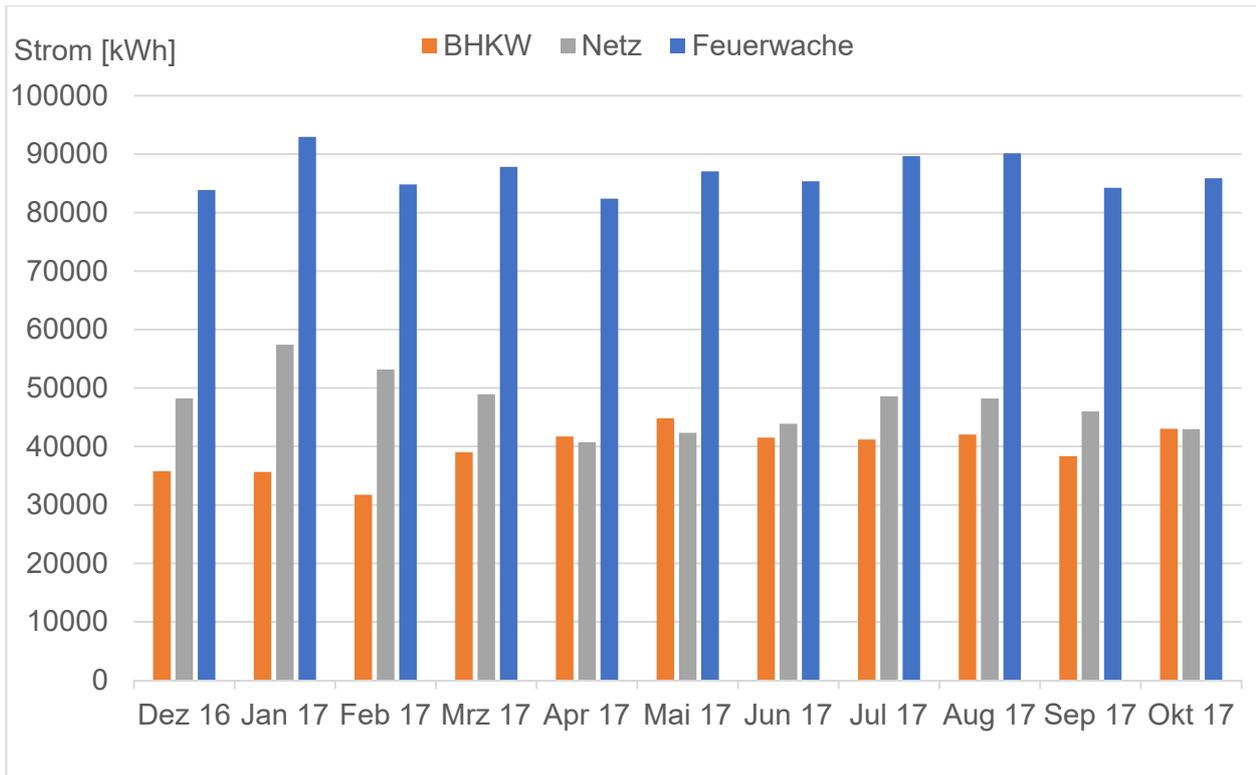


Abbildung 8: Monatliche Strombereitstellung des BHKW (orange), des Netzes (grau) und monatlicher Stromverbrauch der Feuerwache Krefeld (orange)

Tabelle 5: Monatliche Strombereitstellung des BHKW, monatlicher Stromverbrauch der Feuerwache Krefeld und monatliche Stromeinspeisung ins Verteilnetz

Monat	Strombereitstellung BHKW	Stromverbrauch Feuerwache	Stromeinspeisung ins Netz	Stromdeckung BHKW
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%]
Dez 16	35.755	83.878	76	43%
Jan 17	35.656	92.974	73	38%
Feb 17	31.739	84.820	60	37%
Mrz 17	39.006	87.828	77	44%
Apr 17	41.694	82.385	10	51%
Mai 17	44.811	87.069	66	51%
Jun 17	41.521	85.360	37	49%
Jul 17	41.195	89.649	100	46%
Aug 17	42.033	90.142	57	47%
Sep 17	38.355	84.245	71	46%
Okt 17	43.012	85.884	57	50%

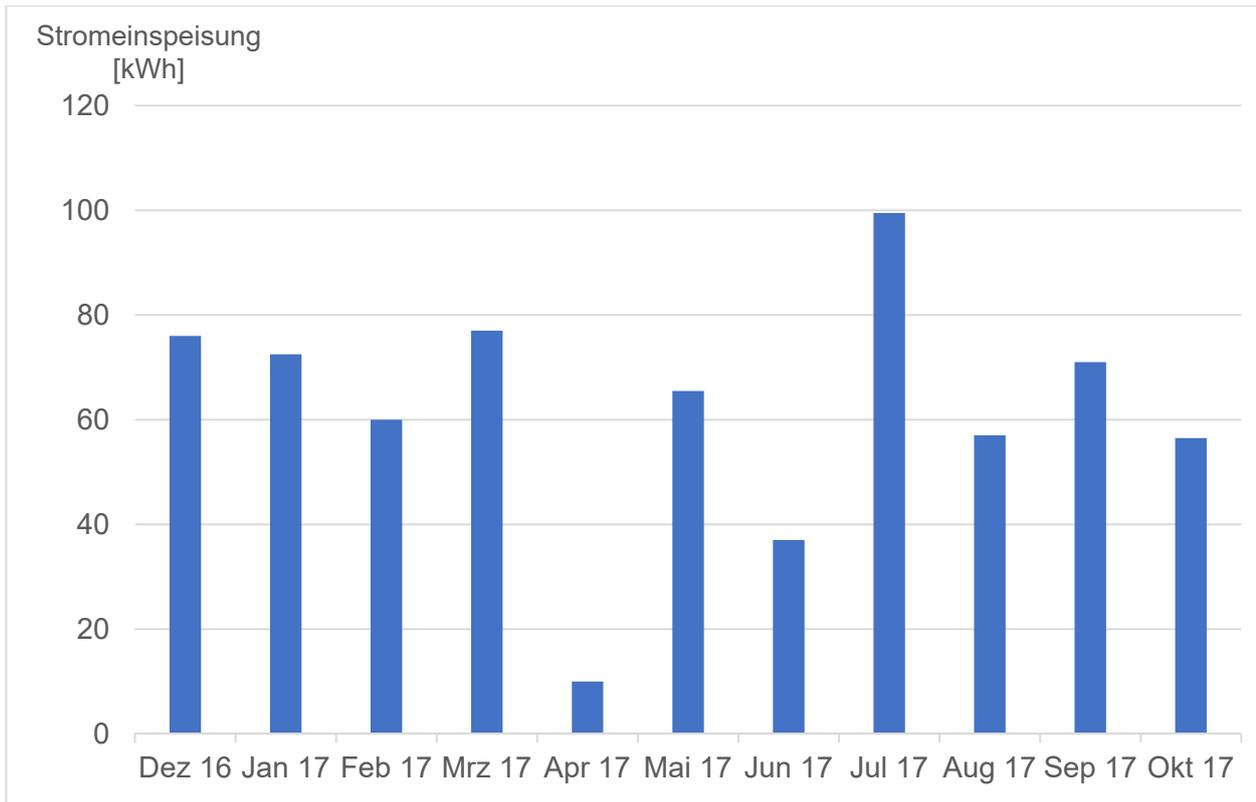


Abbildung 9: Monatliche Stromeinspeisung der Feuerwache Krefeld

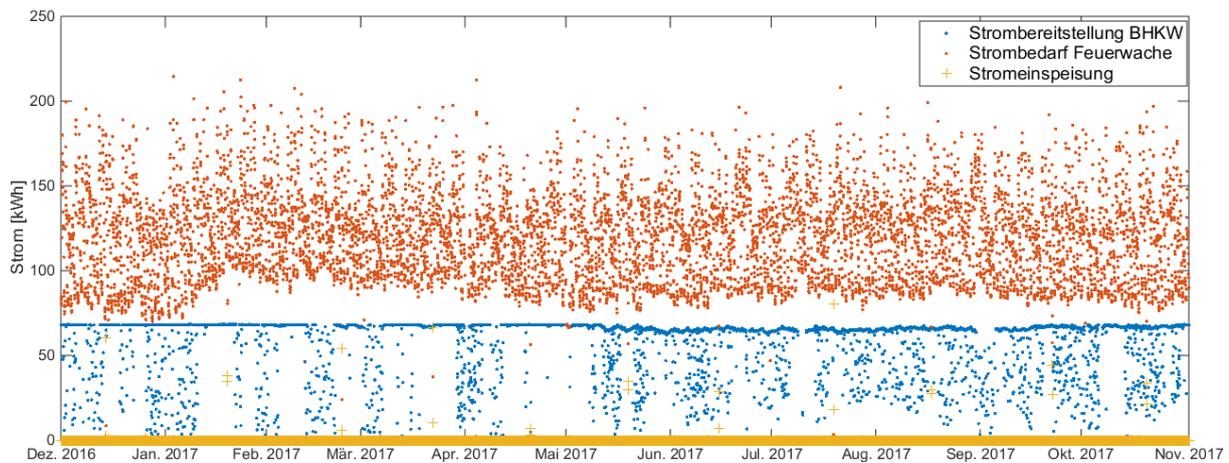


Abbildung 10: Stundenwerte der Strombereitstellung des BHKW (blau), des Strombedarfs der Feuerwache (rot) und der Stromeinspeisung ins Verteilnetz (gelb).

