

# Nahwärmeversorgung „Alte Ziegelei“



Consolinno Energy GmbH

Regensburg, 22.12.2022

## I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis.....	I
II	Abbildungsverzeichnis.....	III
III	Tabellenverzeichnis.....	V
1	Motivation.....	1
2	Ausgangslage .....	2
2.1	Energiebedarf.....	2
2.1.1	Energiebedarf des Gewerbegebietes .....	2
2.1.2	Energiebedarf BTZ.....	3
2.1.3	Vergleich der Bedarfe .....	5
2.2	Netztopologie .....	5
2.2.1	Berechnung des Rohrdurchmessers .....	5
2.2.2	Leitungsverlauf.....	6
2.4	Holzgas-Blockheizkraftwerke .....	8
2.5	Annahmen.....	8
2.6	Szenarien.....	8
	Szenarienübersicht .....	9
	Basis-Szenario.....	9
	Szenario 1a.....	9
	Szenario 1b.....	9
	Szenario 2.....	9
	Szenario 4.....	9
	Szenario 5a.....	9
	Szenario 5b.....	9
2.7	Optimierung .....	10
2.8	Ergebnisse der Szenarien .....	10
2.8.1	Basis-Szenario .....	10
2.8.2	Szenario 1a.....	15
2.8.3	Szenario 1b.....	17
2.8.4	Szenario 2.....	19
2.8.5	Szenario 4.....	21
2.8.6	Szenario 5a.....	26
2.8.7	Szenario 5b.....	30

Nahwärmeversorgung „Alte Ziegelei“  
I Inhaltsverzeichnis

---

2.9	Szenarienvergleich.....	35
3	Fazit.....	39
<b>Anhang A</b>	.....	<b>40</b>
IV	Literaturverzeichnis.....	41

## II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Wärmebedarf BTZ aufgeschlüsselt nach Monaten.....	4
Abbildung 2.2: Strombedarf BTZ aufgeschlüsselt nach Monaten.....	4
Abbildung 2.3: Bedarfsprofile des BTZs und des Gewerbegebiets im Vergleich.....	5
Abbildung 2.4: Leitungsverlauf .....	7
Abbildung 2.5: Bereitstellung und Abnahme der Wärme.....	11
Abbildung 2.6: Bereitstellung und Abnahme der Wärme pro Monat.....	11
Abbildung 2.7: Erzeugung und Verbrauch von Strom .....	12
Abbildung 2.8: Einnahmen und Ausgaben des Basisszenarios im Jahr 1 .....	13
Abbildung 2.9: Cashflow über 20 Jahre .....	13
Abbildung 2.10: CO <sub>2</sub> -Bilanz des Basisszenario .....	14
Abbildung 2.11: Auswirkungen der Preisänderung für Holz oder Strom auf den Wärmepreis im Basisszenario .....	14
Abbildung 2.12: Leistungsverlauf bei der Strom- und Wärmeversorgung des BTZs durch BHKWs .....	15
Abbildung 2.13: Einnahmen und Ausgaben des Szenario 1a im Jahr 1.....	16
Abbildung 2.14: Sensitivitätsanalyse in Szenario 1a: Wie wirken sich Änderungen von Strompreis oder Holz auf den Wärmepreis aus .....	17
Abbildung 2.15: Lastprofil des BTZs und der BHKWs für Strom und Wärme .....	18
Abbildung 2.16: Einnahmen und Ausgaben des Szenario 1b im Jahr 1.....	18
Abbildung 2.17: Auswirkung einer Änderung der Hackschnitzelpreise bzw. des Strombezugspreises auf den Wärmepreis in Szenario 1b .....	19
Abbildung 2.18: Bereitstellung der Wärme für die Gewerbeeinheiten im Szenario 2.....	20
Abbildung 2.19: Investitionskosten im Szenario 2.....	20
Abbildung 2.20: Nutzung des Gasspeichers .....	21
Abbildung 2.21: Lastprofil des Szenarios 4, in dem das BTZ über Abwärme und BHKWs das Gewerbegebiet versorgt .....	22
Abbildung 2.22: BHKW-Laufzeit und Wärmebedarf des Szenarios 4, aus Sicht des BTZ.....	22
Abbildung 2.23: Investitionskosten von Szenario 4 .....	23
Abbildung 2.24: Einnahmen und Ausgaben im Szenario 4 pro Jahr für das komplette Energiesystem .....	24
Abbildung 2.25: Einnahmen und Ausgaben isoliert betrachtet für das Gewerbegebiet, auf Basis dessen die Berechnung des Wärmepreises erfolgt.....	25
Abbildung 2.26: Sensitivitätsanalyse der erzielbaren Rendite in Szenario 4 .....	26

Abbildung 2.27: Sensitivitätsanalyse hinsichtlich Wärmepreis des Gewerbegebietes in Szenario 4.....	26
Abbildung 2.28: Lastprofilausschnitt des Szenario 5a.....	27
Abbildung 2.29: Jahresdauerlinie des zu versorgenden Gebietes (BTZ+ Gewerbe) und Laufzeiten der Energieerzeugung.....	28
Abbildung 2.30: Investitionskosten des Szenarios 5a.....	28
Abbildung 2.31: Einnahmen und Ausgaben im Jahr 1 des Szenarios 5a.....	29
Abbildung 2.32: Sensitivitätsanalyse des Szenarios 5a.....	30
Abbildung 2.33: Wärmesektor Jahresverlauf in Szenario 5b.....	30
Abbildung 2.34: Wärmesektor monatlich Szenario 5b.....	31
Abbildung 2.35: Stromsektor monatlich in Szenario 5b.....	31
Abbildung 2.36: Stromdirektverbrauch und -einspeisung BHKWs Szenario 5b.....	32
Abbildung 2.37: Einnahmen und Ausgaben im ersten Jahr Szenario 5b.....	33
Abbildung 2.38: kumulierter Cash-Flow über 20 Jahre Szenario 5b.....	33
Abbildung 2.39: CO <sub>2</sub> -Bilanz Szenario 5b.....	34
Abbildung 2.40: Leistungen der Erzeuger, Szenarienvergleich.....	36
Abbildung 2.41: Strommengen, Szenarienvergleich.....	36
Abbildung 2.42: Investitionskosten, Szenarienvergleich.....	37
Abbildung 2.43: Einnahmen und Ausgaben im ersten Jahr, Szenarienvergleich.....	38
Abbildung 2.44: kumulierter Cash-Flow in Mio. € über 20 Jahre, Szenarienvergleich.....	38

### III Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Zusammenstellung der Anschlussnehmer des Gewerbegebietes inkl. Größe, Nutzungsart, Leistungs- sowie Wärmebedarf .....	3
Tabelle 2.2: Eingesetzte BHKWs in der Optimierung und Versorgung von Spanner Re <sup>2</sup> .....	8
Tabelle 2.3: Annahmen zu den Energiekosten .....	8
Tabelle 2.4: Rohrleitungsdimension Basisszenario.....	10
Tabelle 2.5: Anlagengrößen .....	12
Tabelle 2.6: Anlagengrößen und Investitionskosten Szenario 5b.....	32
Tabelle 2.7: Kurzübersicht über die wichtigsten Ergebnisse der betrachteten Szenarien.....	35
Tabelle 3.1: Thermophysikalische Stoffwerte von Wasser [3] .....	40

## 1 Motivation

Vor dem Hintergrund der Energiewende soll in dem neu gebauten Gewerbegebiet eine Alternative gegenüber einer klassischen Wärmeversorgung gestaltet werden. Da das Gewerbegebiet von einem Bauträger errichtet wird, soll die Wärmeversorgung der Gebäude nicht einzeln ausgestaltet werden, sondern über eine Wärmezentrale inkl. Wärmenetz. Das Neubaugebiet liegt in Alteglofsheim. An dieses angrenzend ist u.a. ein älteres Gewerbegebiet, in dem nach Interessenten gesucht wurde, gemeinsam eine Wärmeversorgung auszugestalten. Hier konnte die Bayerische Trockenzwiebel GmbH als Partner gewonnen werden, eine alternative Versorgung auszuarbeiten. Da die Bayerische Trockenzwiebel GmbH vor allem Prozesswärme für den Trocknungsprozess benötigt und diese im hohen Temperaturbereich liegt (bis zu 130 °C), wird ein Holzvergaser samt BHKW als Wärmequelle in Betracht gezogen.

## 2 Ausgangslage

Das geplante Gewerbegebiet „Alte Ziegelei“ befindet sich an der Bahnhofstraße 25 in 93087 Alteglofsheim. Es handelt sich bei der Fläche um eine aufgelassene Lehmgrube mit ehemaliger Ziegelei. Die Grube lässt aufgrund ihrer Größe ohne Verfüllung keine geordnete städtebauliche Entwicklung zu. Die aktuell als Unland nicht-genutzten Flächen sollen deshalb als Gewerbegebiet wieder nutzbar gemacht werden. Die Gemeinde Alteglofsheim hat hierzu bereits die Aufstellung des Bebauungsplanverfahren beschlossen. Geplant ist eine gewerblich nutzbare Fläche von ca. 3,7 ha. Die Erschließungsplanungen (Kanal, Straße, etc.) sind bereits beauftragt und haben begonnen. Baurecht ist für Ende 2022 / Anfang 2023 vorgesehen.

Durch die zu beauftragende Machbarkeitsstudie soll geklärt werden, ob für das geplante Gewerbegebiet eine zentrale Wärmeversorgung / Stromversorgung sinnvoll und rentabel darzustellen ist. Aufgrund der direkten Nachbarschaft zur BTZ, soll auch dieser Betrieb in die Untersuchung mit eingebunden werden.

### 2.1 Energiebedarf

Der Energiebedarf teilt sich auf in den Strom- und Wärmebedarf des Neubaugebietes sowie in den Strom- und Wärmebedarf des BTZs.

#### 2.1.1 Energiebedarf des Gewerbegebietes

Da das Gewerbegebiet erst im Entstehen ist, kann der Energiebedarf nicht über den tatsächlichen Verbrauch ermittelt werden, sondern ist via Gebäudestandard, Nutzung und Größe über eine Abschätzung zu treffen. Tabelle 2.1 zeigt dies. Aus der Tabelle ist zu entnehmen, dass das Gebiet zukünftig in etwa 1,7 GWh/a Wärme benötigt.

## Nahwärmeversorgung „Alte Ziegelei“

### 2.1 Energiebedarf

**Tabelle 2.1:** Zusammenstellung der Anschlussnehmer des Gewerbegebietes inkl. Größe, Nutzungsart, Leistungs- sowie Wärmebedarf

	Fläche	Benötigte Heizleistung	Jährlicher Wärmebedarf
P1 - Büronutzung	585 m <sup>2</sup>	26,6 kW	51.188 kWh
P1 - Halle 1	600 m <sup>2</sup>	26,5 kW	79.500 kWh
P1 - Halle 2	600 m <sup>2</sup>	26,5 kW	79.500 kWh
P1 - Halle 3	600 m <sup>2</sup>	26,5 kW	79.500 kWh
P2 - Halle 1	600 m <sup>2</sup>	26,5 kW	79.500 kWh
P2 - Halle 2	1.000 m <sup>2</sup>	44,2 kW	132.500 kWh
P3 - Büronutzung 1	585 m <sup>2</sup>	16,2 kW	51.188 kWh
P3 - Büronutzung 2	585 m <sup>2</sup>	16,2 kW	51.188 kWh
P3 - Halle 1	600 m <sup>2</sup>	26,5 kW	79.500 kWh
P3 - Halle 2	600 m <sup>2</sup>	26,5 kW	79.500 kWh
P4 - Halle 1	1.000 m <sup>2</sup>	44,2 kW	132.500 kWh
P4 - Halle 2	1.000 m <sup>2</sup>	44,2 kW	132.500 kWh
P5 - Halle 1	1.000 m <sup>2</sup>	44,2 kW	132.500 kWh
P5 - Halle 2	1.000 m <sup>2</sup>	44,2 kW	132.500 kWh
P6 - Büronutzung 1	585 m <sup>2</sup>	16,2 kW	51.188 kWh
P6 - Büronutzung 2	585 m <sup>2</sup>	16,2 kW	51.188 kWh
P6 - Halle 1	1.000 m <sup>2</sup>	44,2 kW	132.500 kWh
P6 - Halle 2	1.000 m <sup>2</sup>	44,2 kW	132.500 kWh
P6 - Halle 3	600 m <sup>2</sup>	26,5 kW	79.500 kWh
	14.125 m <sup>2</sup>	587 kW	1.739.900 kWh

Da das Gebiet mit einem BHKW versorgt werden könnte, ist neben der Wärme auch der Strombedarf von Interesse. Ähnlich zum Wärmebedarf wird auch der Strombedarf über Faktoren wie Größe und Nutzungsform ermittelt, wobei hier anders als bei der Wärmebedarfsrechnung, die stark mit der Außentemperatur zusammenhängt, hohe Unsicherheit in der Abschätzung ist, denn je nach Nutzung kann sich der Verbrauch deutlich unterscheiden.

Verschiedene Erfahrungswerte und Literaturwerte geben einen Wert zwischen 20-25 kWh/(m<sup>2</sup>·a) aus, womit sich der Strombedarf des Gebietes auf ca. 350.000 kWh/a einstellt.

#### 2.1.2 Energiebedarf BTZ

Für das BTZ liegen stundenscharfe Lastprofile sowohl für den Gasbezug als auch für den Strombezug vor. Diese können also ohne Anpassungen integriert werden.

Das BTZ trocknet Zwiebel für die Lebensmittelindustrie. Daher ist der Gas- bzw. Wärmebedarf stark saisonal abhängig, denn die Zwiebel werden je nach Lagerkapazität der Bauern schnell verarbeitet, so dass die jährliche Kampagne von Juli bis Januar (je nach Ernte auch früher beginnend oder länger dauernd) geht, in der die Trocknung stattfindet und der Großteil des Gasbedarfs entsteht (siehe Abbildung 2.1). Im Anschluss findet die Veredlung der Produkte statt, welche nicht annähernd so energieintensiv ist wie die Trocknung. Der Bedarf im Dezember geht runter, weil dort in den der Zeit zwischen Weihnachten und Neujahr sowie im Januar bis Heilige-Drei-Könige keine Produktion stattfindet. Insgesamt benötigt das BTZ eine Gasmenge in Höhe von 11,7 GWh/a.