### 5.1.2 Gasverbrauch

Abbildung 11 zeigt den monatlichen Gasverbrauch des BHKW (blau), des Brennwertkessels (rot) und der Feuerwache Krefeld insgesamt (violett). Die Feuerwache Krefeld verbraucht im Monat zwischen 150.000 kWh und 250.000 kWh Gas, das BHKW verbraucht davon zwischen 115.000 kWh und 165.000 kWh und der Brennwertkessel bis

zu 130.000 kWh. Die Nullwerte in den Monaten Mai bis Juli ergeben sich nur deshalb, da in diesen Monaten Verbrauchswerte für Gas fehlen, da der Datensatz nicht vollständig ist. Im Abschnitt 5.1.4 sieht man, dass der Brennwertkessel, wenn auch mit sehr niedrigen Wärmemengen, in diesen Monaten in Betrieb war.

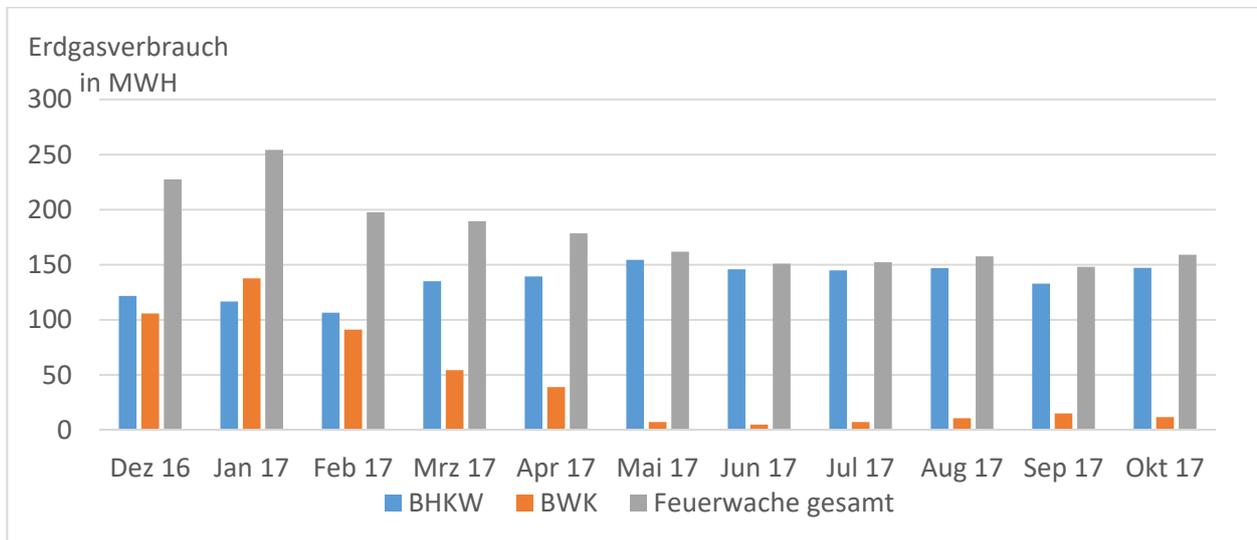


Abbildung 11: Monatlicher Gasverbrauch des BHKW (blau), des Brennwertkessels (orange) und der Feuerwache Krefeld insgesamt (grau)

Der Anteil des BHKW am Gasverbrauch liegt somit je nach Monat zwischen 46 % und 97 %. In Tabelle 6 sind die monatlichen Gasverbräuche aufgeführt. Abbildung 12 zeigt die Stundenwerte des Erdgasverbrauchs des BHKW, des Brennwertkessels und der Feuerwache insgesamt.

Tabelle 6: Monatlicher Gasverbrauch des BHKW, des Brennwertkessels und der Feuerwache Krefeld insgesamt, sowie der Anteil des BHKW am monatlichen Gasverbrauch

	BHKW Verbrauch in MWh	BWK Verbrauch in MWh	Feuerwache Verbrauch in MWh
Dez 16	122	106	228
Jan 17	117	138	254
Feb 17	106	91	198
Mrz 17	135	54	189
Apr 17	139	39	178
Mai 17	155	7	162
Jun 17	146	5	151
Jul 17	145	7	152
Aug 17	147	11	158
Sep 17	133	15	148
Okt 17	147	12	159

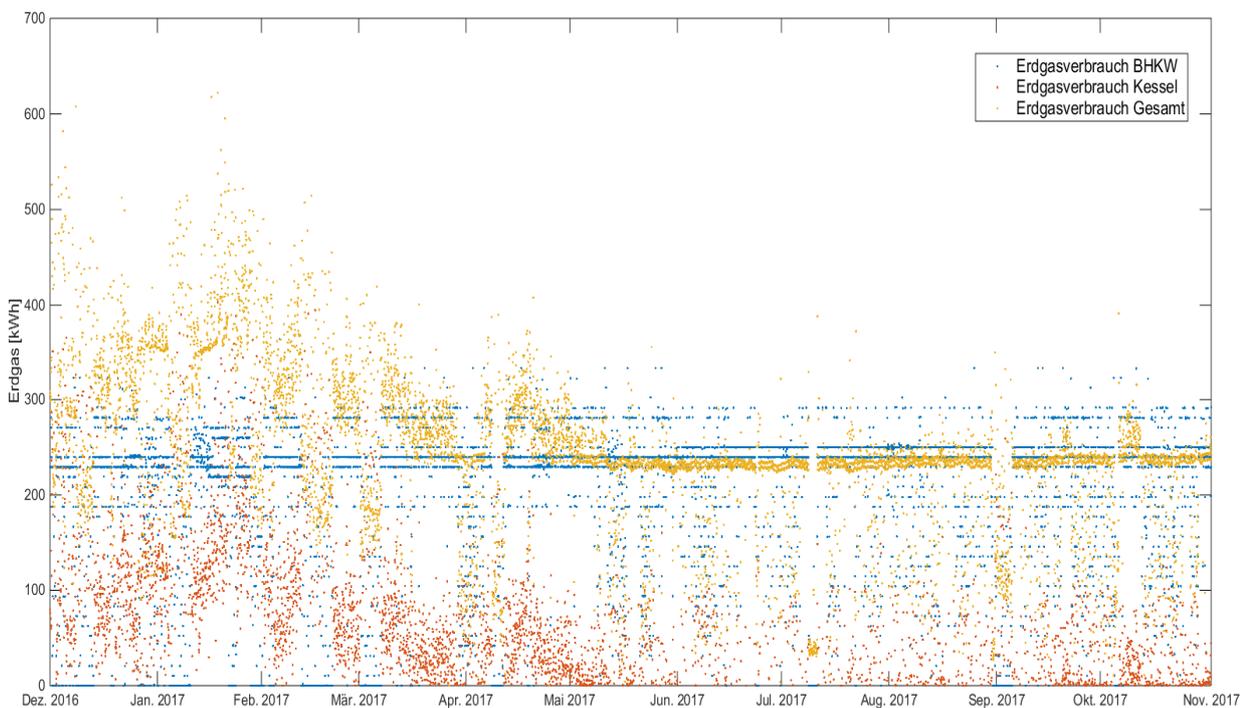


Abbildung 12: Stundenwerte des Erdgasverbrauchs des BHKW (blau), des Brennwertkessels (rot) und der Feuerwache insgesamt (gelb).

### 5.1.3 Kältebilanz

Abbildung 13 zeigt die monatliche Kältemenge der AKM zur Kühlung des Serverraums und Klimatisierung der Feuerwache Krefeld. In den Wintermonaten liegt der Kältebedarf

bei ca. 9.000 kWh und steigt in den Sommermonaten auf bis zu 32.000 kWh an. In der Tabelle 7 sind die Werte der monatlichen Kältebereitstellung aufgeführt.

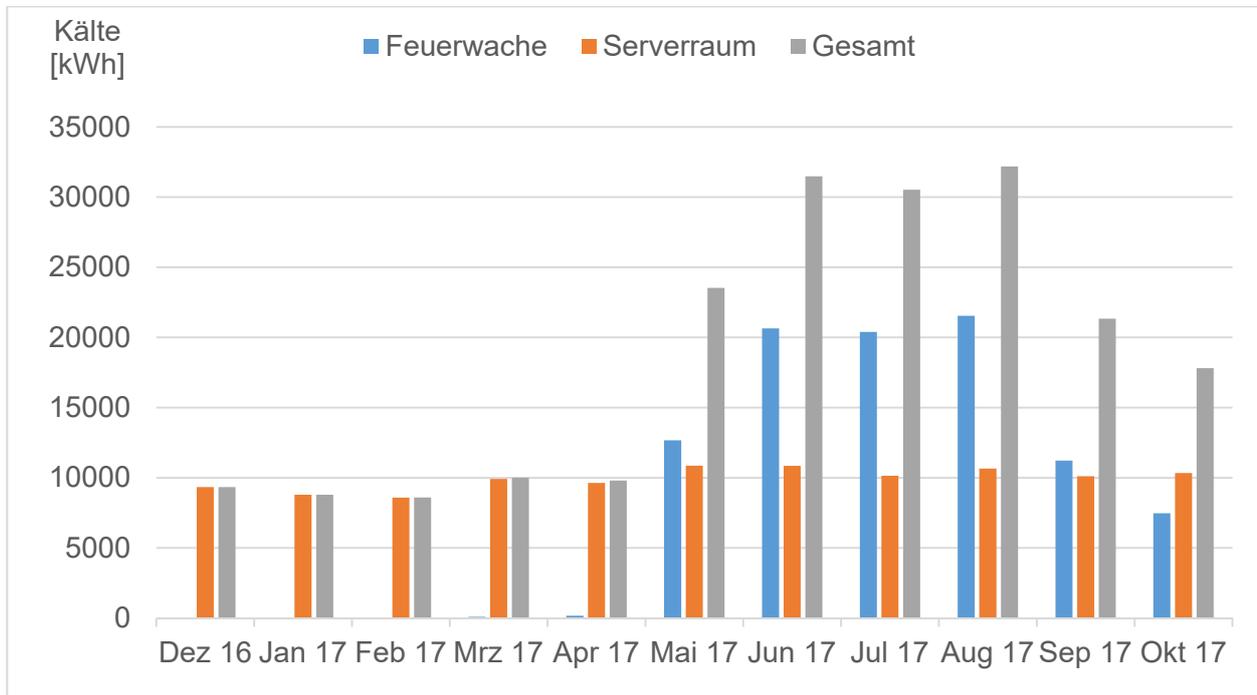


Abbildung 13: Monatliche Kältebedarf zur Kühlung des Serverraums (orange), zur Klimatisierung der Feuerwache Krefeld (blau) und der gesamte Kältebedarf (grau)

Tabelle 7: Monatliche Kältebereitstellung der AKM zur Kühlung des Serverraums und Klimatisierung der Feuerwache Krefeld

Monat	Feuerwache [kWh]	Serverraum [kWh]	Gesamt [kWh]
Dez 16	0	9330	9330
Jan 17	1	8790	8791
Feb 17	10	8580	8590
Mrz 17	90	9910	10000
Apr 17	169	9630	9799
Mai 17	12672	10860	23532
Jun 17	20637	10850	31487
Jul 17	20392	10140	30532
Aug 17	21535	10650	32185
Sep 17	11220	10110	21330
Okt 17	7473	10332	17805

#### 5.1.4 Wärmebilanz

In Tabelle 8 sind die monatlichen Wärmemengen aufgeführt. Abbildung 14 zeigt die monatliche Wärmebereitstellung des BHKW (blau), des Brennwertkessels (rot) und die Summe aus beiden Anlagen (grau).

Tabelle 8: Monatliche Wärmebereitstellung des BHKW, des Brennwertkessels und die Summe aus beiden Anlagen, sowie der Anteil des BHKW an der monatlichen Wärmemenge

Monat	BHKW [kWh]	Brennwertkessel [kWh]	Gesamt [kWh]	Anteil BHKW [%]
Dez 16	62.400	85.200	147.600	42%
Jan 17	59.500	113.275	172.775	34%
Feb 17	53.700	74.800	128.500	42%
Mrz 17	68.000	43.500	111.500	61%
Apr 17	70.600	28.500	99.100	71%
Mai 17	77.800	4.525	82.325	95%
Jun 17	73.000	5.400	78.400	93%
Jul 17	72.600	7.300	79.900	91%
Aug 17	73.700	9.400	83.100	89%
Sep 17	66.300	12.300	78.600	84%
Okt 17	73.800	7.925	81.725	90%

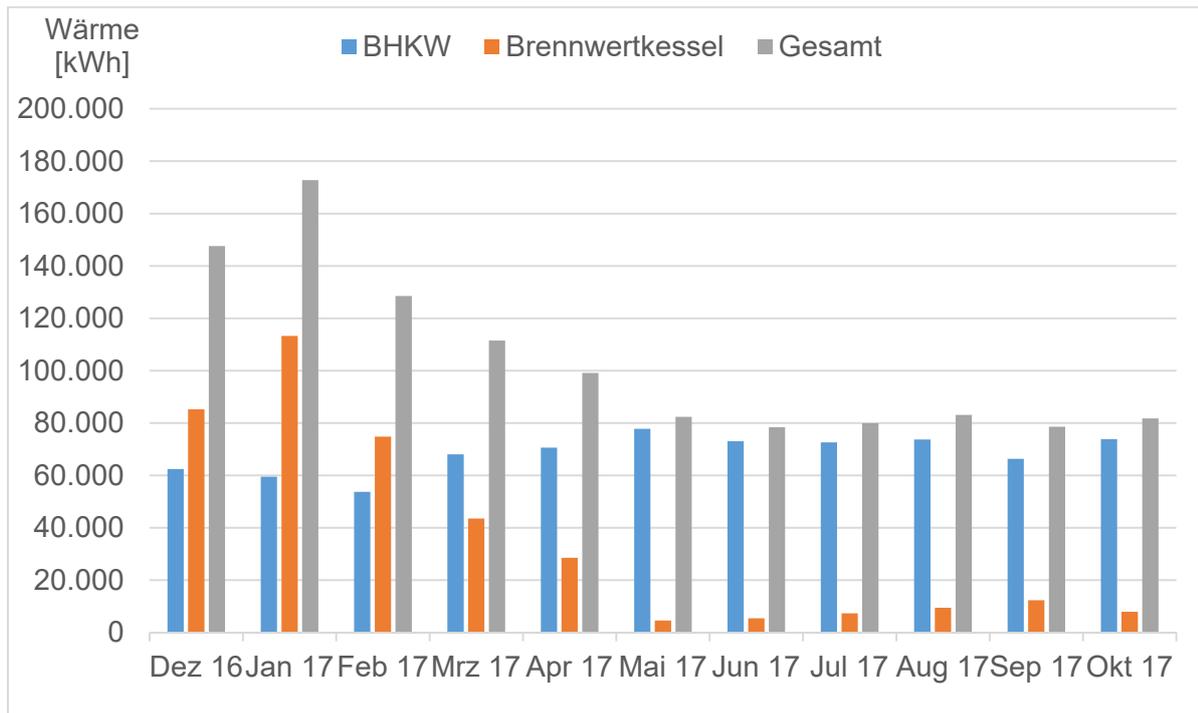


Abbildung 14: Monatliche Wärmebereitstellung des BHKW (blau), des Brennwertkessels (orange) und die Summe aus beiden Anlagen (grau)

Insgesamt wird im Monat zwischen 80.000 kWh und 150.000 kWh Wärme bereitgestellt, das BHKW stellt davon zwischen 53.000 kWh und 77.000 kWh bereit, der Brennwertkessel zwischen 5.000 kWh und 113.000 kWh. Somit hat das BHKW je nach Monat einen Anteil von 30 % bis 95 % an der Wärmebereitstellung. Abbildung 15 zeigt die Tageswerte der Wärmebereitstellung des BHKW, des Kessels und des Wärmeverbrauchs der Feuerwache. Es ist deutlich zu erkennen, an welchen Tagen das BHKW nur zeitweise gelaufen ist. Zudem ist zu erkennen, dass das BHKW sehr gleichmäßig auf Vollast (116 kW) betrieben wird. Die Linie des BWK schwankt deutlich mehr, was seine Funktion als Ausgleichskessel für Spitzenlastsituationen untermauert.

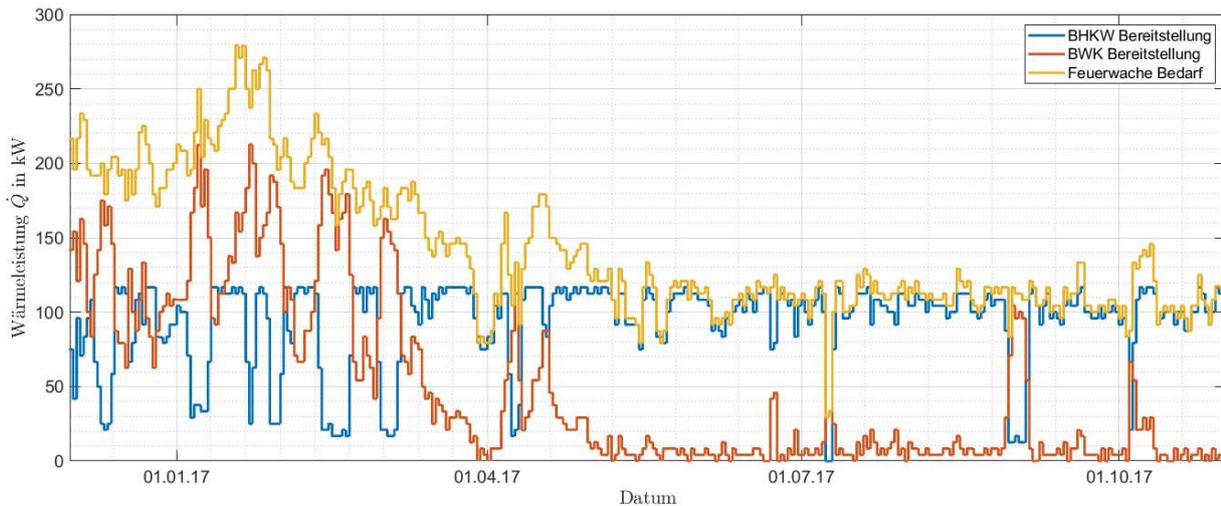


Abbildung 15: Gemittelte Tageswerte der Wärmebereitstellung des BHKW (blau), des Kessels (rot) und des Wärmeverbrauchs der Feuerwache (gelb)

Abbildung 16 zeigt die Wärmeleistungen zur Raumwärme- und Warmwasserversorgung der Feuerwache Krefeld zum Betrieb der AKM und die Summe der beiden Leistungen. Insgesamt werden im Monat zwischen 60.000 kWh und 170.000 kWh Wärme benötigt, davon zwischen 8.000 kWh und 165.000 kWh für die Raumwärme- und Warmwasserversorgung und zwischen 5.000 kWh und 56.000 kWh zum Betrieb der AKM. Somit liegt der Anteil der Wärmeleistung zum Betrieb der AKM zwischen 3 % und 87 %. Abbildung 17 zeigt die Stundenwerte des Wärmeverbrauchs der AKM, der Feuerwache zur Warmwasser- und Raumwärmeversorgung und der Feuerwache insgesamt.