## Nahwärmeversorgung „Alte Ziegelei“ 2.1 Energiebedarf

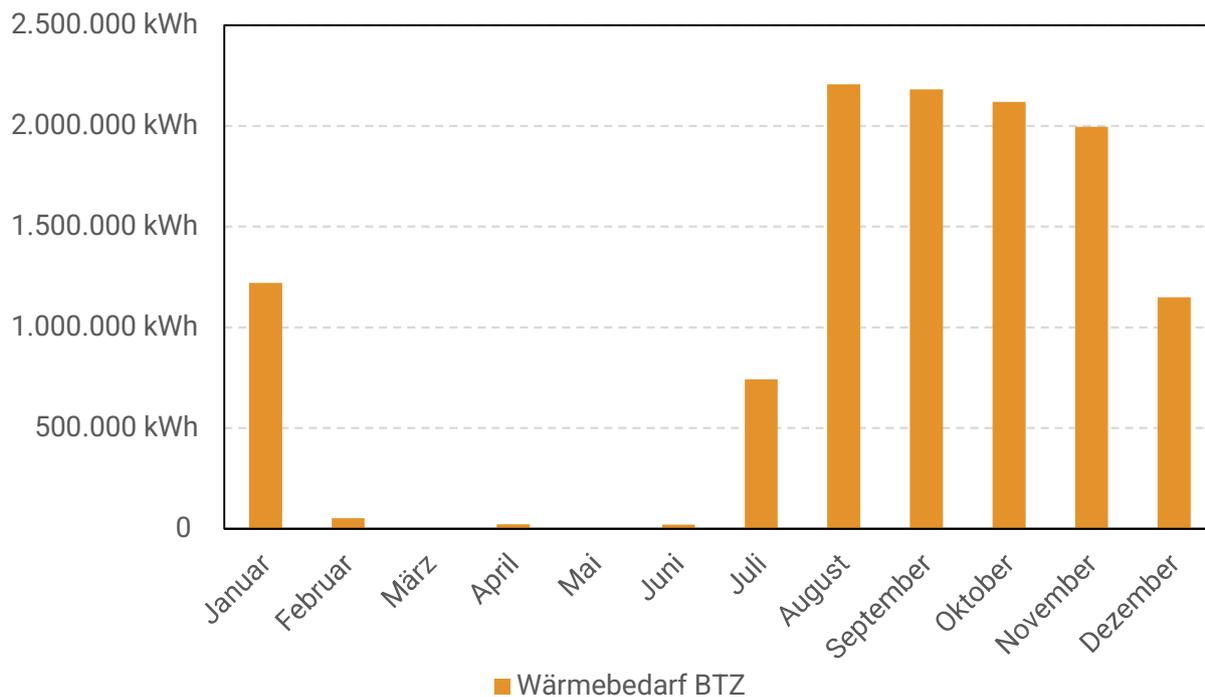


Abbildung 2.1: Wärmebedarf BTZ aufgeschlüsselt nach Monaten

Abbildung 2.2 zeigt den Strombedarf des BTZs über das Jahr. Der Strombedarf hängt ebenfalls stark von der Kampagne ab und es kann daraus geschlossen werden, dass bei hohem Wärmebedarf auch hoher Strombedarf ist. Abweichend davon ist das Verhältnis der Reduktion des Strombedarfs nach der Kampagne geringer als bei der Wärme, da in der Veredlung weiterhin Strom in höherem Umfang benötigt wird.

In Summe sind es 1,4 GWh/a Strombedarf.

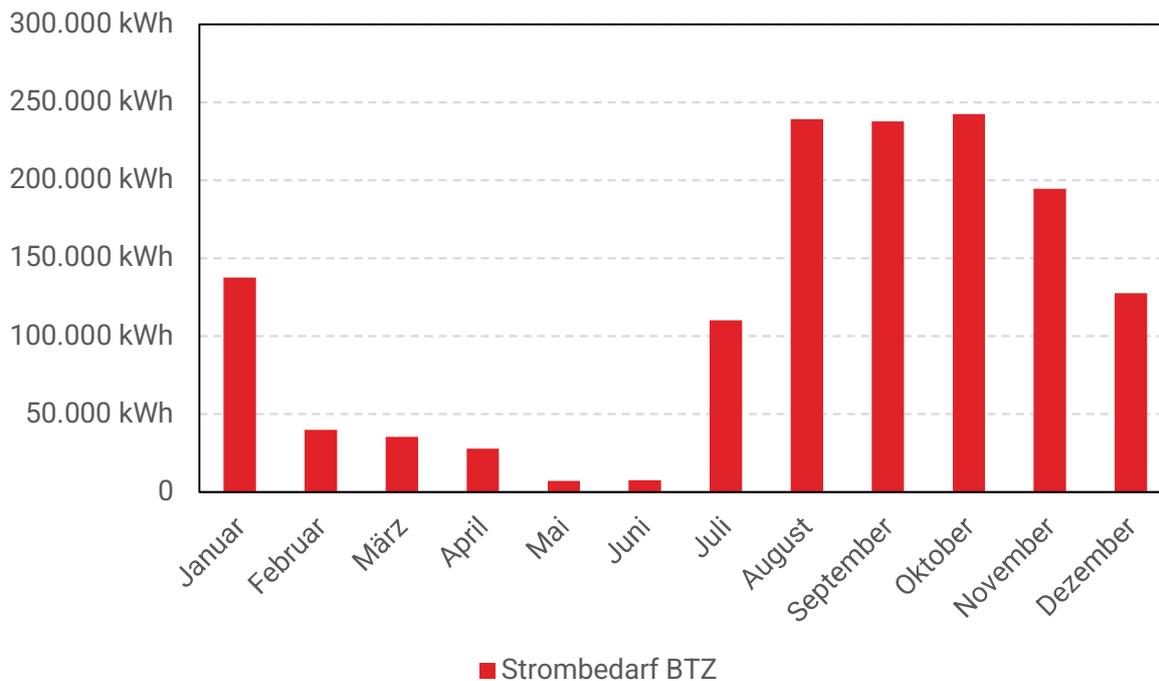


Abbildung 2.2: Strombedarf BTZ aufgeschlüsselt nach Monaten

### 2.1.3 Vergleich der Bedarfe

Da die Bedarfe des BTZs stark saisonal von der Kampagne geprägt sind, die Bedarfe des Gewerbegebiets eher der Norm entsprechen (Heizen, wenn kalt, Strom ganzjährig), soll Abbildung 2.3 einen Vergleich der Bedarfe ermöglichen. Daraus lässt sich sehr deutlich die Schwierigkeit des Projektes ableiten, dass eine Lösung gefunden werden soll, die diese zwei doch deutlich unterschiedlichen Lastprofile kombinieren soll.

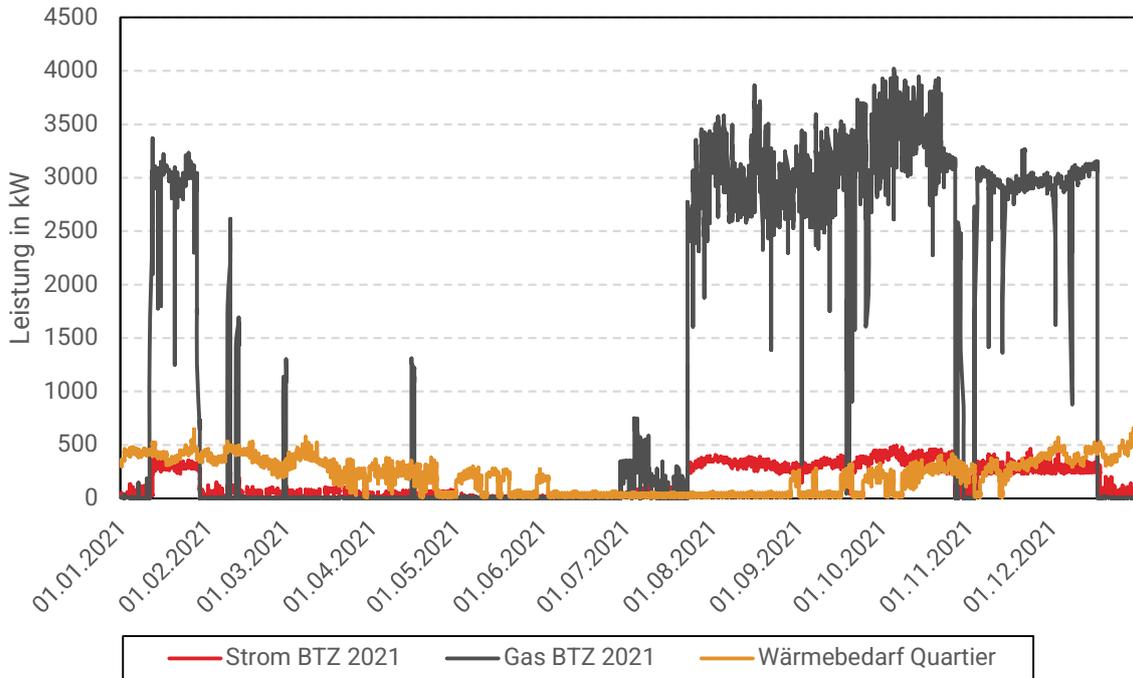


Abbildung 2.3: Bedarfsprofile des BTZs und des Gewerbegebiets im Vergleich

## 2.2 Netztopologie

In diesem Abschnitt wird genauer auf den Trassenverlauf des Wärmenetzes und die Art der Verlegung eingegangen.

### 2.2.1 Berechnung des Rohrdurchmessers

Ist die benötigte Leistung gegeben, kann dadurch der benötigte Rohrdurchmesser bestimmt werden. Für die benötigten Rohrdurchmesser werden ein Nenndurchmesser und der dazugehörige Außendurchmesser  $d_A$ , sowie die dazugehörige Wandstärke  $s$  vorgegeben. Die spezifische Wärmekapazität  $c_p$ , die Dichte  $\rho$ , die Temperaturspreizung  $\Delta T$ , der Druckverlust pro Meter  $\Delta p/L$  und die Rohrrauigkeit  $k_s$  werden vorgegeben.

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot \Delta T \cdot c_p \cdot \rho \quad (1)$$

$$\dot{V} = \frac{\pi}{4} \cdot d_i \cdot v \quad (2)$$

Die Formel (1) berechnet die Wärmeleistung, die durch das Rohr geliefert werden kann. Die Leistung ist abhängig vom Volumenstrom  $\dot{V}$ , der Temperaturspreizung  $\Delta T$ , der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  und der Dichte des Wassers  $\rho$  [1].

Die Dichte ist abhängig von der Temperatur und der Tabelle 3.1 im Anhang zu entnehmen. Mit Formel (2) wird der Volumenstrom berechnet, dafür werden der Innendurchmesser  $d_i$  und die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  benötigt. Beide werden in den folgenden Gleichungen berechnet.

$$d_i = d_A - 2 \cdot s \quad (3)$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot d_i \cdot \Delta p}{\rho \cdot \lambda \cdot L}} \quad (4)$$

$$\lambda = \left( \frac{1}{2 \cdot \log\left(\frac{3,71 \cdot d_i}{k_s}\right)} \right)^2 \quad [2] \quad (5)$$

In Formel (3) wird der Innendurchmesser  $d_i$  berechnet,  $d_A$  beschreibt dabei den Außendurchmesser und  $s$  die Wandstärke. Die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  wird in Formel (4) ermittelt. Mit Gleichung (5) wird der Reibungsbeiwert  $\lambda$  berechnet.

Welche Rohrleitungen im Wärmenetz für die Versorgung der Gebäude benötigt werden, ist in Tabelle 2.4 nachzulesen.

### 2.2.2 Leitungsverlauf

In Abbildung 2.4 wird der Leitungsverlauf des Wärmenetzes dargestellt. Dabei stellen die grünen Flächen die Lagerhallen und Bürogebäude, die orangene Fläche die Energiezentrale und die grüne Linie den Verlauf der Rohrleitungen dar. Die rosa Linien kennzeichnen die Flächen der einzelnen Parzellen und die rote Linie umrahmt die Fläche des Gewerbegebiets. Zudem ist der Stich zum BTZ dargestellt, der aus dem Gewerbegebiet führt. Diese Rohrleitung zum BTZ hat eine Länge von ca. 190 m Für jedes Gebäude sind außerdem die jeweiligen Wärmebedarfe in kWh/a dargestellt.

Nahwärmeversorgung „Alte Ziegelei“  
2.2 Netztopologie



Abbildung 2.4: Leitungsverlauf

## 2.3 Holzgas-Blockheizkraftwerke

Für die Berechnung werden verschiedene Holzvergaser-BHKWs verwendet, um reale Werte hinterlegen zu können. Holzgas-BHKWs werden derzeit meist in der mittleren Leistungsklasse hergestellt (30-100 kW<sub>el</sub>), können aber modular erweitert werden, so dass je nach Leistungswunsch am Ende nicht ein großes BHKW installiert wird, sondern mehrere bis viele kleine.

Für die Berechnungen werden Holzgas-BHKWs der Firma Spanner Re<sup>2</sup> verwendet, da mit dieser Firma bereits vor der Erstellung der Machbarkeitsstudie Kontakt bestand und daher am meisten technische Daten und Kosten zur Verfügung standen. Daraus schließend werden aber nicht die Produkte der Firma beworben, sondern aus den Ergebnissen soll vielmehr der benötigte Leistungsbedarf erschlossen werden. Ob am Ende drei BHKWs mit einer thermischen Gesamtleistung von 100 kW eingesetzt werden oder doch vier mit jeweils 25 kW eines anderen Herstellers, ist dann eine Sache der Umsetzung und Angebotseinholung. Tabelle 2.2 zeigt die drei BHKWs. Diese reichen von einer elektrischen Leistung von 35-68 kW bzw. einer thermischen Leistung von 80 bis 123 kW

**Tabelle 2.2:** Eingesetzte BHKWs in der Optimierung und Versorgung von Spanner Re<sup>2</sup>

	<b>HKA 35</b>	<b>HKA 45</b>	<b>HKA 70</b>
Leistung (P) elektrisch in kW	35	45	68
P thermisch in kW	79,5	102,2	123
P <sub>ch</sub> in kW	152,17	195,65	234,48
Wirkungsgrad elektrisch	23%	23%	29%
Wirkungsgrad thermisch	52%	52%	52%
Anlagenkosten pro Anlage	142.000 €	176.000 €	220.000 €
Eigenstrombedarf	3,0 kW	4,0 kW	7,0 kW

Ein Ergebnis aus der Optimierung ist, dass immer mehrere BHKWs für die Versorgung benötigt werden. Aufgrund des Wirkungsgradverhältnisses bzw. der Steigerung des Wirkungsgrades wird bei dem HKW 70 verhältnismäßig mehr Strom erzeugt. Aufgrund der hohen Strompreise wirkt sich eine hohe Stromerzeugung positiv auf die Wirtschaftlichkeit aus.

## 2.4 Annahmen

Vor allem die Energiekosten spielen in der Betrachtung der Energiesystem eine sehr starke Rolle, da diese ausschlaggebend für einen wirtschaftlichen Betrieb sind. Da das Jahr 2022 vor allem in der Mitte des Jahres sehr hohe Energiepreise gesehen hat, werden auch in den Szenarien mit hohen Energiepreisen gerechnet. Folgende Annahmen werden getroffen, die den Energiepreisen in der Zeit entsprechen. Auf den Strompreis werden noch die üblichen Abgaben, Steuern und Umlagen hinzugerechnet.

**Tabelle 2.3:** Annahmen zu den Energiekosten

	<b>in ct/kWh</b>
Gaspreis	12
Strombezug Börse	23
Einspeisung BHKW EEX	10
Hackschnitzel	5

## 2.5 Szenarien

Ausgehend davon, dass Holzgas verwendet werden soll, ergeben sich unterschiedliche Szenarien, wie eine Versorgung ausgestaltet werden soll. Unterschieden kann diese dadurch werden, wo die Energiezentrale installiert wird, aber auch wie viel Energie aus der Energiezentrale vor allem für das BTZ bereitgestellt werden soll, da das Gewerbegebiet voll aus der Energiezentrale versorgt wird.

### **Szenarienübersicht**

Insgesamt werden in dieser Studie sechs Szenarien näher betrachtet. Jedes Szenario kann sich dabei noch durch eine Variante unterscheiden. Primäres Ziel ist es nicht, ein Wärmenetz aufzubauen, sondern die Energieversorgung der beiden Teile (Gewerbegebiet, BTZ) erneuerbar, effizient und wirtschaftlich aufzubauen. Das eine führt nicht zwingend zum anderen, weshalb auch alternativ Szenarien ohne Leitung zwischen Gewerbegebiet und BTZ betrachtet werden, um so für die beiden Stakeholder die attraktivste Lösung abzuleiten.

Die Szenarien haben keine konkrete Sortierung bzw. Nummerierung, sondern sind im Laufe der Projektarbeit entstanden. Sie werden ab Abschnitt 2.7 näher vorgestellt.

### **Basis-Szenario**

Das Basisszenario stellt die Versorgung des Gewerbegebiets über eine Energiezentrale dar, ohne eine Versorgung des BTZ. Die Rohrleitung zum BTZ ist somit nicht vorhanden. Die Wärme wird durch Holzgas-BHKWs und einem Spitzenlastkessel zur Verfügung gestellt. Der neben der Wärme produzierte Strom wird an die Gewerbeeinheiten verkauft, sofern der Verbrauch zeitgleich mit der Erzeugung vorliegt. Ist dies nicht der Fall wird der Strom in das öffentliche Netz eingespeist. Der Strombedarf, der nicht von den BHKWs gedeckt werden kann wird vom Netz bezogen.

### **Szenario 1a**

Das Energiesystem des BTZ wird nach dem Stromverbrauch des BTZ ausgelegt. Es wird keine Leitung zwischen den beiden Liegenschaften gelegt. Die Fragestellung, die sich daraus ergibt, ist, wie viel Wärme gedeckt werden kann, um so die Abhängigkeit von Gas zu reduzieren.

### **Szenario 1b**

Das Szenario 1b ist ähnlich aufgebaut, wie Szenario 1a, nur dass das BHKW nicht auf den Strombedarf des BTZs ausgelegt ist, sondern auf den Wärmebedarf. Außerhalb der Kampagne sollen einzelne BHKWs in Form einer Kaskadenschaltung abgeschaltet werden.

### **Szenario 2**

In dem Gewerbegebiet wird die Energiezentrale installiert. Daraus wird die Firma BTZ nicht mit Wärme, sondern mit Holzgas versorgt. Der Holzvergaser läuft Volllaststunden, d. h. es wird nicht kaskadiert oder unter Teillast gefahren. Das erzeugte Gas wird via Pipeline zum BTZ geliefert. Außerhalb der BTZ-Kampagne wird das Gas zwischengespeichert. Es soll geprüft werden, ob das Holzgas gespeichert und direkt beim BTZ in die Brenner geleitet werden kann.

### **Szenario 4**

Die Firma BTZ tritt als Energieversorger für das Gewerbegebiet auf und erzeugt Wärme aus eigener Abwärme. Somit wird keine Energiezentrale im Gewerbegebiet installiert. Außerhalb der Kampagne, in der keine Abwärme anfällt, soll die Versorgung des Gewerbegebietes über einen zu ermittelnden Energiebereitsteller, vorzugsweise wie ein Holzgas-BHKW, gewährleistet werden.

### **Szenario 5a**

In diesem Szenario wird/werden die Holzgas-BHKW(s) auf den Wärmeverbrauch des Gewerbegebiets ausgelegt. Normalerweise werden BHKWs auf Grundlast ausgelegt. In diesem Szenario wird dagegen das BHKW auf die Maximalleistung ausgelegt, um dann, immer wenn es verwendet wird, unter Volllast zu laufen. Dadurch entstehen hohe Überschüsse, die das Gewerbegebiet nicht verwenden kann, welche entweder zwischengespeichert werden bzw. via Wärmeleitung an das BTZ geschickt werden. Nimmt das BTZ keine Wärme ab, ist der Pufferspeicher schnell gefüllt und das BHKW schaltet aus. Vorteil ist hier, dass das BHKW hohe Volllaststunden trotz hoher Leistung erreicht, was sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit ausübt. Kein Bedarf im Gewerbegebiet bedeutet gleichzeitig auch keine Versorgung des BTZ, z. B. im Sommer.

### **Szenario 5b**

In dieser Variante werden die BHKWs nach dem gesamten Wärmebedarf des Gewerbegebiets und BTZ ausgelegt. Außerhalb der Kampagne sollen einzelne BHKWs in Form einer Kaskadenschaltung

abgeschaltet werden. Außerdem wird ein Pufferspeicher zur Entlastung der BHKWs außerhalb der Kampagne genutzt. Spitzenlasten des BTZ werden durch die bereits vorhandene Gastherme gedeckt.

## 2.6 Optimierung

In jedem Szenario wird eine Optimierung der Auslegung eingesetzt. Diese Optimierung ist derart gestaltet, dass gewisse Parameter vom Algorithmus bestimmt werden, während der Benutzer gewisse Rahmenbedingungen setzt, indem sich die Optimierung abspielen darf. Optimiert wird bei jedem Szenario der Wärmepreis, d. h. was das Gewerbegebiet oder das BTZ für die Bereitstellung der Wärme zahlen muss. Der Wärmepreis ermittelt sich aus allen anfallenden Kosten inkl. Abschreibung (z. B. Holz aber auch Wartung etc.) geteilt durch die Energiemenge pro Jahr.

Die Parameter, die durch die Optimierung festgelegt werden, sind in erster Linie, die Leistung der verbauten BHKWs sowie die Pufferspeichergröße. Zudem gibt es Parameter, die je nach Szenario unterschiedlich sind.

## 2.7 Ergebnisse der Szenarien

### 2.7.1 Basis-Szenario

Im Basis-Szenario wird die Firma BTZ weder mit Wärme noch mit Strom aus der Energiezentrale des Wärmenetzes versorgt. Die Energiezentrale versorgt lediglich die Lagerhallen und Bürogebäude des Gewerbegebiets. Somit wird auch keine Rohrleitung zum BTZ verlegt. In Tabelle 2.4 werden die Rohrlängen mit den entsprechenden Rohrdurchmessern dargestellt, die sich für das Basisszenario ergeben.

Tabelle 2.4: Rohrleitungsdimension Basisszenario

Nennweite	Länge	Preis pro Meter	Kosten
DN 25	60 m	680 €/m	34.154 €
DN 32	152 m	710 €/m	89.556 €
DN 40	57 m	750 €/m	35.784 €
DN 50	49 m	800 €/m	32.910 €
DN 65	0 m	850 €/m	0 €
DN 80	0 m	890 €/m	0 €
DN 100	228 m	1.020 €/m	193.800 €

Außerdem sind in Tabelle 2.4 die Kosten der Rohre pro Meter und die Kosten der benötigten Länge der jeweiligen Nennweite. Für alle Rohrleitungen des Wärmenetzes zusammen ergeben sich somit Investitionskosten von ca. 380.000 €.

In Abbildung 2.5 ist der Jahresverlauf des Wärmebedarfs des Gewerbegebiets und die Bereitstellung der Wärme dargestellt. Die vier BHKWs, die bei der Auslegung bestimmt werden, können den Bedarf fast komplett decken. Von November bis März treten vereinzelt Lastspitzen auf, die durch eine Gastherme gedeckt werden. Die maximale Spitzenlast tritt im Februar auf. Dafür hat die Gastherme eine Leistung von 222,35 kW aufzubringen. Im Zeitraum von Anfang Juni bis Ende August kann der Wärmebedarf überwiegend durch ein BHKW versorgt werden. Im Winter von November bis Februar wird der Wärmebedarf meistens durch drei oder vier BHKWs gedeckt (HKA 45, s. Tabelle 2.2).

Nahwärmeversorgung „Alte Ziegelei“  
2.7 Ergebnisse der Szenarien

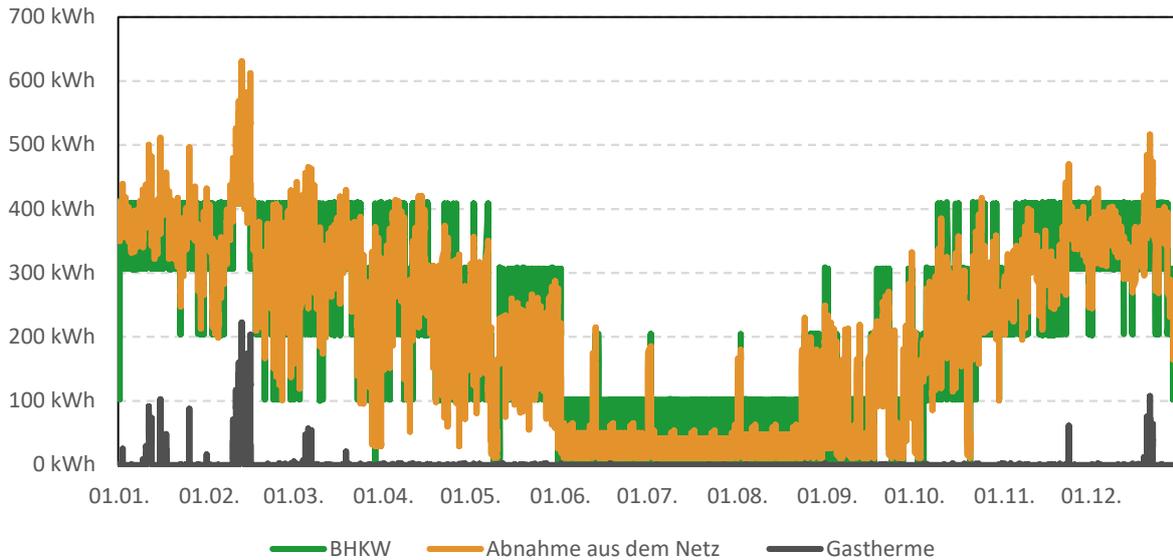


Abbildung 2.5: Bereitstellung und Abnahme der Wärme

Abbildung 2.6 zeigt den jährlichen Wärmebedarf sowie die -erzeugung nach Monaten aufgeschlüsselt. Der geringste Wärmebedarf tritt im Juli mit ca. 24.000 kWh auf und der höchste Bedarf im Januar mit ca. 280.000 kWh. Durch Zirkulationsverluste, Leitungsverluste im Wärmenetz und Verluste im Pufferspeicher ergibt sich eine Wärmebedarf von insgesamt 1.876.000 kWh. Vom gesamten Wärmebedarf werden ca. 1.856.000 kWh durch die BHKWs gedeckt und ca. 19.252 kWh vom Spitzenlastkessel. Somit werden ca. 98,9 % der Wärme von den BHKWs bereitgestellt.

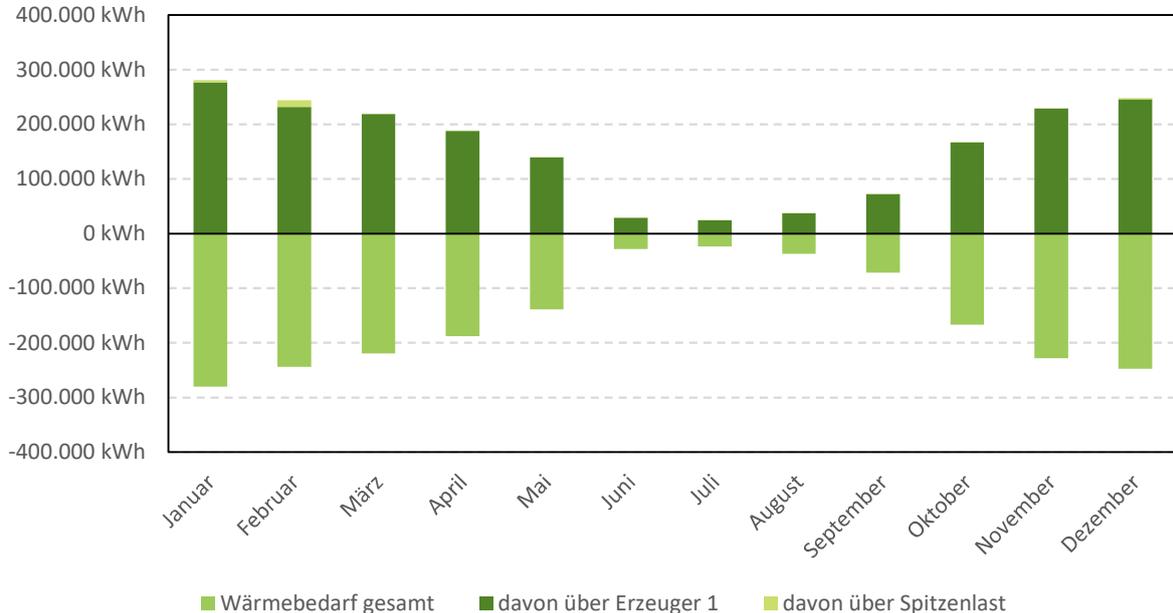


Abbildung 2.6: Bereitstellung und Abnahme der Wärme pro Monat

Im Basisszenario erzeugen die BHKWs in einem Jahr insgesamt 817.380 kWh Strom und 1.856.000 kWh Wärme.

In den Monaten Oktober bis Mai wird der Strombedarf des Gewerbegebiets fast ausschließlich durch die BHKWs gedeckt, wie in Abbildung 2.7 zu erkennen ist. Im Sommer von Juni bis September wird nur ein BHKW betrieben. Die elektrische Leistung eines BHKWs reicht im Sommer nicht für die

## Nahwärmeversorgung „Alte Ziegelei“ 2.7 Ergebnisse der Szenarien

komplette Deckung des Strombedarfs des Gewerbegebiets aus, deshalb muss zu dieser Zeit Strom aus dem Netz bezogen werden.

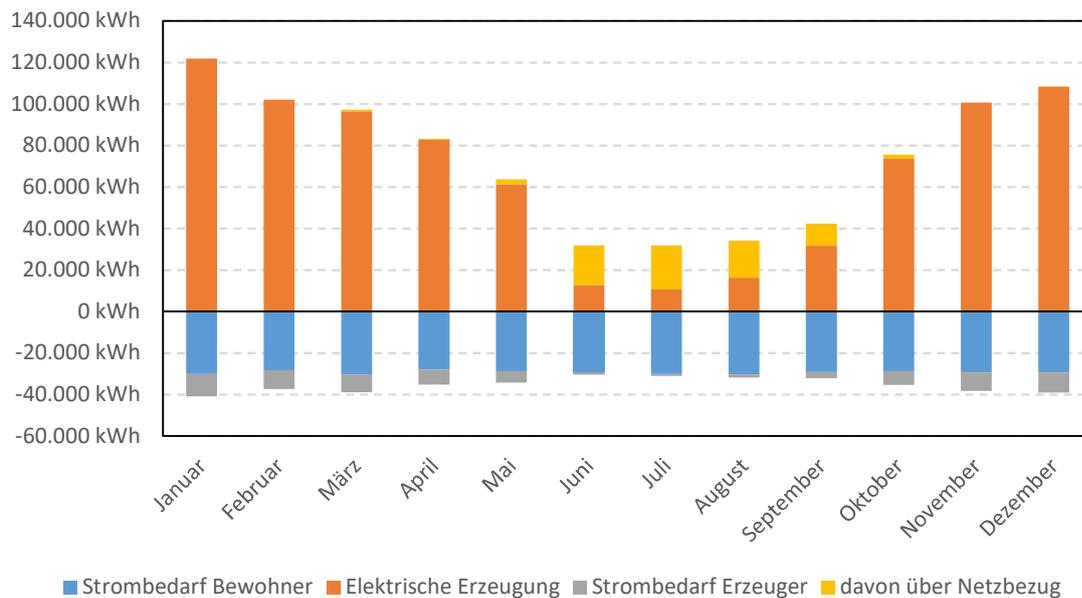


Abbildung 2.7: Erzeugung und Verbrauch von Strom

Von den 817.380 kWh, die die BHKWs produzieren, werden 351.589 kWh direkt verbraucht und 465.791 kWh in das Netz eingespeist. Der Eigennutzungsgrad sagt aus wie viel Prozent des erzeugten Stroms direkt vor Ort verbraucht werden kann und beträgt in diesem Szenario 43 %. Der Autarkiegrad gibt an wie viel Strom des gesamten Bedarfs selbst produziert werden konnte und beträgt in diesem Szenario 82,6 %

Das Gewerbegebiet wird mit vier BHKWs mit einer thermischen Leistung von je 102 kW (HKA 45) und mit einer elektrischen Leistung von je 45 kW sowie einem Spitzenlastkessel mit einer thermischen Leistung von 225,5 kW versorgt. Das Gas für die BHKWs wird von einem Holzvergaser (HV) produziert. Die erzeugte Wärme kann mit Pufferspeichern in jedem Gebäude zwischengespeichert werden. Die Werte sind in der Tabelle 2.5 dargestellt.