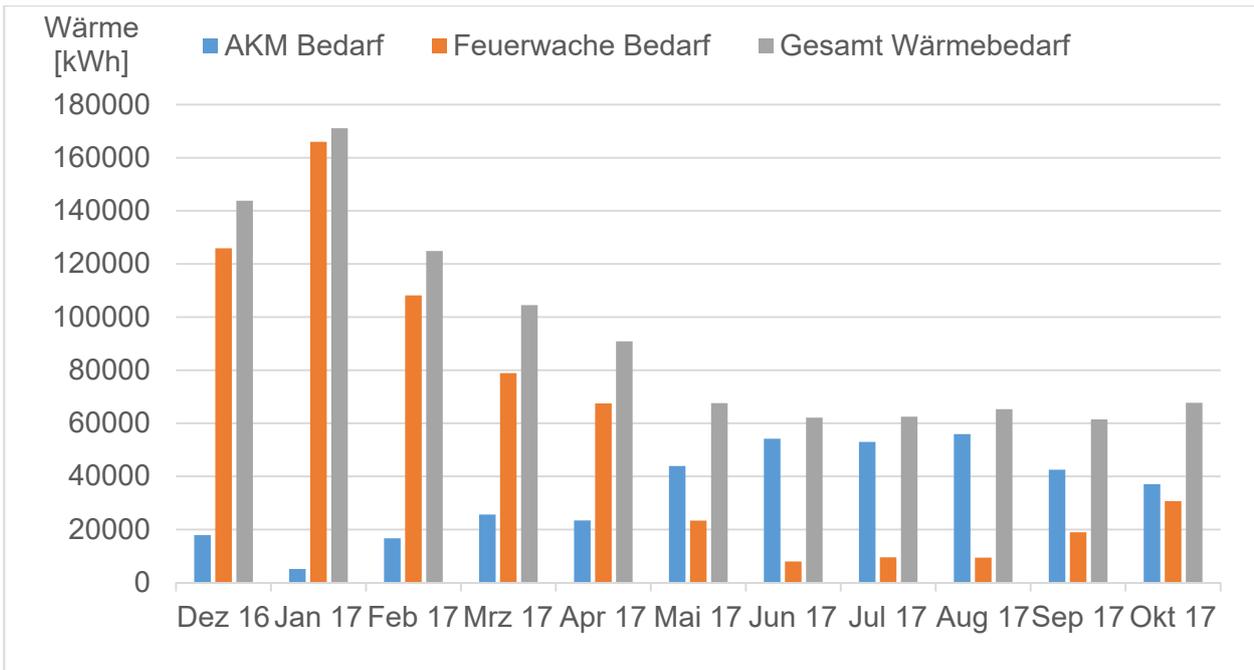


Abbildung 16: Monatliche Wärmemenge zur Raumwärme- und Warmwasserversorgung der Feuerwache Krefeld (orange), zum Betrieb der AKM (blau) und die Summe der beiden Leistungen (grau)

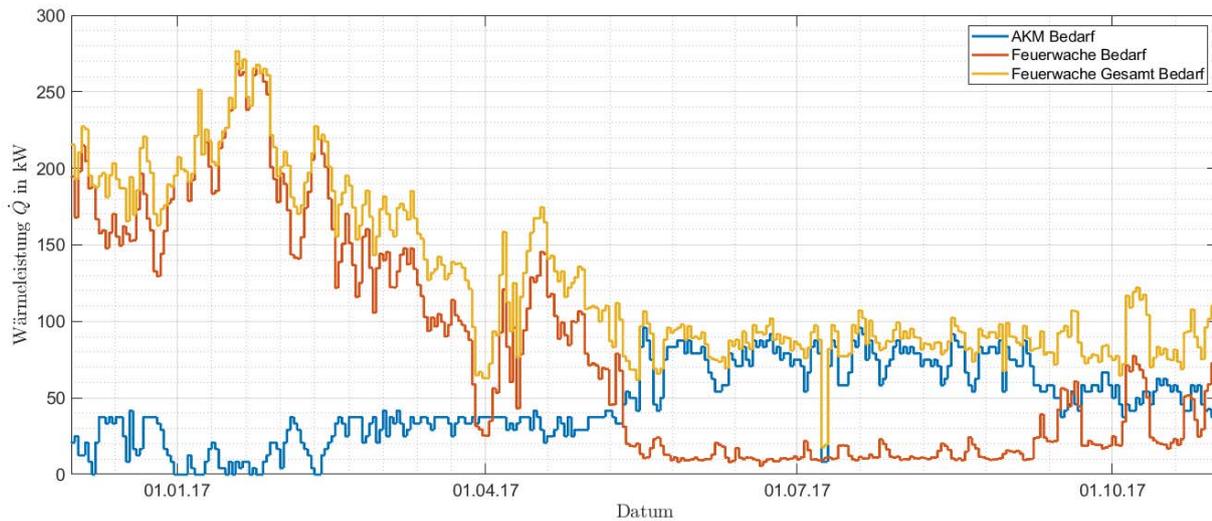


Abbildung 17: Stundenwerte des Wärmeverbrauchs der AKM (blau), der Feuerwache zur Warmwasser- und Raumwärmeversorgung (rot) und der Feuerwache insgesamt (gelb).

### 5.1.5 Wärmebilanz des Versorgungssystems Variante 1 mit KKM

In der Variante 1 wird die Betriebsweise des BHKW über den Wärmebedarf angepasst. Der Wärmebedarf sinkt in jedem Monat um den Bedarf der AKM aus dem aktuellen Versorgungssystem, da diese durch die KKM ersetzt wird. Die daraus resultierenden Ergebnisse für die Wärmebilanz sind in Tabelle 9 und Abbildung 18 dargestellt.

Tabelle 9: Wärmebilanz des simulierten Versorgungssystem mit KKM (Variante 1)

Monat	Wärmebedarf Feuerwache [kWh]	Wärmebereitstellung BHKW [kWh]	Wärmebereitstellung BWK [kWh]	Anteil BHKW
Dez 16	129.700	77.057	52643	59%
Jan 17	167.675	77.057	90618	46%
Feb 17	111.800	69.600	42204	62%
Mrz 17	85.900	71.889	14021	84%
Apr 17	75.700	67.032	8968	89%
Mai 17	38.425	38.129	0	99%
Jun 17	24.200	24.296	0	100%
Jul 17	26.900	27.100	0	101%
Aug 17	27.200	26.900	0	99%
Sep 17	36.100	36.104	0	100%
Okt 17	44.700	44.696	0	100%

Differenzen zwischen dem Wärmebedarf und der Wärmebereitstellung sind im Speicher enthalten und werden an dieser Stelle nicht aufgezeigt

Wie in Abbildung 18 zusehen erfolgt die Wärmeversorgung der Feuerwache ab dem Monat Mai nur noch über das BHKW. In den Monaten Dezember bis April produziert das BHKW ziemlich konstant 67.000 bis 77.000 kWh Wärme. Ab dem Monat Mai sinkt der Wärmebedarf der Feuerwache und somit auch die Wärmebereitstellung durch das BHKW. In den Monaten Mai bis Oktober produziert das BHKW zwischen 44.000 und 27.000 kWh pro Monat.

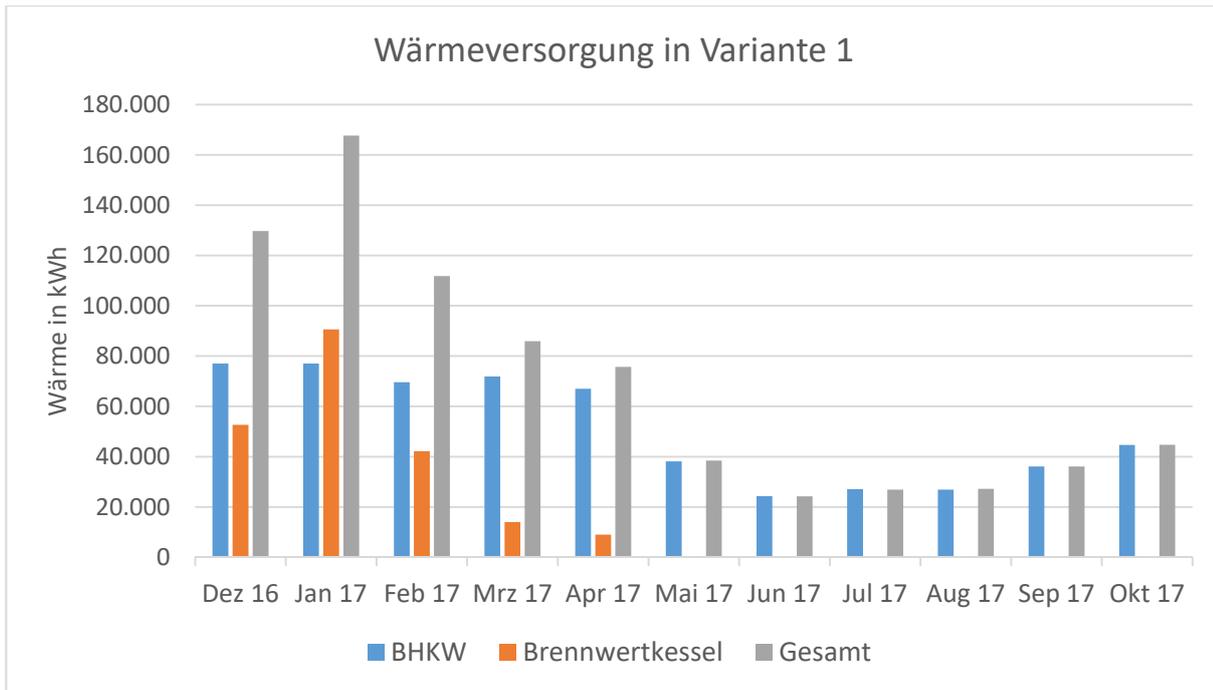


Abbildung 18: Wärmebereitstellung und -bedarf in der Variante 1

## 5.2 Kennzahlen aller Versorgungsvarianten

Die Ergebnisse der Kennzahlenuntersuchung der verschiedenen Versorgungsvarianten werden aufgeführt und mit der aktuellen Versorgungsvariante verglichen. Die aktuelle Versorgungsvariante wurde als Grundlage für die Analyse der in Kapitel 4.4 beschriebenen Versorgungsvarianten verwendet. Die Analysen zeigen auf, wie sich eine andere Konzeptionierung der Wärme- und Kälteversorgung auf bestimmte Verbrauchsdaten und Kennzahlen auswirkt. Die technischen Daten (Herstellerangaben) der Anlagen sind in Tabelle 10 aufgeführt.