Tabelle 2.5: Anlagengrößen

Komponente	Leistung/Kapazität	Kosten
HV + BHKW	4 x 102,2 kW <sub>th</sub> = 408,8 kW <sub>th</sub> 4 x 45 kW <sub>el</sub> = 180 kW <sub>el</sub>	704.000 €
Gastherme	222,5 kW <sub>th</sub>	26.050 €
Pufferspeicher	19 x 1.226 l = 23.287 l 19 x 28,4 kWh = 540 kWh	35.115 €

Zu den Investitionskosten kommen noch 10.000 € für die Installation der Heizzentrale, 133.000 € für die Hausübergabestationen und 140.000 € für die Projektkosten. Insgesamt ergeben sich damit Investitionskosten von 1.400.000 €.

Nahwärmeversorgung „Alte Ziegelei“  
2.7 Ergebnisse der Szenarien

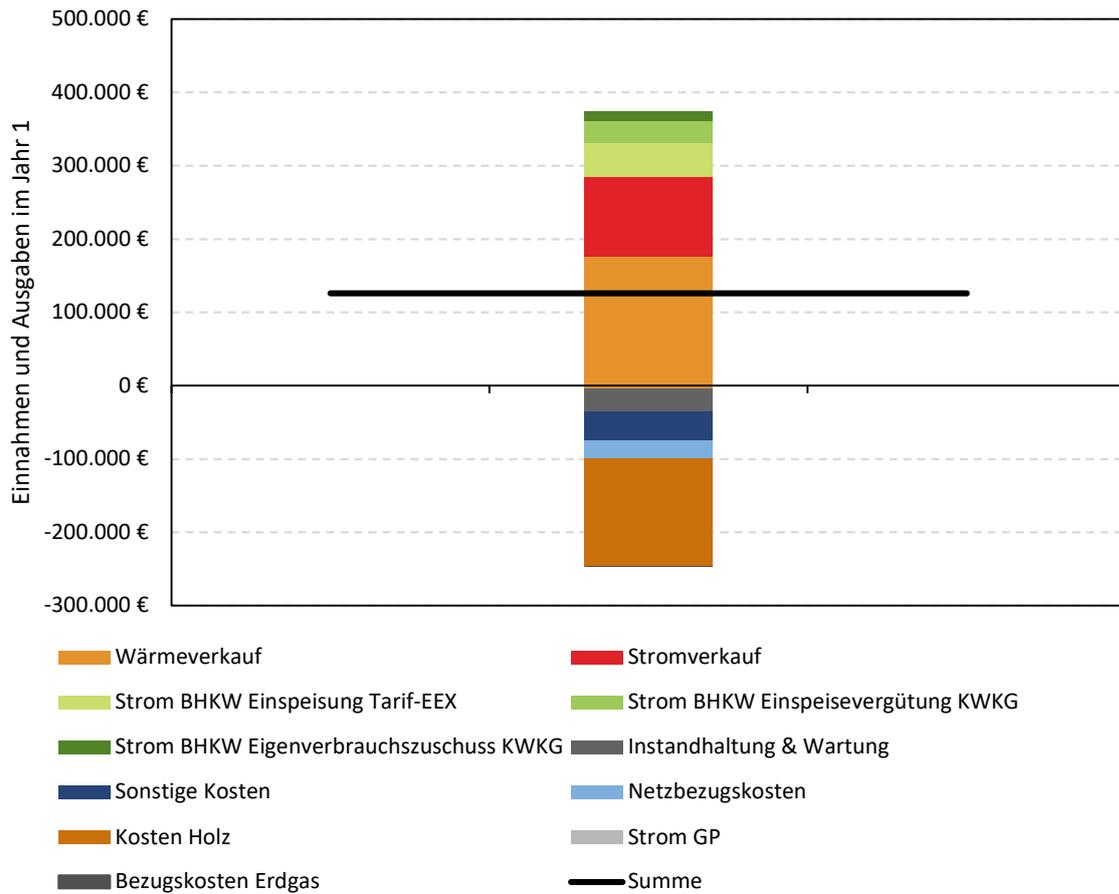


Abbildung 2.8: Einnahmen und Ausgaben des Basisszenarios im Jahr 1

In Abbildung 2.8 werden die Einnahmen und Ausgaben im ersten Jahr dargestellt, daraus wird deutlich, dass die höchsten Einnahmen durch den Wärmeverkauf an die Gewerbeeinheiten mit 204.400 € entstehen. Der Wärmepreis für die Liegenschaften liegt bei ca. 11,75 ct/kWh. Für die Holzgas-BHKWs werden 736 t Tonnen Holz benötigt, dadurch entstehen Kosten von ca. 150.000 €. Die restlichen Kosten setzen sich vor allem aus Strombezugskosten, Instandhaltung, Wartung und sonstige Kosten, wie z.B. Versicherung und Betriebsführung, zusammen

Insgesamt ergibt sich im ersten Jahr ein Erlös von ca. 125.000 €

Der Cashflow über eine Laufzeit von 20 Jahren ist in der Abbildung 2.9 dargestellt.

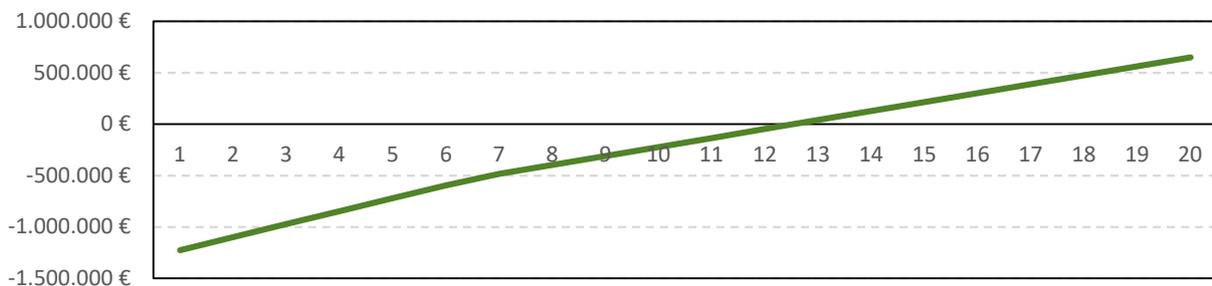


Abbildung 2.9: Cashflow über 20 Jahre

Im Basisszenario amortisiert sich das Wärmenetz nach etwa 13 Jahren und nach 20 Jahren ist ein Überschuss von ca. 650.000 € vorhanden

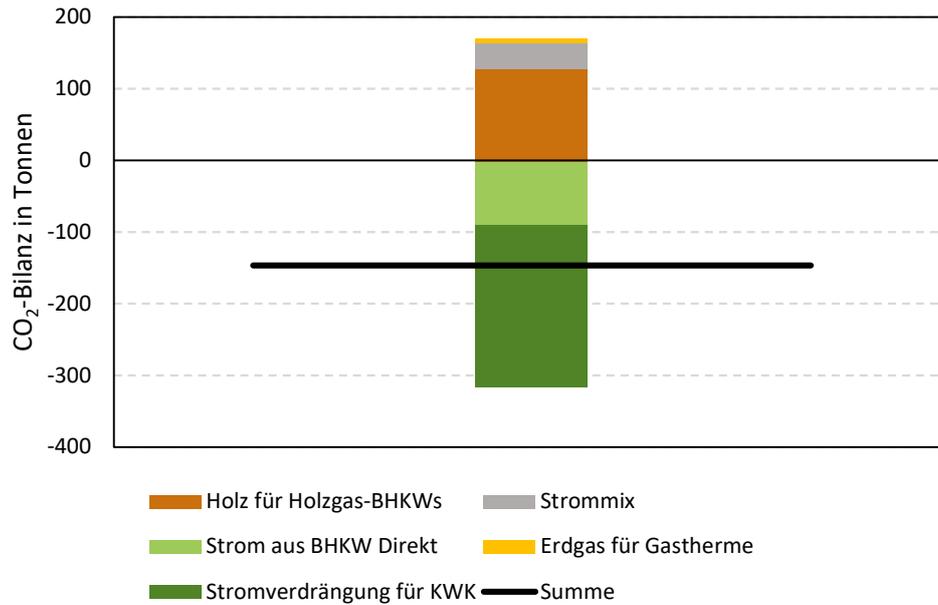


Abbildung 2.10: CO<sub>2</sub>-Bilanz des Basisszenario

Durch die Stromverdrängung des von den BHKWs erzeugten Strom, welcher nicht vor Ort verbraucht wird, sondern in das öffentliche Netz eingespeist wird, werden ca. 315 t CO<sub>2</sub> pro Jahr eingespart. Je größer der Anteil der erneuerbaren Energieträger im deutschen Strommix wird, desto weniger CO<sub>2</sub> wird durch die Stromverdrängung der BHKWs eingespart, da weniger Strom verdrängt wird, der von Kohlekraftwerken erzeugt wird. Durch den Bezug von Erdgas und Strom und der Verbrennung von Holz für die Holzgas-BHKWs entstehen insgesamt ca. 170 t CO<sub>2</sub> pro Jahr. Insgesamt ergibt sich dadurch eine jährliche CO<sub>2</sub>-Bilanz von -145 t.

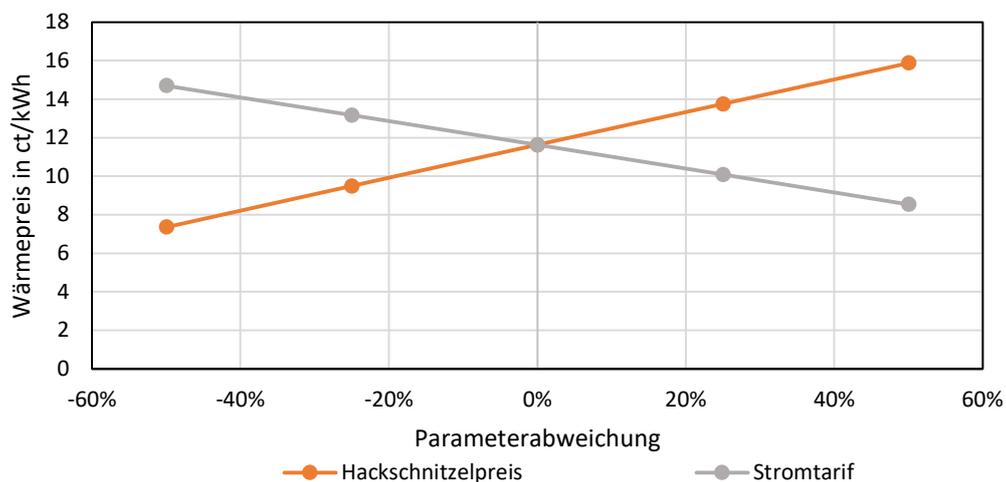


Abbildung 2.11: Auswirkungen der Preisänderung für Holz oder Strom auf den Wärmepreis im Basisszenario

In Abbildung 2.11 zeigt welche Auswirkung eine Preisänderung von Hackschnitzel oder Strom auf den Wärmepreis hat. Dies wird als Sensitivitätsanalyse bezeichnet. Fällt der Preis für Hackschnitzel um 20 % günstiger aus als angenommen, reduziert sich der Wärmepreis von knapp 12 ct/kWh auf ca. 10 ct/kWh. Es lässt sich sagen, dass sich der Wärmepreis um 1 ct/kWh steigt bzw. sinkt, wenn der Preis für Hackschnitzel um 10 % höher bzw. niedriger als angenommen ist.

### 2.7.2 Szenario 1a

Dieses Szenario ist dadurch geprägt, dass für das BTZ eine Alternative zu einer Wärmeversorgung via Wärmenetz berechnet werden soll. Daher wird dieses Szenario in Anlehnung an das Basisszenario, in dem nur das Gewerbegebiet über ein Netz versorgt wird, betrachtet und berechnet, um so einen Vergleich gegenüber eine Netzvariante zu haben. Ziel ist eine günstige und nachhaltige Wärmeversorgung zu ermitteln und dabei ist ein Wärmenetz nur eine Alternative.

Die Herangehensweise in diesem Szenario ist, die Größe der Holzgas-BHKWs, die am Ende bei dem BTZ installiert werden sollen, anhand des Strombedarfs des BTZs zu bestimmen. Hintergrund dabei ist, dass wie in Abbildung 2.1 und Abbildung 2.2 zu sehen ist, der Strombedarf dem Wärmebedarf folgt, d. h. immer wenn Wärme benötigt wird, wird auch Strom in großen Maße eingesetzt (Trocknung etc.). Dieser Strombedarf steht dabei auch meist im Verhältnis zum Wärmebedarf, nur geringer. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass ein BHKW, das auf den Strombedarf ausgelegt ist, Wärme erzeugt, die immer benötigt wird. Deshalb kann eine hohe Auslastung der BHKWs erreicht werden, was eine Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Betrieb einer technischen Anlage ist, die hohe Investitionskosten aufweist.

Die Optimierung weist als optimale BHKW-Größe eine elektrische Leistung von 275 kW sowie thermische Leistung von ca. 500 kW aus. Dabei ist eine kaskadierte Einsatzweise vorgesehen, so dass sich mehrere BHKWs diese Leistung teilen und je nach Bedarf ein BHKW zu- oder abgeschaltet werden kann.

In Abbildung 2.12 ist der Leistungsverlauf des BTZ gezeigt (orange). Es ist eindeutig erkennbar, dass die Wärme von den BHKWs durch das BTZ aufgenommen werden kann, es somit zu keinen Wärmeverlusten kommt (hellgrün), gleichzeitig aber ein sehr hoher Anteil des Strombedarfs des BTZs (rot) durch das BHKW gedeckt werden kann (dunkelgrün).

In Zahlen ausgedrückt bedeutet dies, dass das BTZ ca. 1,4 GWh/a benötigt, welche zu 75 % durch das BHKW gedeckt werden kann (1,05 GWh/a). Umgekehrt heißt dies, dass 99 % des BHKW-Stromes direkt verwendet werden kann. Nur ein Bruchteil wird eingespeist. Weiterhin bleibt ein Strombezug von 0,4 GWh/a bestehen.

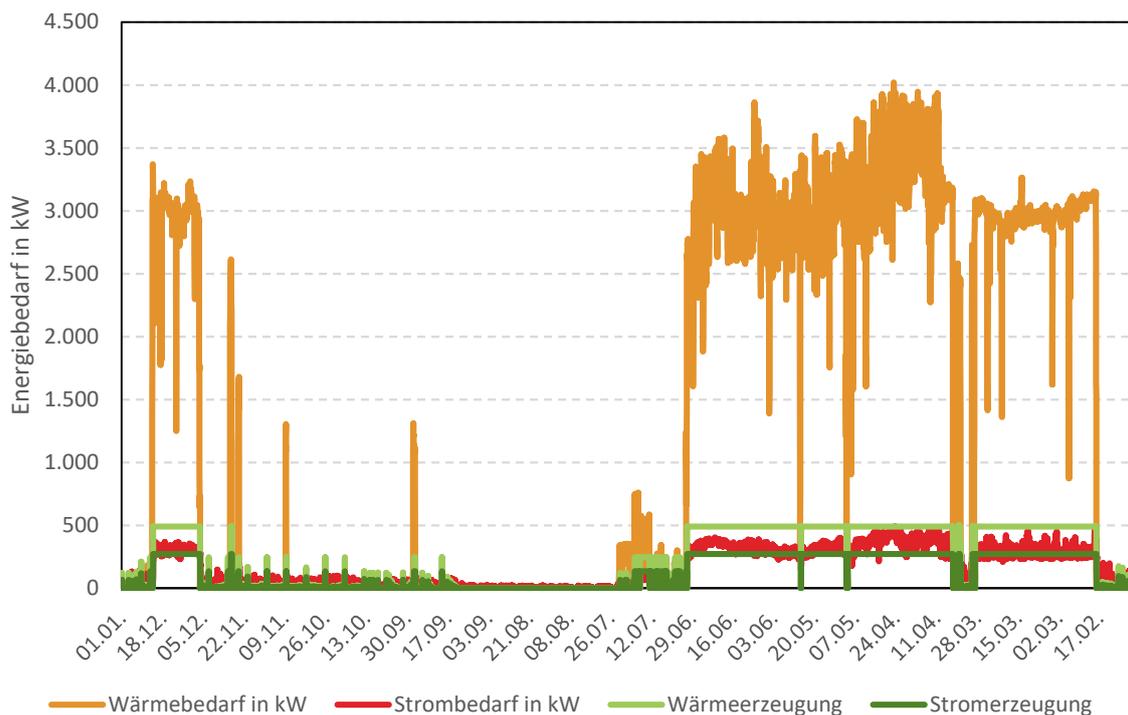


Abbildung 2.12: Leistungsverlauf bei der Strom- und Wärmeversorgung des BTZs durch BHKWs

## Nahwärmeversorgung „Alte Ziegelei“

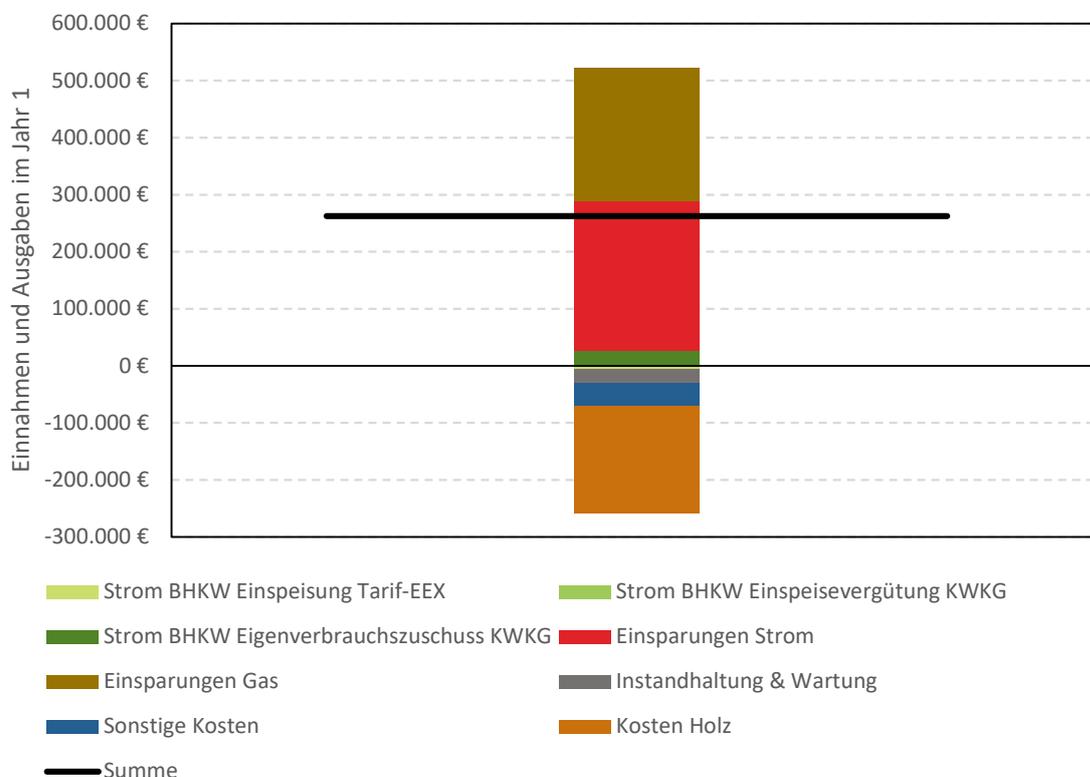
### 2.7 Ergebnisse der Szenarien

Die BHKWs produzieren dabei 1,9 GWh/a Wärme, welche den Gasbezug um diese Menge reduziert. Die Reduktion von Gas entspricht etwa 16 % des jährlichen Bedarfs an Gas.

Die Investitionskosten werden fast ausschließlich von den BHKWs getrieben, da kein Netz gebaut wird.

Abbildung 2.13 zeigt einen Überblick, wie hoch die Einnahmen und wie viele Ausgaben mit der Investition verbunden sind. Zu den Einnahmen zählen die Einspeisevergütung des BHKW-Stromes nach KWKG plus die Vermarktung an der Börse nach dem Monatsmarktmittelwertes. Des Weiteren wird die Investition daran gemessen, wie viel Netzstrom verdrängt wird, was demnach als Einnahme bzw. Einsparung gewertet wird. Zudem ist im derzeitigen KWKG ein Zuschuss für Eigenverbrauch für die ersten 30.000 Betriebsstunden des BHKWs enthalten. Diese entspricht bei der Anlagengröße 2,51 ct/kWh. Der zweitgrößte Einnahmenpunkt ist der vermiedene Gasbezug.

Dem gegenüber stehen die Ausgaben, die sich vor allem aufteilen in den Brennstoffbezug sowie die Wartungs-, Instandhaltungs- und Betriebsführungskosten, die vor allem durch die Kosten für Wartung und Instandhaltung der BHKWs geprägt sind. Unter Sonstige Kosten laufen Positionen wie Versicherung und Ascheentleerung o.ä.



**Abbildung 2.13:** Einnahmen und Ausgaben des Szenario 1a im Jahr 1

Die Differenz aus den Ausgaben und Einnahmen entspricht den Kosten/Erlöse, die durch die Investition erzielt werden. Wie Abbildung 2.13 zeigt, erwirtschaftet das BTZ ca. 260.000 € im Jahr an Plus. Diese Einnahmen werden zum einen zur Deckung der Abschreibung verwendet, zum anderen sind es Gewinn für das BTZ. Da in den Szenarien mit hohen Energiekosten gerechnet werden, ist für das BTZ eine hohe Eigenstromnutzung von hohem Vorteil, weshalb auch die Rendite sehr hoch ausfällt. Umgekehrt gesagt gilt, dass, wenn sich der Markt wieder beruhigt hat, weiterhin eine hohe Rendite möglich ist, aber eben nicht mehr ganz so hoch. Die Rendite unter den angenommenen Rahmenbedingungen ist ca. 21 % pro Jahr.

Abbildung 2.14 zeigt eine Sensitivitätsanalyse, wie sich die Rendite auf eine Änderung von Rahmenbedingungen verhält (wie sensitiv er auf Änderungen ist). Im Schnittpunkt bei 0 % ist das Szenario so wie berechnet. Ausgehend davon werden die beiden Parameter Strompreis, Gaspreis oder

Holzpreis verändert, während alles andere gleichbleibt. So kann eine Bewertung getroffen werden, auf welche Faktoren im Betrieb besonderes Augenmerk geworfen werden soll.

Aus der Steigung der Geraden lässt sich lesen, dass eine Steigerung der Hackschnitzelpreise um 10 % die Rendite um ca. 1,8 % senkt. Umgekehrt genauso bei einem Fallen der Holzpreise.

Ähnliches Bild ergibt sich beim Stromtarif, der sich in den Stromeinsparungen bemerkbar macht. Der Erhöhung der Stromkosten um 10 % und damit einhergehend höheren Stromeinsparungen durch den eigen erzeugten Strom folgt eine Erhöhung der Rendite um 1,8 %. Gehen die Stromkosten zurück, sinkt die Rendite um diesen Faktor. Eine ähnliche Steigung weist eine Änderung der Gaspreise auf.

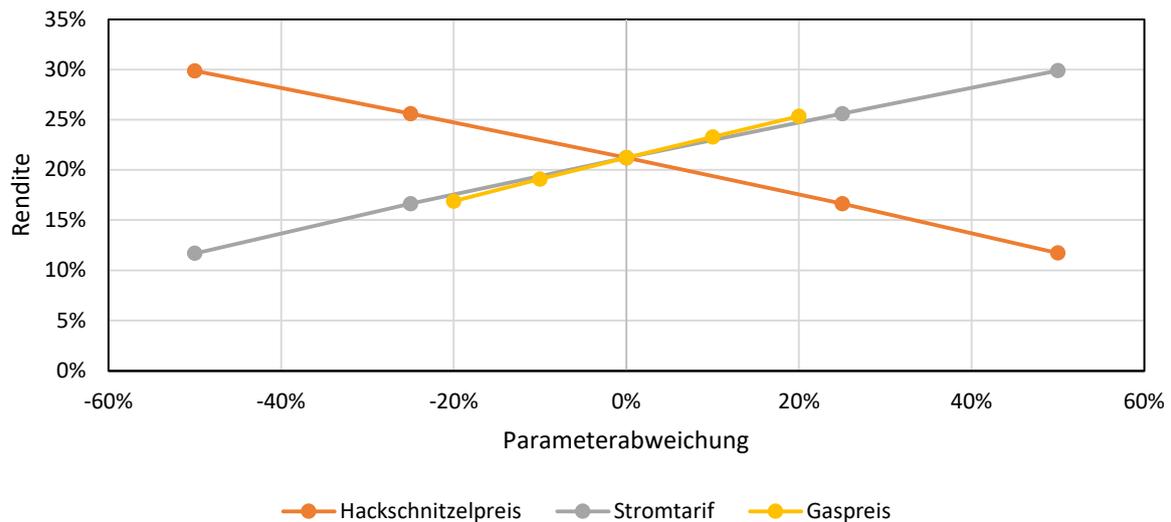


Abbildung 2.14: Sensitivitätsanalyse in Szenario 1a: Wie wirken sich Änderungen von Strompreis oder Holz auf den Wärmepreis aus

### 2.7.3 Szenario 1b

Szenario 1b weicht von Szenario 1a dahingehend ab, dass die BHKWs nicht nach dem Strombedarf ausgelegt werden, sondern das Ziel ist, so viel Wärme wie möglich durch die BHKWs zu decken.

Da die maximale thermische Leistung des BTZs bei ca. 4 MW liegt, werden BHKWs mit einer thermischen Leistung in dieser Größenordnung benötigt. Aus wirtschaftlichen Gründen ist es wenig sinnvoll, die BHKWs auf 100 % auszulegen, da einzelne BHKWs zwar abwechselnd laufen können, aber nur sehr wenige Zeit im Jahr alle zusammen gebraucht werden, zumal bereits eine Energieinfrastruktur besteht, die weiterhin für Spitzenzeiten bestehen bleiben kann. Dennoch wird der Optimierung vorgegeben, dass 98 % der Bedarf durch die BHKWs gedeckt werden soll.

Dies führt dazu, dass die thermische Leistung der BHKWs bei ca. 3,3 MW liegen soll, was zu einer elektrischen Leistung von ca. 1,5 MW führt.

Abbildung 2.15 zeigt das Profil der Wärme- und Stromerzeugung sowie den Bedarf bzw. welche Wirkung die Auslegung hat. Es ist deutlich erkenntlich, dass die Spitzen nicht vom BHKW gedeckt werden. Diese entsprechen in Summe nur 2% der Energiemenge, aber 16 % der Leistung. Zudem ist erkennbar, dass viel Strom eingespeist wird.

Die deutlich höheren Leistungen als in Szenario 1a resultieren am Ende auch in deutlich höheren Investitionskosten (ca. 6,3 Mio. € gegenüber 1,2 Mio. € in Szenario 1a). Dies führt wiederum zu höheren Betriebskosten.

Nahwärmeversorgung „Alte Ziegelei“  
2.7 Ergebnisse der Szenarien

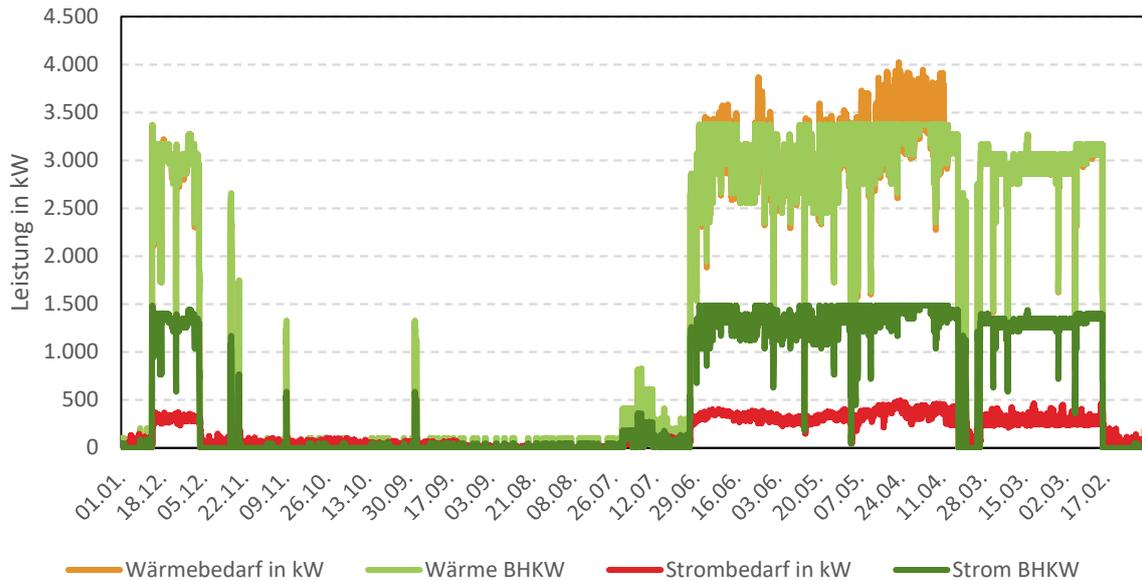


Abbildung 2.15: Lastprofil des BTZs und der BHKWs für Strom und Wärme

Abbildung 2.16 stellt die Ausgaben und die Einnahmen eines Jahres (Jahr 1) des Szenarios gegenüber. Zu den Ausgaben im Jahr gehören vor allem die Brennstoffbezugskosten von Holz sowie die Kosten für Wartung, Instandhaltung und Betriebsführung der BHKWs. Diesen stehen primär die Einnahmen durch die Stromverdrängung und die Einsparungen im Gasbezug gegenüber. Anders als in Szenario 1a, in dem der Strom fast ausschließlich direkt selbst verwendet wird, wird in diesem Szenario ein Großteil des Stromes eingespeist [67 % (3,45 GWh/a) des erzeugten Stromes (5,15 GWh/a)]. Dafür werden zwei Vergütungsformen erzielt. Erstens die feste Einspeisevergütung nach KWKG (4,64 ct/kWh) für die ersten 30.000 Betriebsstunden sowie die Erlöse durch die Vermarktung an der Strombörse nach Quartalsmittelwert.