Tabelle 10: Nennwerte der Versorgungsanlagen

<b>BHKW</b>		
BHKW-Nennwerte	Werte	Einheit
elektrische Leistung	70	kW
thermische Leistung	115	kW
elektrischer Nennwirkungsgrad	34	%
thermischer Nennwirkungsgrad	56	%
Gesamtwirkungsgrad	91	%
Stromkennzahl	61	%
<b>Brennwert-Heizkessel</b>		
BWK-Nennwerte	Werte	Einheit
thermische Leistung	460	kW
th. Wirkungsgrad	0,98	
<b>AKM</b>		
AKM-Nennwerte	Werte	Einheit
th. Leistung	116	kW
Nennwärmeverhältnis (COP)	0,70	
<b>KKM</b>		
KKM-Nennwerte	Werte	Einheit
th. Leistung	116	kW
Nennleistungszahl (COP)	3,00	

### 5.2.1 Aktuelles Versorgungssystem

Die Ergebnisse der Verbrauchs- und Kennzahlenanalyse des aktuellen Versorgungssystems werden in Tabelle 11 dargestellt. Das aktuelle Versorgungssystem ist das Referenzsystem für den Vergleich mit den alternativen Varianten.

Tabelle 11: Übersicht Verbrauchsdaten und Kennzahlen des aktuellen Versorgungssystems

<b>aktuelles Versorgungssystem</b>		
Allg. Daten Feuerwache	Werte	Einheit
Erdgasverbrauch	1.977	MWh
Stromverbrauch	954	MWh
Netzbezug Strom	520	MWh
Wärmebedarf	1.144	MWh
Primärenergieverbrauch Strom	937	MWh
Primärenergieverbrauch Erdgas	2.175	MWh
Primärenergieverbrauch gesamt	3.112	MWh
CO <sub>2</sub> -Emissionen Strom	256	t
CO <sub>2</sub> -Emissionen Erdgas	397	t
CO <sub>2</sub> -Emissionen	653	t
<b>BHKW</b>		
Produktions-/Verbrauchsdaten	Werte	Einheit
Erdgasverbrauch	1.492	MWh / Periode
Strombereitstellung	435	MWh / Periode
Eigenverbrauch FW	434	MWh / Periode
Einspeisung	682	kWh / Periode
Wärmebereitstellung	751	MWh / Periode
BHKW Berechnung	Werte	Einheit
el. Wirkungsgrad	0,29	
th. Wirkungsgrad	0,50	
Gesamtwirkungsgrad	0,80	
Stromkennzahl	0,58	
Volllaststunden	6.534	h / Periode
Auslastung	81	%
<b>Brennwert-Heizkessel</b>		
Produktions-/Verbrauchsdaten	Werte	Einheit
Erdgasverbrauch	486	MWh / Periode
Wärmebereitstellung	392	MWh / Periode
BWK Berechnung	Werte	Einheit
th. Wirkungsgrad	0,81	
Volllaststunden	852	h / Periode
Auslastung	11	%
<b>AKM</b>		
Produktions-/Verbrauchsdaten	Werte	Einheit
Wärmeverbrauch	375	MWh / Periode
Kältebereitstellung	203	MWh / Periode
AKM Berechnung	Werte	Einheit
COP	0,54	
Volllaststunden	1.753	h / Periode
Auslastung	22	%

Das aktuelle Versorgungssystem hat im Betrachtungszeitraum einen Primärenergieverbrauch von insgesamt 3.112 MWh. Auf den Strombezug aus dem Versorgungsnetz entfallen 937 MWh und auf den Erdgasverbrauch 2.175 MWh. Das System verursacht CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 653 t pro Periode (11 Monate). Auf den Strom entfallen davon 256 t und auf den Erdgasverbrauch 397 t. Das BHKW stellt im Betrachtungszeitraum 435 MWh Strom bereit und 751 MWh Wärme, wovon etwa die Hälfte zum Betrieb der AKM genutzt wird. Im Mittel besitzt das BHKW eine Stromkennzahl von 0,58. Der thermische Wirkungsgrad beträgt im Mittel 0,5 und der elektrische Wirkungsgrad 0,29. Die genannten Kennwerte liegen deutlich unter den in Tabelle 10 aufgeführten Herstellerangaben. Das BHKW weist 6.534 Volllaststunden auf. Dies entspricht einer Auslastung von 81 % im Betrachtungszeitraum.

Der Brennwert-Heizkessel stellt im Betrachtungszeitraum 392 MWh Wärme bereit mit einem Wirkungsgrad von im Mittel 0,81. Der Wirkungsgrad weicht somit ebenfalls deutlich, nämlich um 19% vom Nennwirkungsgrad 0,98 ab. Der BWK weist 852 Volllaststunden auf. Diese entsprechen einer Auslastung von 11 %. Die AKM versorgt die Feuerwache mit 203 MWh Kälte mit einer mittleren Leistungszahl (COP) von 0,54. Auch hier ergibt sich eine Abweichung von 23% vom Nennwärmeverhältnis (COP) 0,7. Die AKM weist 1.753 Volllaststunden aus. Diese entsprechen einer Auslastung von 22 %.

### 5.2.2 Variante 1

Die Ergebnisse der Variante 1 des Versorgungssystems sind in Tabelle 12 aufgezeigt. In der Variante 1 wurde die AKM durch eine KKM ersetzt und die Verbrauchsdaten dementsprechend angepasst.

Tabelle 12: Ergebnisse der Variante 1 - BHKW und KKM

<b>Variante 1: Versorgungssystem mit KKM, BHKW und BWK</b>				
<b>Allg. Daten Feuerwache</b>	<b>Werte</b>	<b>Einheit</b>	<b>Abweichung</b>	
Erdgasverbrauch	1.370	MWh	-31%	
Stromverbrauch	1.022	MWh	7%	
Netzbezug Strom	698	MWh	34%	
Wärmebedarf	768	MWh	-33%	
Primärenergieverbrauch Strom	1.257	MWh	34%	
Primärenergieverbrauch Erdgas	1.507	MWh	-31%	
Primärenergieverbrauch Gesamt	2.764	MWh	-11%	
CO <sub>2</sub> -Emissionen Strom	343	t	34%	
CO <sub>2</sub> -Emissionen Erdgas	275	t	-31%	
CO <sub>2</sub> -Emissionen	618	t	-5%	
<b>BHKW</b>				
<b>Produktions-/Verbrauchsdaten</b>	<b>Werte</b>	<b>Einheit</b>	<b>Abweichung</b>	
Erdgasverbrauch	1.111	MWh		
Strombereitstellung	324	MWh		
Eigenverbrauch FW	324	MWh	-25%	
Einspeisung	0	MWh	-100%	
Wärmebereitstellung	560	MWh		
<b>BHKW-Berechnung</b>	<b>Werte</b>	<b>Einheit</b>	<b>Abweichung</b>	
el. Wirkungsgrad	0,29			
th. Wirkungsgrad	0,50			
Gesamtwirkungsgrad	0,80			
Stromkennzahl	0,58			
Volllaststunden	4.868	h		
Auslastung	61	%		
<b>Brennwert-Heizkessel</b>				
<b>Produktions-/Verbrauchsdaten</b>	<b>Werte</b>	<b>Einheit</b>	<b>Abweichung</b>	
Erdgasverbrauch	258	MWh	-47%	
Wärmebereitstellung	208	MWh	-47%	
<b>BWK-Berechnung</b>	<b>Werte</b>	<b>Einheit</b>	<b>Abweichung</b>	
th. Wirkungsgrad	0,81			
Volllaststunden	453	h	-47%	
Auslastung	5,6	%	-47%	
<b>KKM</b>				
<b>Produktions-/Verbrauchsdaten</b>	<b>Werte</b>	<b>Einheit</b>	<b>Abweichung</b>	
Stromverbrauch	68	MWh		
Kältebereitstellung	203	MWh		
<b>KKM-Berechnung</b>	<b>Werte</b>	<b>Einheit</b>	<b>Abweichung</b>	
COP Rechn	3,00			
Volllaststunden	1.753	h		
Auslastung	22	%		

Im Vergleich zum aktuellen Versorgungssystem (Referenzsystem, Abschnitt 5.2.1) sinkt durch den Betrieb der KKM und durch die neuen Betriebsweisen des BHKW und des BWK der Erdgasverbrauch der Feuerwache um 31%. Allerdings steigt der Stromverbrauch der Feuerwache um 7%. Dies führt, trotz der schlechteren ökologischen Bewertung von Strom, zu einer Reduzierung des Primärenergieverbrauchs um 11% und einer Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 5%.

Der Einsatz der KKM führt dazu, dass das BHKW 25% weniger Volllaststunden aufweist. Die Produktionswerte, der Erdgasverbrauch und die Auslastung sinken dementsprechend auch um 25%. Der Einsatz des BWK verringert sich um 47%. Dies führt zu den gleichen Auswirkungen wie beim BHKW. Die KKM verbraucht 68 MWh pro Periode. Dadurch, dass sie der AKM nachempfunden ist, ist das Betriebsverhalten der beiden Anlagen gleich.

### 5.2.3 Variante 2

In Variante 2 wurde untersucht, wie das Versorgungssystem in der konventionellen Betriebsweise von BWK und KKM aussehen würde. Die Ergebnisse dieser Versorgungsvariante sind in Tabelle 13 zu finden.