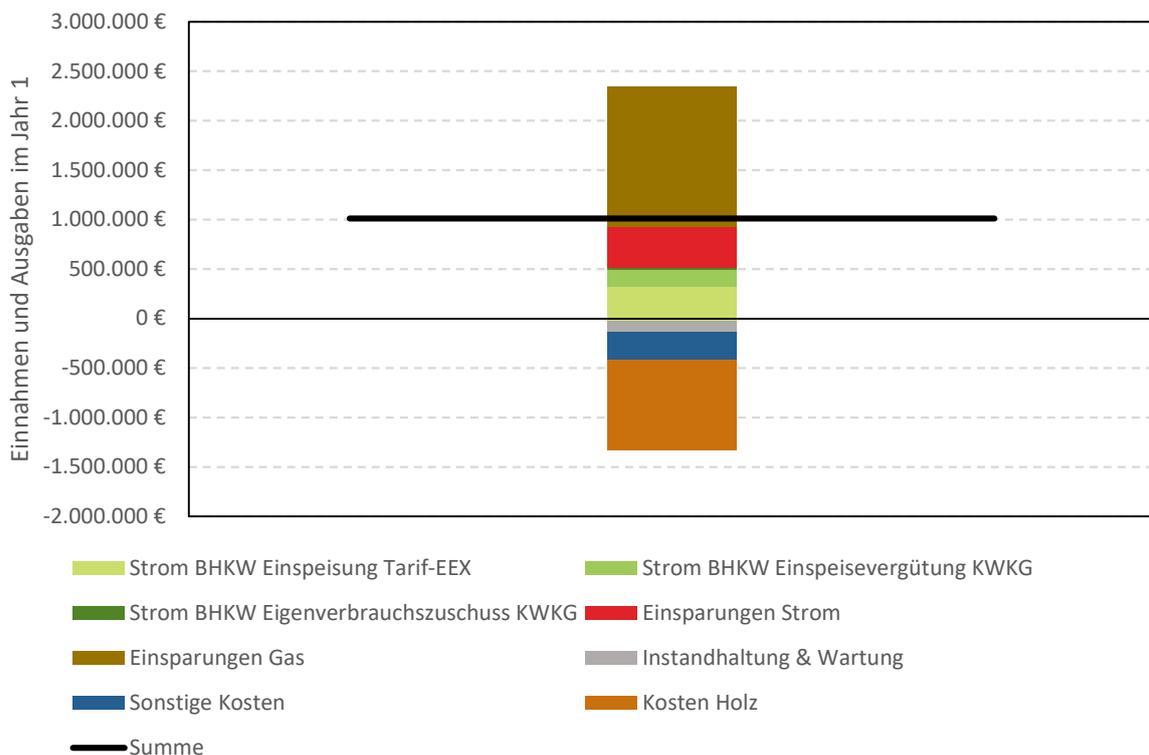


Abbildung 2.16: Einnahmen und Ausgaben des Szenario 1b im Jahr 1

## Nahwärmeversorgung „Alte Ziegelei“

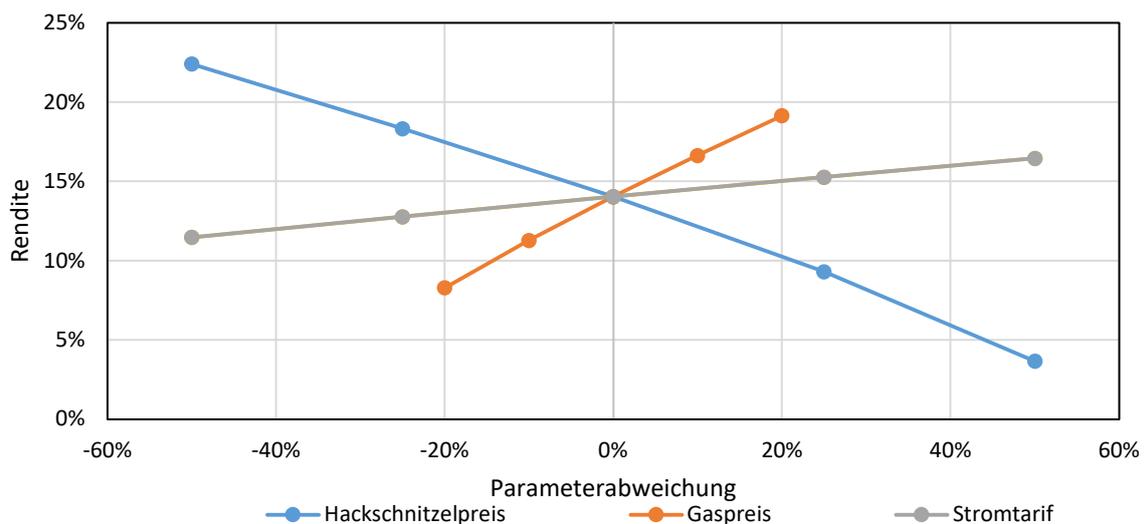
### 2.7 Ergebnisse der Szenarien

Eine weitere Einnahmequelle ist der Eigenverbrauchszuschuss auf Strom des BHKWs, der selbst genutzt wird, in Höhe von 1,69 ct/kWh nach dem KWKG für die ersten 30.000 Betriebsstunden. Dieser reduziert im Vergleich zu Szenario 1a aufgrund der installierten Leistung. Dadurch ergeben sich Einnahmen von ca. 1 Mio. € pro Jahr (in der Zeit, in denen das BHKWs die volle Einspeisevergütung erhalten).

Da am Ende ca. 98 % des Gases verdrängt wird, ist demnach die höchste Einsparungsquelle der verminderte Gasbezug, welche sich auf 1,3 Mio. € im Jahr beziffern. Demgegenüber steht der Holzbezug mit ca. 1 Mio. €.

Abbildung 2.17 zeigt die Auswirkung der Änderung von Annahmen auf die Rendite. Da im Vergleich zu Szenario 1a die Investitionen deutlich höher liegen, aber viel mehr Strom zu einem geringeren Erlös als Eigenverbrauch eingespeist wird, ist die Rendite bei 14 % auch deutlich niedriger. Diese hohe Rendite ist wieder in den sehr hohen Energiepreisen begründet.

Erhöht sich der Hackschnitzelpreis um 10 %, führt dies zu einer Reduktion der Rendite um 1,8 %. Eine Änderung des Strompreises hat einen geringeren Einfluss auf die Rendite wie noch in Szenario 1a, da relativ betrachtet durch die Erhöhung der BHKW-Leistung kaum mehr Strom verdrängt wird und dadurch nur die Höhe der Einspeisung erhöht wird. Eine Erhöhung des Strompreises um 10 % führt zu einer linearen Erhöhung der Rendite um 0,5 %. Ein sehr hohen Einfluss auf die Rendite hat in Szenario 1b der Gaspreis mit 2,7 % Absinken der Rendite bei einer Senkung des Gaspreises um 10 %.



**Abbildung 2.17:** Auswirkung einer Änderung der Hackschnitzelpreise bzw. des Strombezugspreises auf den Wärmepreis in Szenario 1b

#### 2.7.4 Szenario 2

Im Szenario 2 wird für das Gewerbegebiet mithilfe von Holzgas-BHKWs und einem Spitzenlastkessel Wärme bereitgestellt. An das BTZ wird lediglich Gas geleitet, welches durch Holzvergaser in der Energiezentrale erzeugt wird. Außerhalb der Kampagne wird das Holzgas zwischengespeichert.

Das Wärme- und Stromprofil ist analog zum Basisszenario und deshalb ist die Bereitstellung der Wärme durch die Gastherme und die BHKWs ähnlich zum Basisszenario, wie in Abbildung 2.18 zu erkennen ist.

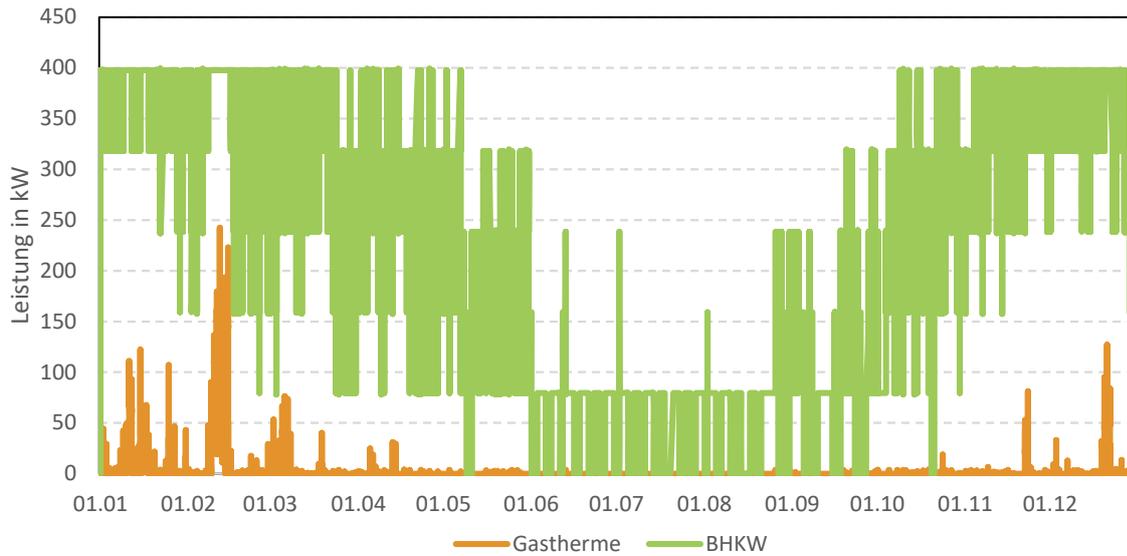


Abbildung 2.18: Bereitstellung der Wärme für die Gewerbeeinheiten im Szenario 2

Für das BTZ muss durch zusätzliche Holzvergaser das Holzgas produziert werden. Dafür sind zusätzliche Investitionskosten von etwa 3,5 Mio. € notwendig, außerdem muss ein Gasspeicher für die Speicherung des Holzgases, welches außerhalb der Kampagne erzeugt wird, angeschafft werden. Nach Aussage der Firma Lipp GmbH kostet ein Gasspeicher für 5.000 m<sup>3</sup> etwa 500.000 €. Da aber ein Speicher benötigt wird der etwa eine Kapazität von 50.000 m<sup>3</sup> sind als Investitionskosten 5.000.000 € angenommen worden. Eine Verzehnfachung der Kapazität bedeutet nicht automatisch eine Verzehnfachung der Kosten. In diesem Fall wird dies aber angenommen, damit Unsicherheiten wie eine Preissteigerung durch Inflation, Lieferkettenprobleme, usw. berücksichtigt werden. Insgesamt ergeben sich Investitionskosten von über 10 Mio. €. In Abbildung 2.19 ist dargestellt, wie sich die Kosten zusammensetzen.

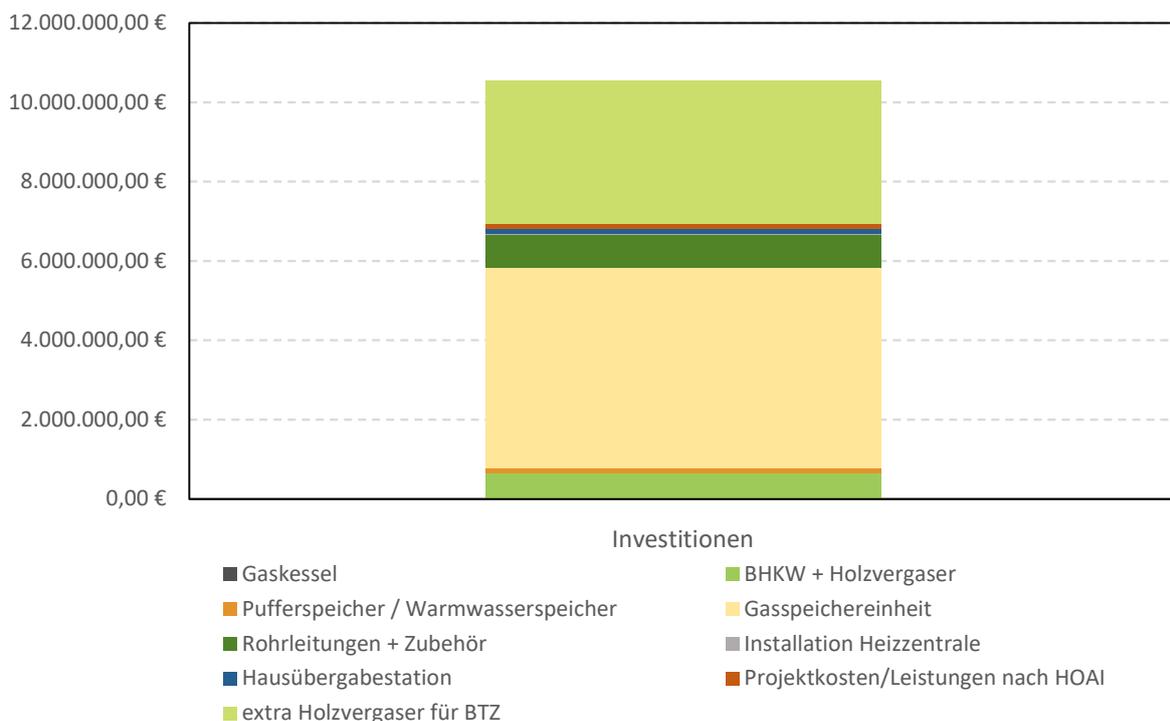


Abbildung 2.19: Investitionskosten im Szenario 2

Neben den hohen Investitionskosten ist der aktuelle Gaskessel der Firma BTZ auf Erdgas und nicht auf Holzgas ausgelegt. Dies kann dazu führen, dass der Wirkungsgrad der Verbrennung sich verringert und dass die Lebensdauer des Gaskessels sich verringert.

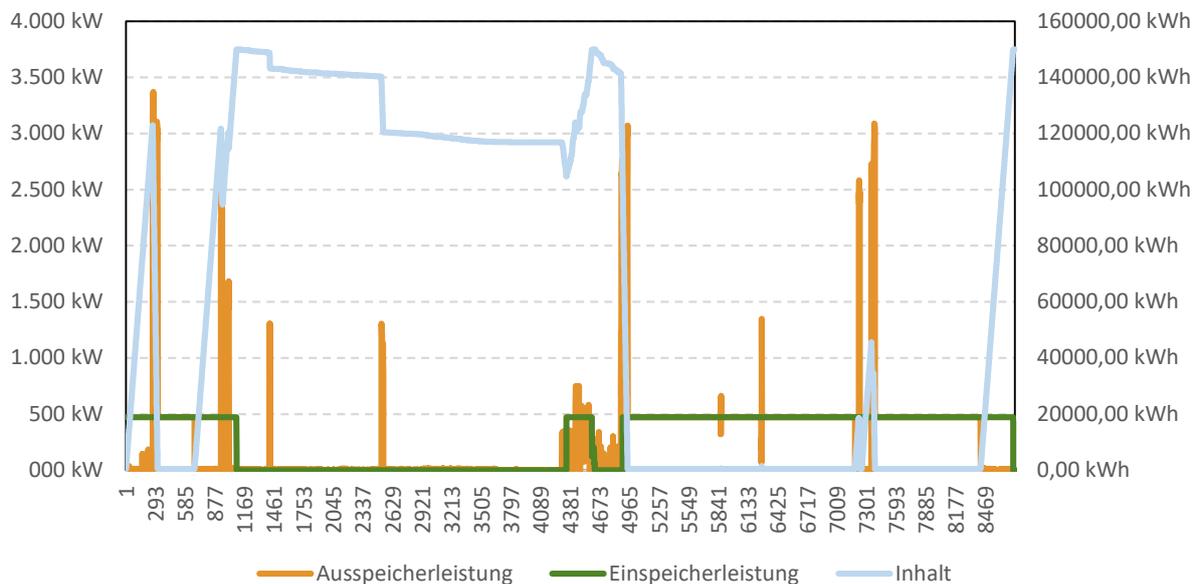


Abbildung 2.20: Nutzung des Gasspeichers

Wie in Abbildung 2.20 dargestellt, wird der Gasspeicher nur während der Übergangphasen, wenn eine Kampagne endet, beginnt oder pausiert, genutzt. Da dies nicht häufig geschieht und ein zweiter Gasspeicher im Gewerbegebiet nicht gewollt ist, wird das Szenario nicht weiter betrachtet.