Tabelle 13: Ergebnisse der Versorgungsvariante 2 - BWK und KKM

<b>Variante 2: BWK &amp; KKM</b>				
<b>Allg. Daten Feuerwache</b>	<b>Werte</b>	<b>Einheit</b>	<b>Abweichung</b>	
Erdgasverbrauch	952	MWh	-52%	
Stromverbrauch	1.022	MWh	7%	
Netzbezug Strom	1.022	MWh	96%	
Wärmebedarf	768	MWh	-33%	
Primärenergieverbrauch Strom	1.840	MWh	96%	
Primärenergieverbrauch Erdgas	1.047	MWh	-52%	
Primärenergieverbrauch gesamt	2.887	MWh	-7%	
CO <sub>2</sub> -Emissionen Strom	502	t	96%	
CO <sub>2</sub> -Emissionen Erdgas	191	t	-52%	
CO <sub>2</sub> -Emissionen	693	t	6%	
<b>BWK</b>				
<b>Produktions-/Verbrauchsdaten</b>	<b>Werte</b>	<b>Einheit</b>	<b>Abweichung</b>	
Erdgasverbrauch	952	MWh	96%	
Wärmebereitstellung	768	MWh	96%	
<b>BWK-Berechnung</b>	<b>Werte</b>	<b>Einheit</b>	<b>Abweichung</b>	
th. Wirkungsgrad	0,81			
Volllaststunden	1.670	h	96%	
Auslastung	21	%	96%	
<b>KKM</b>				
<b>Produktions-/Verbrauchsdaten</b>	<b>Werte</b>	<b>Einheit</b>	<b>Abweichung</b>	
Stromverbrauch	68	MWh		
Kältebereitstellung	203	MWh		
<b>KKM-Berechnung</b>	<b>Werte</b>	<b>Einheit</b>	<b>Abweichung</b>	
COP	3,0			
Volllaststunden	1.753	h		
Auslastung	0,22			

In der Variante 2 führt der Wegfall des BHKW dazu, dass der Erdgasverbrauch um 52% reduziert wird. Wie zuvor steigt der Stromverbrauch durch die KKM um 7% im Vergleich mit der aktuellen Versorgungsvariante. Der Primärenergieverbrauch ist um 7% niedriger als der des Referenzsystems, allerdings sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 6% gestiegen. Dies zeigt, dass der Bezug von Strom aus dem Netz einen größeren Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen hat. Der Rückgang des Erdgasverbrauchs zeigt sich im Rückgang des Primärenergieverbrauchs.

Der BWK deckt nun den gesamten Wärmebedarf der Feuerwache. Dadurch steigt sein Erdgasverbrauch um 96%, was einer Verdopplung entspricht. Auch seine Volllaststunden und seine Auslastung verdoppeln sich dementsprechend.

### 5.2.4 Variante 3

In dieser Variante wurde analysiert, wie das aktuelle Versorgungssystem ohne BHKW aussähe. Die Ergebnisse dieser Variante sind in Tabelle 14 zu finden.

Tabelle 14: Ergebnisse der Variante 3 - BWK und AKM

<b>Variante 3: Versorgungssystem mit BWK und AKM</b>			
<b>Allg. Daten Feuerwache</b>	<b>Werte</b>	<b>Einheit</b>	<b>Abweichung</b>
Erdgasverbrauch	1.417	MWh	-28%
Stromverbrauch	954	MWh	
Netzbezug Strom	954	MWh	83%
Wärmebedarf	1.144	MWh	
Primärenergieverbrauch Strom	1.718	MWh	83%
Primärenergieverbrauch Erdgas	1.559	MWh	-28%
Primärenergieverbrauch gesamt	3.276	MWh	5%
CO <sub>2</sub> -Emissionen Strom	469	t	83%
CO <sub>2</sub> -Emissionen Erdgas	285	t	-28%
CO <sub>2</sub> -Emissionen	753	t	15%
<b>BWK</b>			
<b>Produktions-/Verbrauchsdaten</b>	<b>Werte</b>	<b>Einheit</b>	<b>Abweichung</b>
Erdgasverbrauch	1.417	MWh / Periode	192%
Wärmebereitstellung	1.144	MWh / Periode	192%
<b>BWK-Berechnung</b>	<b>Werte</b>	<b>Einheit</b>	<b>Abweichung</b>
th. Wirkungsgrad	0,81		
Volllaststunden	2.486	h / Periode	192%
Auslastung	31	%	192%
<b>AKM</b>			
<b>Produktions-/Verbrauchsdaten</b>	<b>Werte</b>	<b>Einheit</b>	<b>Abweichung</b>
Wärmeverbrauch	375	MWh / Periode	
Kältebereitstellung	203	MWh / Periode	
<b>AKM-Berechnung</b>	<b>Werte</b>	<b>Einheit</b>	<b>Abweichung</b>
COP	0,54		
Volllaststunden	1.753	h / Periode	
Auslastung	22	%	

Im Vergleich mit der aktuellen Versorgungsvariante steigt in der Variante 4 der Primärenergieverbrauch um 5%. Die Reduzierung des Erdgasverbrauchs ist nicht mehr

ausreichend, um den Anstieg des Netzbezuges von Strom auszugleichen bzw. einen Rückgang des Primärenergieverbrauchs herbeizuführen. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen sind nun 15% höher als die des Referenzsystems.

Der Wärmebedarf der Variante 3 entspricht nun dem des Referenzsystems durch die Nutzung der AKM. Dadurch verdreifachen sich sowohl die Produktions- und Verbrauchswerte des BWK als auch die Volllaststunden und die Auslastung.

### 5.3 Wirtschaftliche Betrachtung der Varianten des Versorgungssystems

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden mittels der Annuitätenmethode die jährlichen Kosten eines Versorgungssystems über den Betrachtungszeitraum berechnet. Anschließend wurden die Parameter Preisänderung, Investitionskosten und Zinssatz einer Sensitivitätsanalyse (siehe Abschnitt 4.3.6) unterzogen.

#### 5.3.1 Auswertung Annuitätenmethode

Die Grundwerte, die für die Berechnung angenommen wurden, sind in der Tabelle 4 im Kapitel 4.3.5 aufgeführt worden. In der Tabelle 15 sind Daten und Zwischenergebnisse aufgeführt, die innerhalb der Betrachtung konstant bleiben.

Tabelle 15: Konstante Werte und Zwischenergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

<b>BHKW</b>			
kapitalgebundene Kosten	Werte	Einheit	Bemerkung
spez. Investitionskosten	1.316	€ / kWel	
Investitionskosten	92.153	€	
Einbindungskosten	12.767	€	
Gesamtinvestitionskosten	104.920	€	
<b>betriebsgebundene Kosten</b>			
Werte	Einheit	Bemerkung	
spez. Wartungskosten	2,0	ct / kWh	je kWh-elektrisch
Wartungskosten akt. Versorgungssystem	8.696	€	
Wartungskosten Variante 1	6.479	€	-25%, s. Text
<b>BWK</b>			
kapitalgebundene Kosten	Werte	Einheit	Bemerkung
Investitionskosten	32.528	€	
<b>betriebsgebundene Kosten</b>			
Werte	Einheit	Bemerkung	
spez. Wartungskosten	2,0	%	von Invest.
Wartungskosten	651	€	
<b>AKM</b>			
kapitalgebundene Kosten	Werte	Einheit	Bemerkung
spez. Investitionskosten	1.194	€ / kW	
Investitionskosten	138.480	€	
<b>betriebsgebundene Kosten</b>			
Werte	Einheit	Bemerkung	
spez. Wartungskosten	1,0	%	von Invest.
Wartungskosten	1.385	€	
<b>KKM</b>			
kapitalgebundene Kosten	Werte	Einheit	Bemerkung
spez. Investitionskosten	377	€ / kW	
Investitionskosten	43.750	€	
<b>betriebsgebundene Kosten</b>			
Werte	Einheit	Bemerkung	
spez. Wartungskosten	4,0	%	von Invest.
Wartungskosten	1.750	€	

In der Tabelle 15 macht sich die geänderte Betriebsweise des BHKW bei dessen Wartungskosten bemerkbar, weil sie von der produzierten Strommenge abhängen. In der Variante 1 sinken diese daher um ca. 25% oder 2.200 € (vgl. Tabelle 12 und Tabelle 15).

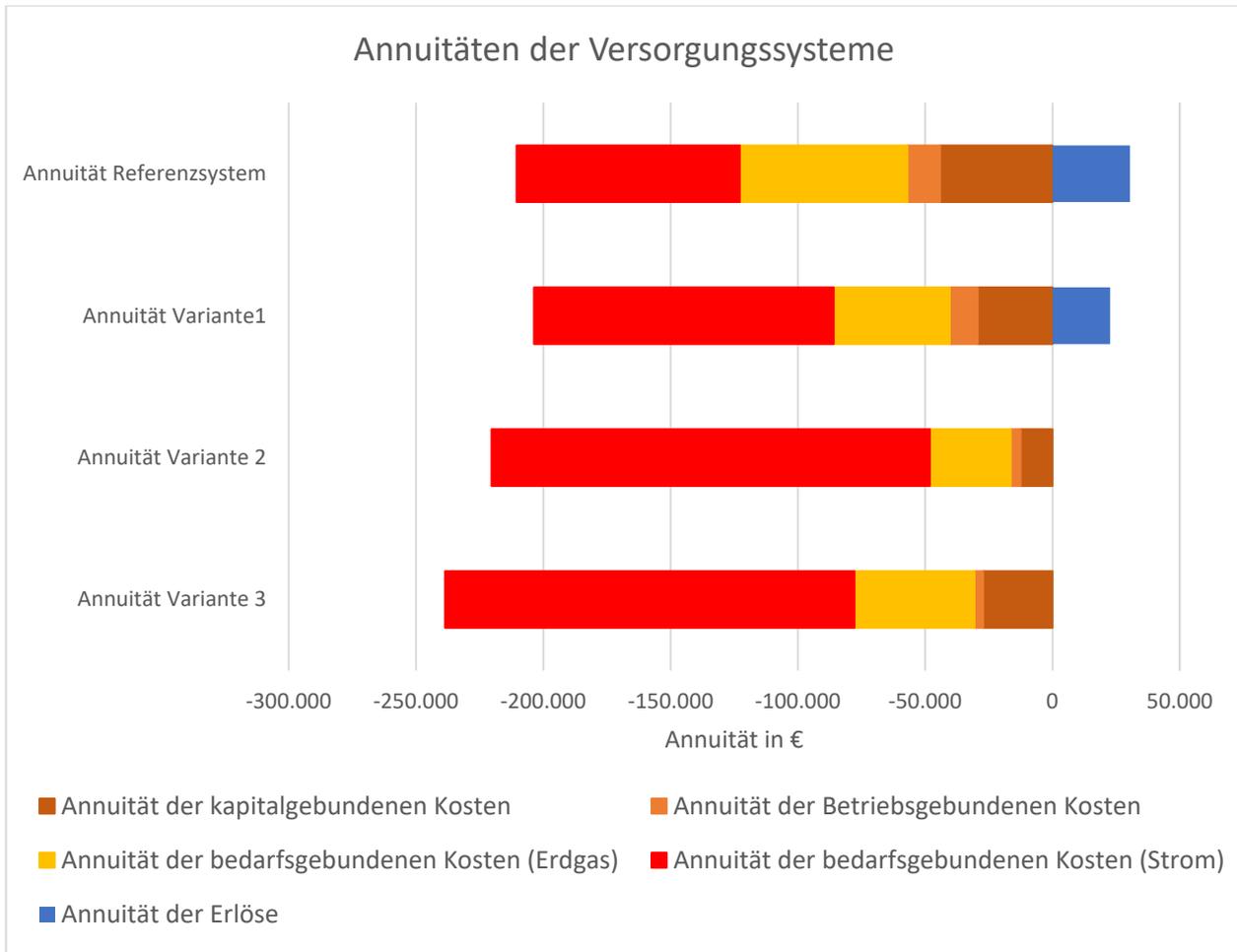


Abbildung 19: jährliche Kosten (Annuitäten) der jeweiligen Variante des Versorgungssystems

Abbildung 19 und Tabelle 16 zeigen die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung. Es zeigt sich, dass die verbrauchsgebundenen Kosten, d.h. die Energiekosten, des jeweiligen Systems den größten Anteil an den Gesamtkosten haben. Es ist auch zu erkennen, dass in den Systemen mit AKM (Referenzsystem und Variante 3) die Kapitalkosten höher sind als in den Systemvarianten 1 und 2, in denen die AKM jeweils durch eine in der Anschaffung günstigere KKM ersetzt wird. In den Systemen mit KKM sind dafür jeweils die verbrauchsgebundenen Kosten höher. Es ist zu beachten, dass die Erlöse noch von den Kosten abgezogen werden. Dies macht deutlich, dass die Nutzung des BHKW (Referenzsystem und Variante 1 und 2) den größten Einfluss auf die Gesamtkosten hat. Die Erlöse im Referenzsystem fallen deutlich höher aus als in der Variante 1.

Tabelle 16: Jährliche Kosten (Annuitäten) der jeweiligen Variante des Versorgungssystems

	<i>Annuität Referenzsystem</i>	<i>Annuität Variante 1</i>	<i>Annuität Variante 2</i>	<i>Annuität Variante 3</i>
<i>Annuität der kapitalgebundenen Kosten</i>				
<i>BHKW</i>	-11.720	-11.720	0	0
<i>BWK</i>	-3.462	-3.462	-3.462	-3.462
<i>AKM</i>	-14.737	0	0	-14.737
<i>KKM</i>	0	-4.887	-4.887	0
<i>Annuität der betriebsgebundenen Kosten</i>				
<i>BHKW</i>	-9.484	-7.066	0	0
<i>BWK</i>	-710	-710	-710	-710
<i>AKM</i>	-1.510	0	0	-1.510
<i>KKM</i>	0	-1.909	-1.909	0
<i>Annuität der verbrauchsgebundenen Kosten</i>				
<i>BHKW</i>	-49.644	-36.989	0	0
<i>BWK</i>	-16.171	-8.596	-31.684	-47.157
<i>Netzbezug</i>	-87.705	-117.678	-172.231	-160.806
<i>Annuität der Erlöse</i>				
<i>BHKW</i>	30.391	22.629	0	0
<i>Gesamtannuität</i>				
<i>Summe</i>	-164.752	-170.389	-214.882	-228.383

Das wirtschaftlichste System ist das aktuelle Versorgungssystem mit BHKW, BWK und AKM. Trotz der hohen Kosten des aktuellen Versorgungssystems überwiegen die Erlöse, sodass die Variante 1 ca. 3% teurer ist als das aktuelle Versorgungssystem. In der Variante 1 kommt es zu niedrigeren Erlösen und einem höheren Netzbezug durch die geänderte Betriebsweise des BHKW. Dies ist auf die niedrigere Volllaststundenzahl des BHKW in der Variante 1 zurückzuführen. Am unwirtschaftlichen sind die Systeme ohne BHKW aufgrund der hohen Stromkosten.

### 5.3.2 Sensitivitätsanalyse

In der Abbildung 20 ist die Auswertung der Sensitivitätsanalyse (nach Abschnitt 4.3.6) des Referenzsystems und der Variante 1 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der in der Annuitätenmethode verwendete Zins  $i$  einen geringeren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit hat als die anderen Parameter „Preise“ und „Investitionskosten“. Die Zins-Graphen (rot und orange) schneiden sich jenseits der „+50%“, somit wird bei einer massiven Erhöhung

des Zinses (+50% entsprechen einem Zinssatz von 12%, siehe Abschnitt 4.3.5) die Variante 1 wirtschaftlicher.

Eine Änderung der Preisänderung hat deutlich stärkere Auswirkungen auf das Gesamtsystem (Steigung der grünen Graphen). Allerdings sind die beiden grünen Graphen nahezu parallel, sodass eine Änderung der Preisänderung die Wirtschaftlichkeit der Systeme relativ zueinander nicht verändert.

Auch die Änderung der Investitionskosten hat einen sehr hohen Einfluss auf die Gesamtannuität (Steigung blaue Graphen). Die beiden blauen Graphen treffen sich fast bei „+50%“, d.h. das System der Variante 1 wird jenseits der „+50%“ wirtschaftlicher.

Es ist noch anzumerken, dass im Referenzsystem die Investitionskosten den höchsten Einfluss auf die Gesamtannuität haben. Im System der Variante 1 hingegen hat die Preisänderung den größten Einfluss auf die Gesamtannuität.

Tabelle 17: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

<i>Annuitäten</i>	<i>Parameter</i>	<i>-50%</i>	<i>Basisfall</i>	<i>+50%</i>
<i>Referenzsystem</i>	Zins	-160.248	-164.752	-170.451
<i>Variante1</i>	Zins	-168.663	-170.389	-173.061
<i>Referenzsystem</i>	Preisänderungen	-152.187	-164.752	-178.895
<i>Variante1</i>	Preisänderungen	-158.182	-170.389	-184.001
<i>Referenzsystem</i>	Investitionskosten	-149.395	-164.752	-180.108
<i>Variante1</i>	Investitionskosten	-159.759	-170.389	-181.020