### 2.7.5 Szenario 4

Szenario 4 geht den umgekehrten Ansatz wie in der ursprünglichen Motivation angedacht, dass das Gewerbegebiet die Energiezentrale installiert hat und das BTZ versorgt. In Szenario 4 werden die Abwärmepotentiale des BTZ genutzt und daraus das Gewerbegebiet zum Teil versorgt. Dabei soll in diesem Szenario außerhalb der Kampagne, also wenn keine Abwärme vorhanden ist, das Gewerbegebiet über das Netz vom BTZ versorgt werden. Dies kann derart gestaltet sein, dass entweder die bereits vorhandene Energieerzeugung (Gasbrenner) für das Netz verwendet wird, oder wenn der nachhaltige Gedanke auch in diesem Szenario weiterverfolgt wird, dass außerhalb der Kampagne wirtschaftlich ausgelegte BHKWs die Grund- und Mittelast abdecken, und der Gasbrenner nur in der Spitze in wenigen Stunden im Jahr Einsatz findet.

Abbildung 2.21 zeigt den Verlauf der Bedarfe und Erzeugung. Während der Kampagne wird der Wärmebedarf des Gewerbegebiets durch die Abwärme gedeckt. Außerhalb der Kampagne versorgen die BHKWs das Gewerbegebiet und weist dabei eine Laufzeit von 3000 Stunden auf, in denen die BHKWs nur für das Gewerbegebiet laufen.

Dies resultiert in einer Aufteilung der Deckung des Wärmebedarfs in 55 % durch die BHKWs, ca. 1,2 % durch die Spitzenlast und 44 % durch die Abwärme.

Nahwärmeversorgung „Alte Ziegelei“  
2.7 Ergebnisse der Szenarien

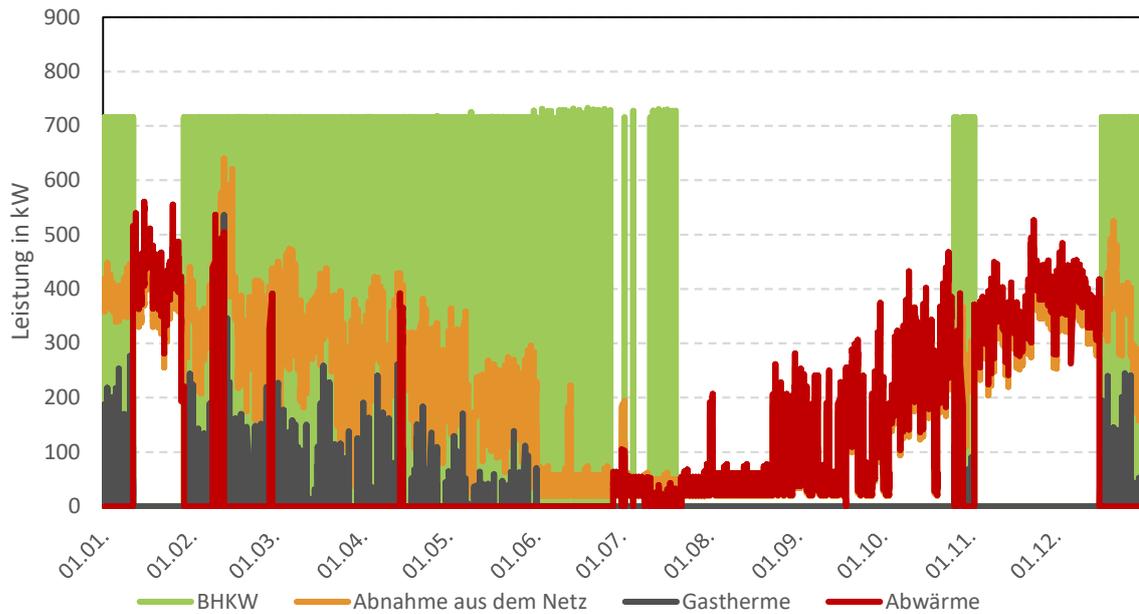


Abbildung 2.21: Lastprofil des Szenarios 4, in dem das BTZ über Abwärme und BHKWs das Gewerbegebiet versorgt

Die Laufzeit des BHKWs ist somit fiktiv unterteilt in Anteil für das Gewerbegebiet, wenn keine Abwärme da ist und Anteil für das BTZ, wenn Kampagne ist. Abbildung 2.22 zeigt die Laufzeit des BHKWs während der Kampagne, wenn es Wärme für das BTZ bereitstellt, und den Bedarf des BTZ in der Zeit. Der Verlauf ist gegengesetzt zu Abbildung 2.21. In dieser Auslegung, in dem die BHKWs insgesamt 2,7 GWh pro Jahr an Wärme für das BTZ zur Verfügung stellen können, decken diese knapp 24 % des Wärmebedarfs des BTZs.

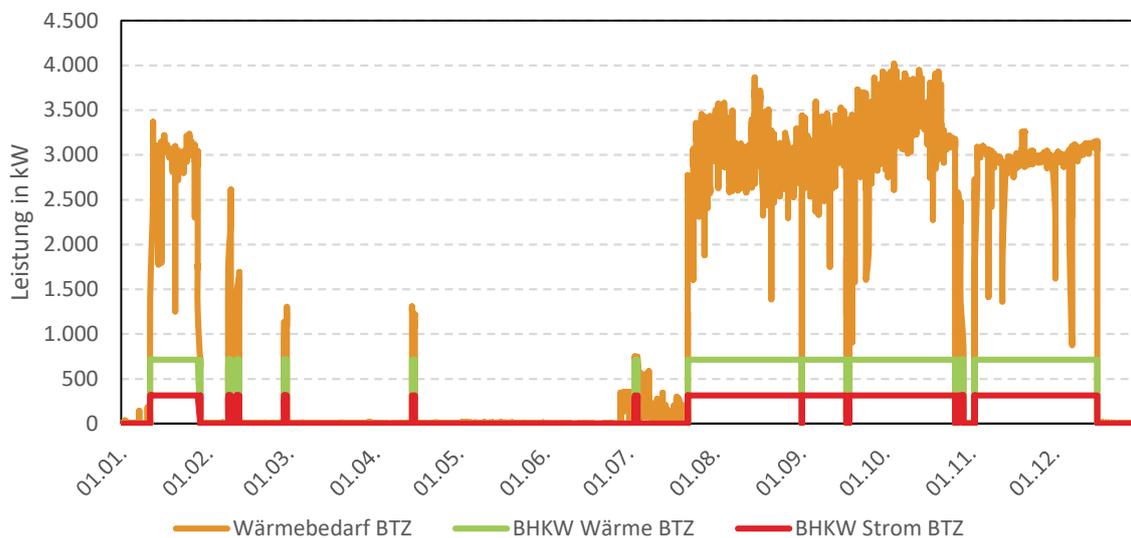


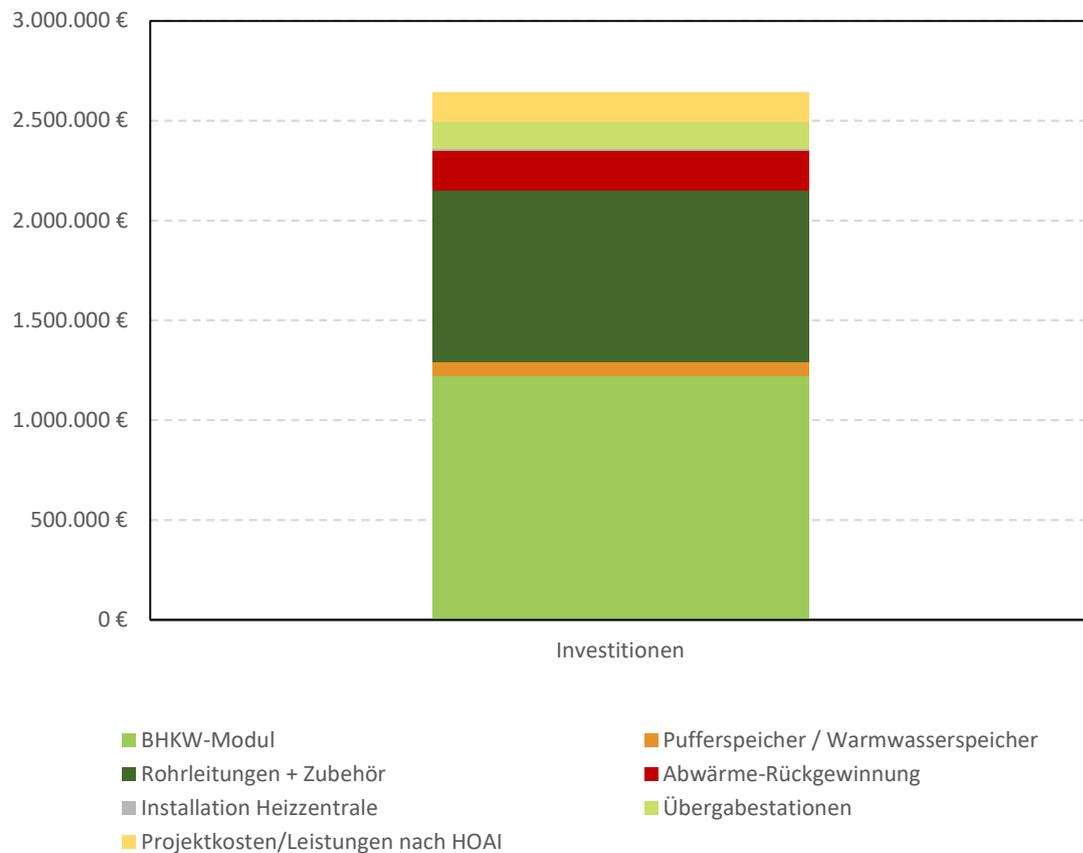
Abbildung 2.22: BHKW-Laufzeit und Wärmebedarf des Szenarios 4, aus Sicht des BTZ

Aus wirtschaftlicher Sicht ist in diesem Fall der Betreiber des Netzes das BTZ und trägt somit die Verantwortung der Versorgungssicherheit.

Die Investitionskosten werden vor allem durch die Kosten für das Netz sowie die Kosten für die BHKWs geprägt. Die Optimierung liefert für die zu installierende Leistung der BHKWs eine thermische Leistung von 715 kW<sub>th</sub>, was zu einer elektrischen Leistung von 315 kW<sub>el</sub> führt. Insgesamt kostet der Bau des Netzes und der Energieversorgung mit allem ca. 2,6 Mio. € (siehe Abbildung 2.23). Die

## Nahwärmeversorgung „Alte Ziegelei“ 2.7 Ergebnisse der Szenarien

Investitionskosten, die in die Berechnung des Wärmepreises einfließen, werden anteilig in Abhängigkeit der Laufzeiten Gewerbe vs. BTZ aufgeteilt

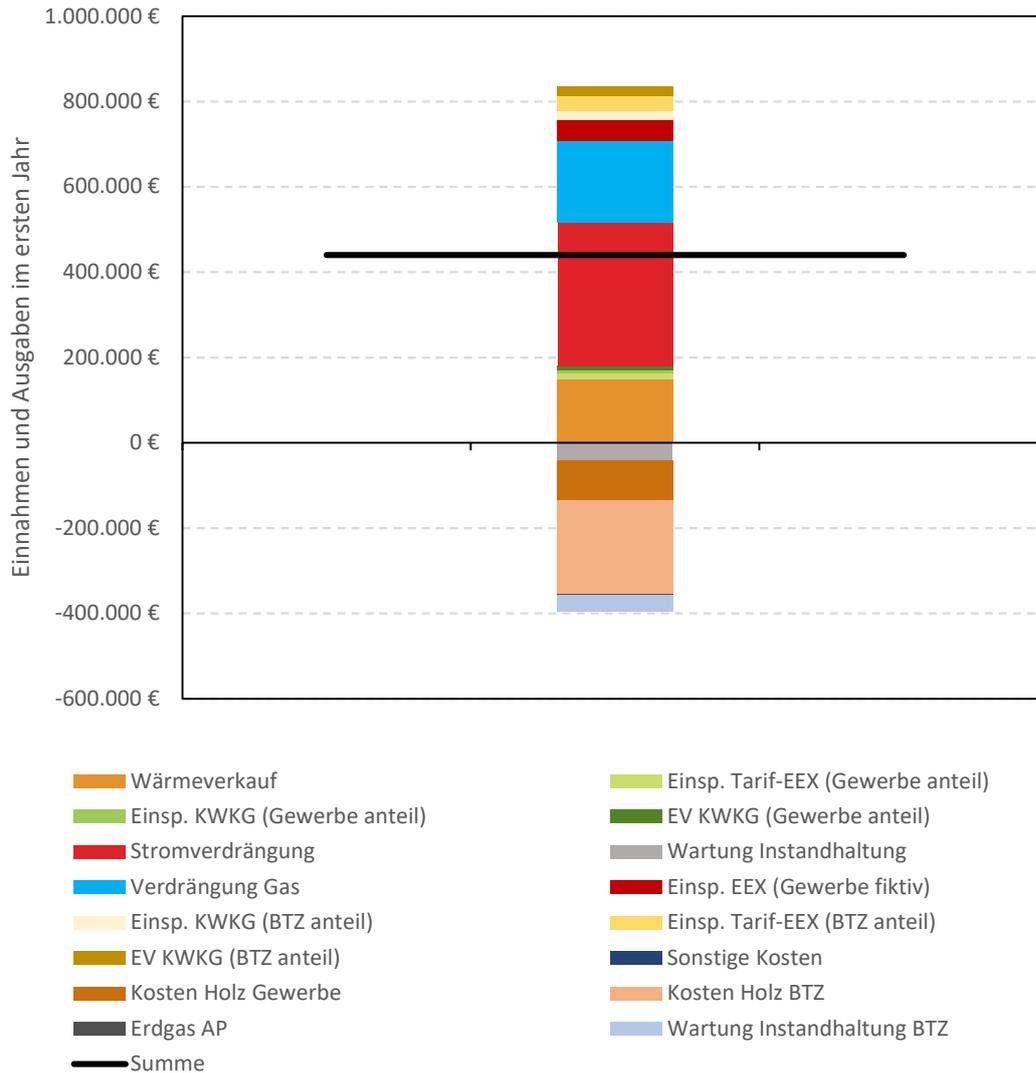


**Abbildung 2.23:** Investitionskosten von Szenario 4

Abbildung 2.24 zeigt die Einnahmen und Ausgaben im ersten Jahr. Die schwarze Linie stellt dabei die Differenz aus diesen beiden dar und ist das, was der Betreibergesellschaft (BTZ) pro Jahr übrigbleibt.