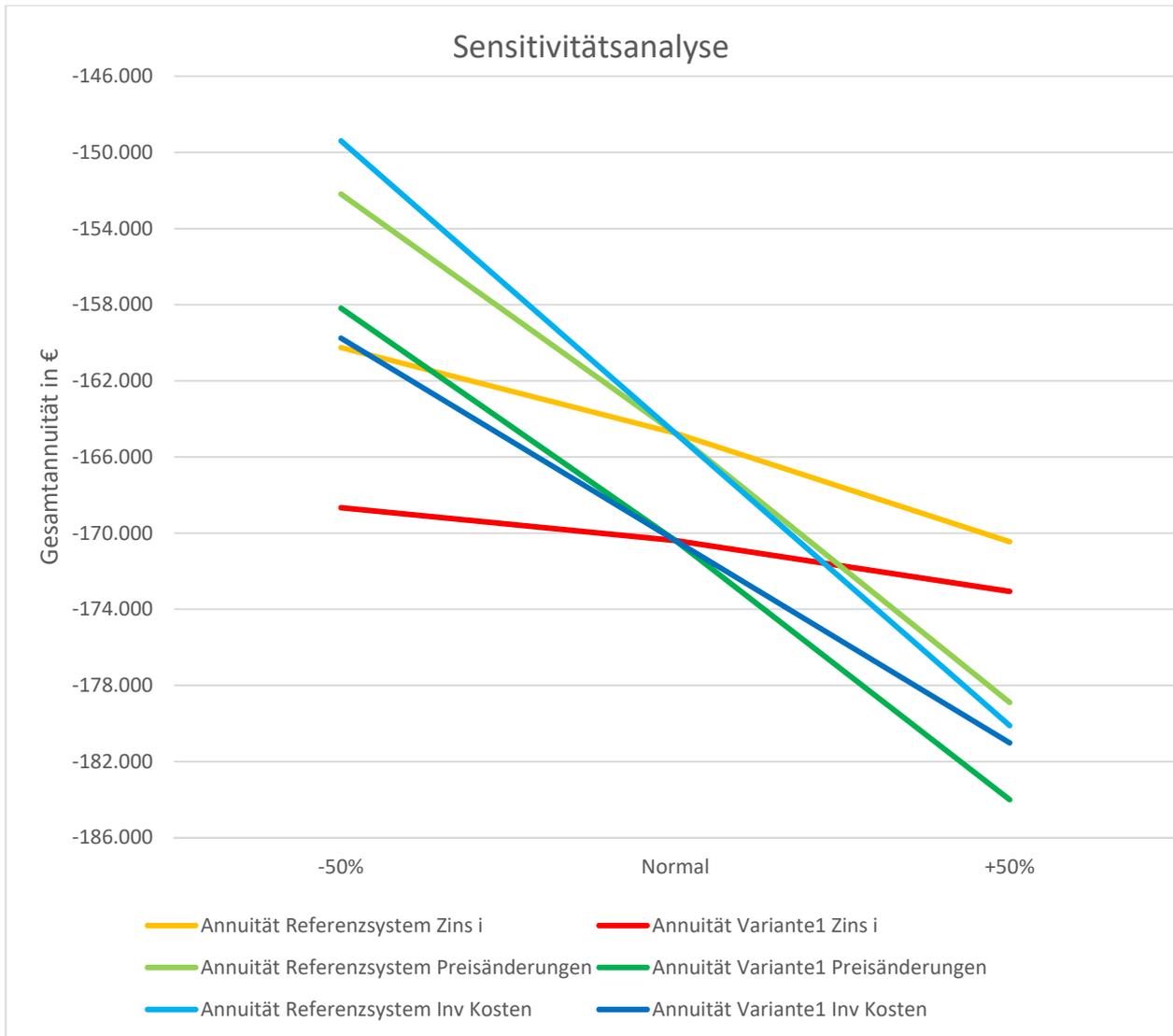


Abbildung 20: Sensitivitätsanalyse Referenzsystem und Variante 1 des Versorgungsystems

## 6 Zusammenfassung

Im Förderprojekt KWK-Modellkommune Krefeld arbeiteten die Stadtwerke Krefeld SWK AG und das SWK E<sup>2</sup> – Institut für Energietechnik und Energiemanagement der Hochschule Niederrhein gemeinsam an der Integration von dezentralen KWK-Anlagen auf kommunaler Ebene. Der vorliegende Bericht gehört zur dritten Phase des Projektes – der Umsetzungsphase. In den beiden vorangegangenen Phasen wurde von den Stadtwerken Krefeld ein Konzept (KWK-Inno.Net Krefeld) und die zugehörigen Mess- und Steuerungssysteme zur Betriebsführung von dezentralen KWK-Anlagen innerhalb eines virtuellen Kraftwerks entwickelt. In der Umsetzungsphase wurden KWK-Anlagen in mehreren Krefelder Wohngebäuden und auch öffentlichen Gebäuden (z.B. Schwimmbädern) mit diesem System installiert und in Betrieb genommen.

In dem vorliegenden Bericht werden ergänzende Technologien für ein KWK-System untersucht. Dabei wird durch das SWK E<sup>2</sup> die Möglichkeit der Erweiterung eines KWK-Systems um eine Kältemaschine bewertet. Innerhalb der Untersuchung werden zwei verschiedene Arten der Kälteerzeugung miteinander verglichen; zum einen die Kälteerzeugung mit einer Absorptionskältemaschine (AKM), die mit (Ab-)Wärme betrieben wird, und zum anderen die Kälteerzeugung mit einer Kompressionskältemaschine (KKM), die mit Strom betrieben wird.

In diesem Bericht wird die Erweiterung eines KWK-Systems um eine AKM zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) energetisch bewertet und mit einem KWK-System ergänzt um eine KKM verglichen. Anschließend werden die unterschiedlichen Auswirkungen der beiden Kältemaschinen auf die Auslastung des KWK-Systems analysiert. Grundlage der Untersuchung ist das bereits existierende KWKK-System der Feuerwache Krefeld. Die Energieversorgung der Feuerwache Krefeld erfolgt neben dem Stromnetzanschluss mit einem BHKW, einem Brennwertkessel, einer AKM sowie zwei thermischen Speichern, einem Warmwasser- und einem Kaltwasserspeicher. Die realen Verbräuche an Strom, Wärme und Kälte der Feuerwache wurden ausgewertet und bilden die Grundlage, um die beiden Energieversorgungssysteme miteinander zu vergleichen.

In der Betrachtung mit Blick auf ökologische Aspekte hat sich gezeigt, dass die Systeme mit KKM besser sind als die mit einer AKM. Die Reduzierung des Erdgasverbrauchs in

diesen Systemen überwiegt, sodass es trotz der Steigerung des Stromverbrauchs zu Reduzierungen des Primärenergieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen kommt. Im Vergleich zu einer konventionellen Variante bestehend aus KKM und BWK kommt es im aktuellen Versorgungssystem der Feuerwache zu CO<sub>2</sub>-Einsparungen. Diese Einsparungen sind auf den Einsatz des BHKW zurückzuführen.

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hat sich herausgestellt, dass die verbrauchssgebundenen Kosten den größten Teil der Kosten ausmachen. Es zeigt sich, dass die Systeme mit BHKW am wirtschaftlichsten sind, selbst wenn es die Erlöse, die durch das BHKW generiert werden, nicht gäbe. Bei diesen Erlösen handelt es sich im Wesentlichen um Vergütungen aus dem KWK-Gesetz und dem EEG. Das aktuell installierte KWKK-System der Feuerwache ist wirtschaftlicher als das simulierte System mit KKM. Dies ist überwiegend auf die niedrigere Volllaststundenzahl des BHKW und die damit verbundenen Erlöseinbußen im KKM-System zurückzuführen.

Aus der Analyse geht hervor, dass die Nutzung einer AKM die Betriebsstunden des BHKW steigert und das gesamte Versorgungssystem somit wirtschaftlicher wird. Die Sensitivitätsanalyse zeigt zudem, dass das Referenzsystem wirtschaftlicher ist auch bei der Anpassung verschiedener Parameter in einem „-50%“-„+50%“-Szenariorahmen. Die Variante 1 mit KKM ist allerdings ökologischer, denn es werden dort 30 t mehr CO<sub>2</sub> eingespart als im aktuellen System.

## 7 Literaturverzeichnis

ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., 2011. *BHKW-Kenndaten 2011*, Berlin: ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V..

ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., 2011. *Ratgeber Wärmeversorgung*, Berlin: Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V..

Bez, A., 2012. *Kälte durch Wärme erzeugen - Möglichkeiten der mit Kraft-Wärme-Kopplung beheizten Absorptionskältemaschine im Vergleich zur Kompressionskältemaschine unter wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten*. Hamburg: Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg.

BMWi, 2019. *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie - Energiedaten: Gesamtausgabe - Gesamtausgabe der Energiedaten Datensammlung des BMWi*. [Online]

Available at: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>

[Zugriff am 13 12 2019].

Bundesnetzagentur, 2017. *Bundesnetzagentur - Monitoringbericht 2017*, s.l.: Bundesnetzagentur, Bundeskartellamt.

Ciftci, Y., 2018. *Simulation und Optimierung des Versorgungssystems einer Hauptfeuerwache auf Basis von Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung*, Krefeld: s.n.

Destatis, 2019. *Statistisches Bundesamt - Verbraucherpreisindex - Verbraucherpreisindex (inklusive Veränderungsdaten) ab 1991*. [Online]

Available at: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Verbraucherpreisindex/inhalt.html>

[Zugriff am 12 13 2019].

EEX, 2019. *European Energy Exchange AG - eex.com - Marktdaten - Üblicher Strompreis gemäß KWK-Gesetz.* [Online]

Available at: <https://www.eex.com/de/marktdaten/strom/strom-indizes/kwk-index>  
[Zugriff am 13 12 2019].

Eikmeier, B., Klobasa, M., Toro, F. & Menzler, G., 2011. *Potenzialerhebung von Kraft-WärmeKopplung in Nordrhein-Westfalen*, Bremen: Bremer Energie Institut.

Fa. Gertec GmbH, 2010. *Kältemarktanalyse der Stadt Hamburg im Juni 2010*, Hamburg: Netzwerk Kälteeffizienz, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Unternehmen für Ressourcenschutz.

Icha, P., 2019. *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2018*, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

IUTA Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V., 2002. *Preisatlas - Ableitung von Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energienutzung*, Duisburg-Rheinhausen: IUTA Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V..

Kranebitter, B., 2015. *Diplomarbeit - Wirtschaftlichkeitsvergleich für Heizwärmeerzeugung in einem Niedrigenergiehaus*, Mittweida: Hochschule Mittweida.

KWKG, 2015. *Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz - KWKG).* [Online]  
Available at: [https://www.gesetze-im-internet.de/kwkg\\_2016/KWKG.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/kwkg_2016/KWKG.pdf)  
[Zugriff am 13 12 2019].

Österreichische Energieagentur, 2015. *Klimaleitfaden*, Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

Schuster, T. & Rüdert von Collenberg, L., 2017. *Investitionsrechnung: Kapitalwert, Zinsfuß, Annuität, Amortisation*. 1 Hrsg. Berlin: Springer-Verlag GmbH Deutschland.

Suttor, W., 2014. *Blockheizkraftwerke - Ein Leitfaden für den Anwender*. 8 Hrsg. Bonn: Fraunhofer IRB Verlag.

Viessmann Deutschland GmbH, 2017. *Preisliste DE Heizsysteme*, Allendorf: Viessmann Deutschland GmbH.

von Cube, H. L., Steimle, F., Lotz, H. & Kunis, J., 1997. *Lehrbuch der Kältetechnik*. Heidelberg: C.F. Müllerverlag.

Wuppertal Institut, 2015. *Konsistenz und Aussagefähigkeit der Primärenergie-Faktoren für Endenergieträger im Rahmen der EnEV. Diskussionspapier unter Mitarbeit von Dietmar Schüwer, Thomas Hanke und Hans-Jochen Luhman*, Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH.

## 8 Anhang