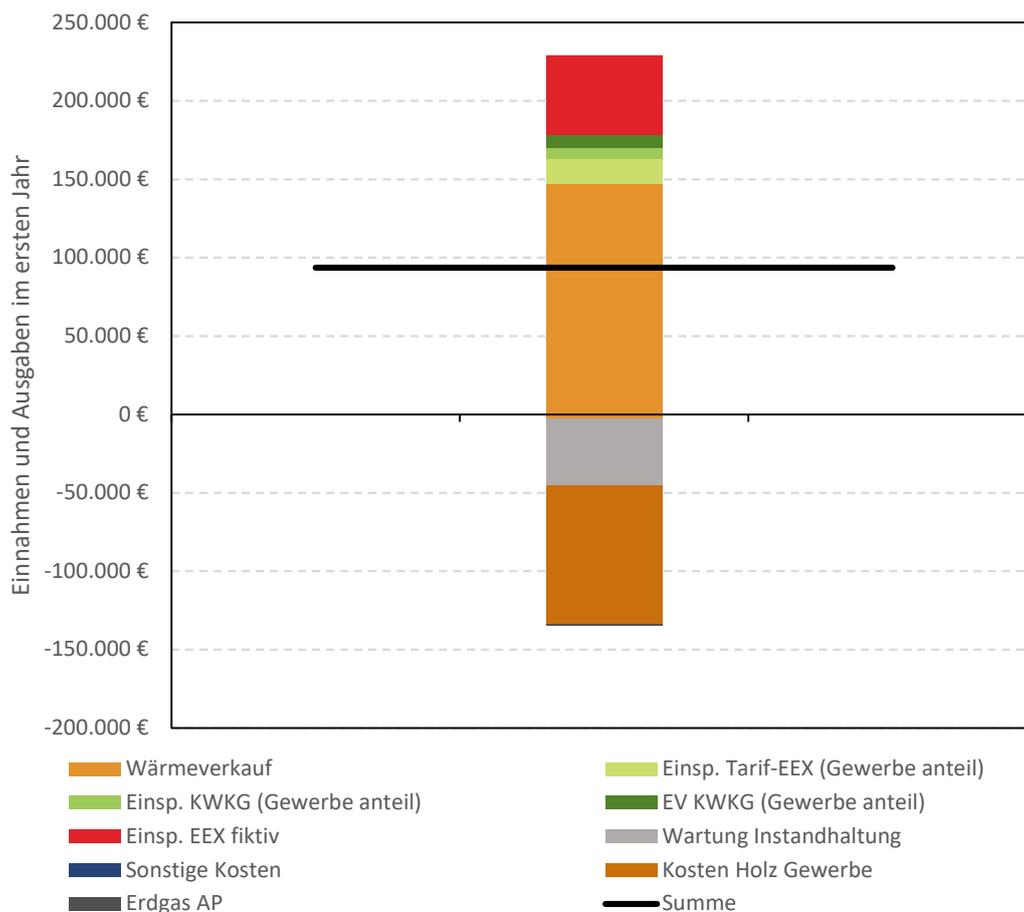
Mit diesen knapp 450.000 € sind die Abschreibungen gedeckt und kann Gewinn erwirtschaftet werden. Neben der Tatsache, dass für das BTZ ein wirtschaftlicher Betrieb relevant ist, ist auf der anderen Seite ein bezahlbarer Wärmepreis für die Anschlussnehmer aus dem Gewerbegebiet wichtig.

Nahwärmeversorgung „Alte Ziegelei“  
2.7 Ergebnisse der Szenarien



**Abbildung 2.24:** Einnahmen und Ausgaben im Szenario 4 pro Jahr für das komplette Energiesystem

Abbildung 2.24 zeigt nur die Einnahmen und Ausgaben isoliert, die während des Betriebes der BHKWs für das Nahwärmenetz sowie durch den Verkauf von Abwärme anfallen. Diese Einnahmen und Ausgaben bzw. die Differenz daraus (ca. 90.000 €) werden für die Abschreibung des Netzes und den BHKW-Anteil für das Gewerbegebiet eingesetzt. Haupteinnahmequelle ist der Wärmeverkauf, aber auch eine fiktive Stromeinspeisung, in der Zeit, wenn das BHKW für das Gewerbegebiet produziert, der Strom aber via Direktverbrauch vom BTZ genutzt wird. Das BTZ spart sich in der Zeit den Strombezug ein. Für die Berechnung des Wärmepreises wird in diese Zeit so getan, als würde zum Börsenpreis eingespeist. Dies reduziert den Betrag aus der Stromverdrängung für das BTZ, die nicht in die Berechnung des Wärmepreises eingehen, gleichzeitig reduziert dies aber auch den Wärmepreis für das Gewerbegebiet. In Summe bleiben die Einnahmen durch die BHKW-Stromproduktion in der Zeit, in der sie für das Gewerbegebiet laufen, gleich, aber es verhindert, dass das BTZ übermäßig Gewinn erwirtschaftet, während der Preis für das Gewerbegebiet hoch bleibt.



**Abbildung 2.25:** Einnahmen und Ausgaben isoliert betrachtet für das Gewerbegebiet, auf Basis dessen die Berechnung des Wärmeprices erfolgt

Da die Wirtschaftlichkeit in der Auslegung zwei Kernergebnisse hat, wird die Sensitivität zweier Ergebnisse näher beleuchtet. Zum einen zahlt sich das Energiesystem vor allem auch über die Stromverdrängung sowie Einspeisevergütung ab, weshalb die Rendite nicht vorzugegeben ist und als Aufschlag zum Wärmeverkaufspreis hinzuzurechnen ist, sondern sich über die Einnahmen ergibt. Je „besser“ die Anlage läuft, desto höher ist am Ende die jährliche Rendite auf die getätigte Investition. Von dieser Rendite profitiert das BTZ. Abbildung 2.26 zeigt den unterschiedlichen Einfluss von Einflussgrößen auf die Rendite des Vorhabens. Klar ist, dass der Einfluss der Energiepreise sehr hoch. Da zum einen die Ausgaben für Holz der größte Ausgabenpunkt ist und Einnahmen durch die Stromverdrängung am höchsten sind, ist deren Einfluss am größten. Der erzielbare Erlös durch den Quartalsmittelwert an der Strombörse EEX hat dagegen wenig Einfluss, da die eingespeiste Menge im Vergleich zum Eigenverbrauch gering ist.

Im Vergleich zu Szenario 1a (das am ehesten mit Szenario 4 vergleichbar ist) ist das Energiesystem sensibler auf eine Änderung eines jeweiligen Energiepreises. Das rührt daher, dass das Energiesystem in Szenario 4 mehr verschiedene Einnahmequellen hat und somit sensibel auf eine Änderung einer Einnahmequelle ist. Die Veränderung pro 10 % Preisänderung liegt bei Gas, Strom und Holzhackschnitzel bei ca. 1,5 % Senkung bzw. Erhöhung der Rendite.

Nahwärmeversorgung „Alte Ziegelei“  
2.7 Ergebnisse der Szenarien

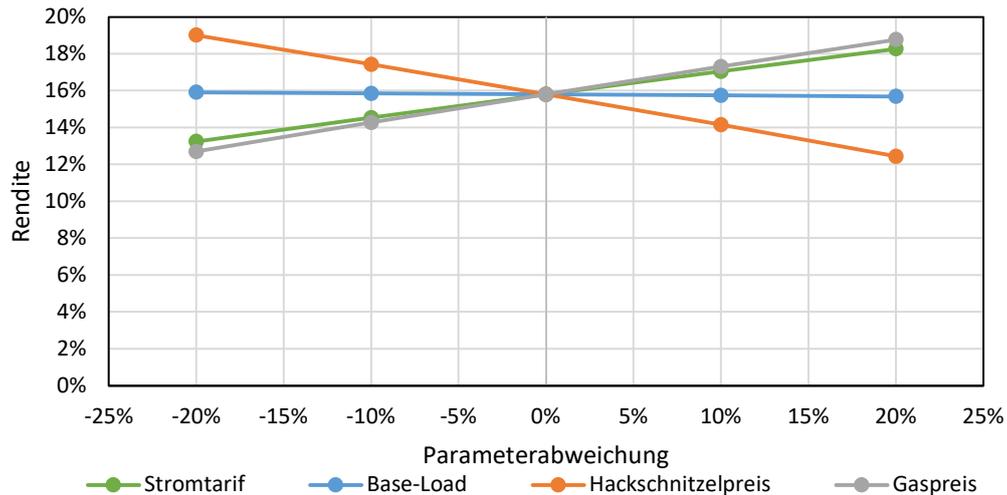


Abbildung 2.26: Sensitivitätsanalyse der erzielbaren Rendite in Szenario 4

Auf der anderen Seite ist für das Energiesystem essenziell, dass der Wärmepreis für das Gewerbegebiet konkurrenzfähig oder sogar besser ist. Eine Abnahme wird in der Realität nur dann stattfinden, wenn die Preise auch attraktiv sind, weshalb dieser Punkt ebenfalls einer Sensitivitätsanalyse unterzogen wird.

Abbildung 2.27 zeigt, dass die Herangehensweise zur Berechnung des Wärmepreises stark durch den fiktiven Verkauf des Stromes, in der Zeit in dem die BHKW beim BTZ zwar Wärme für das Gewerbegebiet produziert, aber das BTZ-Strom für sich nutzt, starken Einfluss hat. Auf der anderen Seite soll der nicht vorhandene Einfluss des Strombezugstarifs, der für die Berechnung der Höhe der Stromverdrängung ausschlaggebend ist, zeigen, dass dieser nur für die Berechnung der Rendite eine Rolle spielt, die Einnahmen daraus aber nicht für die Berechnung des Wärmepreises herangezogen werden.

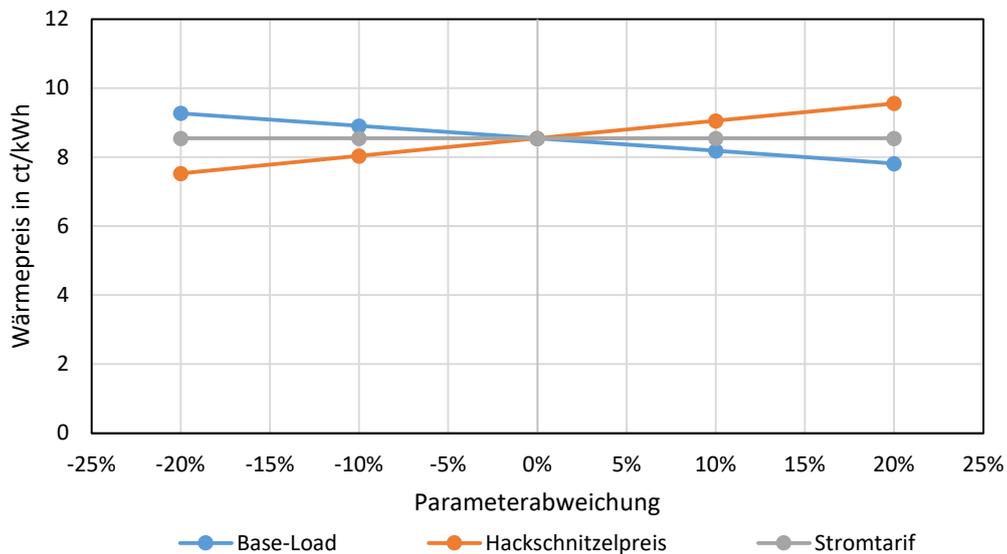


Abbildung 2.27: Sensitivitätsanalyse hinsichtlich Wärmepreis des Gewerbegebietes in Szenario 4

### 2.7.6 Szenario 5a

Ein weiteres Szenario, das betrachtet wird, ist wie folgt aufgebaut. Das Gewerbegebiet hat die Energiezentrale installiert und versorgt primär sich mit Wärme. Die BHKWs werden dabei auf die thermische Maximalleistung ausgelegt. D. h. nur selten im Jahr produziert das BHKW komplett nur für das Gewerbegebiet. In der restlichen Zeit produziert das BHKW dennoch mit voller Leistung und

versorgt mit den Überschüssen über ein Netz das BTZ. Der Vorteil bei dieser Auslegung ist, dass das BHKW voll ausgelastet wird und auch keine Überdimensionierung stattfindet. Nachteil ist, dass das BTZ nur mit einem geringen Anteil aus den BHKWs versorgt wird, ein hoher Anteil an Erdgas weiterhin bestehen bleibt.

Es wird angenommen, dass der Strom, der erzeugt wird, zunächst vor Ort im Gewerbegebiet verbraucht wird. Hier verkauft der Betreiber der Energiezentrale Strom an die Mieter der Gewerbeeinheiten. Dazu ist ein Arealnetz zu errichten. Dies bedeutet, dass es nur eine Übergabestation von der Zentrale zum öffentlichen Netz gibt. Der Betreiber der Energiezentrale tritt dabei als Energieversorger auf und kauft Strom (Restbezug) ein und verteilt diese an seine Kunden. Auf diese Weise kann der Strom von den BHKWs innerhalb des Gewerbegebietes so gut es geht verwendet werden. Überschussstrom wird in das öffentliche Netz eingespeist und für jede Kilowattstunde wird die Einspeisevergütung sowie der Quartalsmittelwert erwirtschaftet.

Abbildung 2.28 zeigt das Lastprofil des Energiesystems. In der Zeit, in der nur das Gewerbegebiet versorgt wird, ist eine deutliche Taktung festzustellen, in denen das BHKW für kurze Zeit die Energieversorgung aufrechterhält, aber durch den Einsatz eines Pufferspeichers ausschalten kann. In der Zeit der Kampagne dagegen läuft das BHKW unter Volllast und versorgt das Gewerbegebiet und mit den Überschüssen das BTZ. Die Summe aus der gelben Linie und der grünen Linie ergibt in etwa die Leistung des BHKWs (der Puffer ist in dieser Betrachtung nicht dabei).

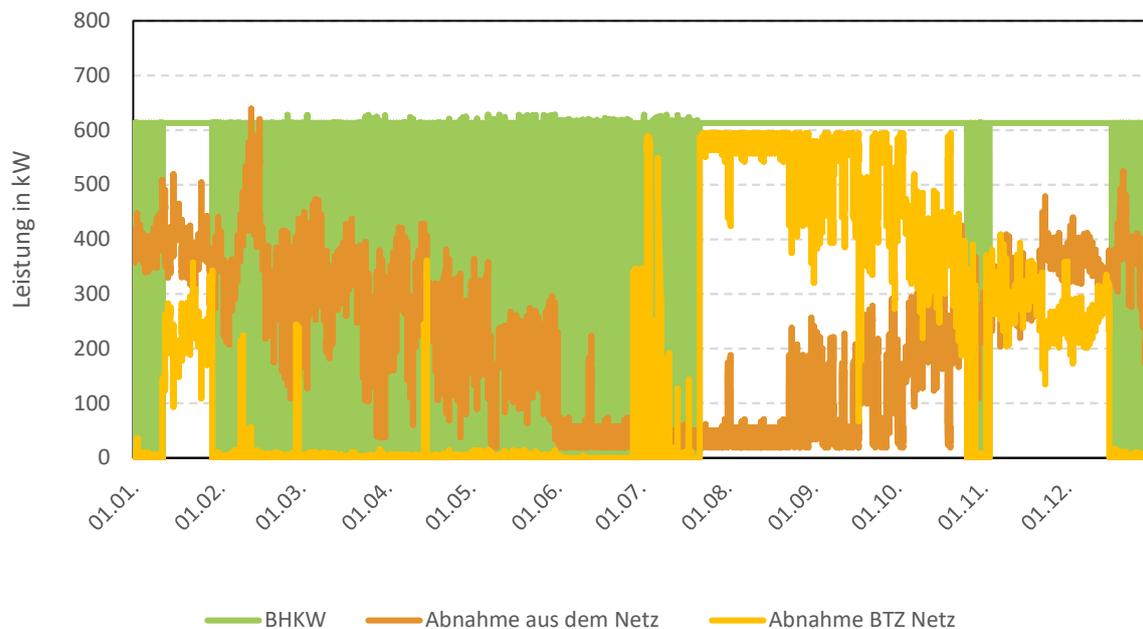


Abbildung 2.28: Lastprofilausschnitt des Szenario 5a

Abbildung 2.29 zeigt das sortierte Lastprofil der Energieerzeuger sowie des Verbrauches (Jahresdauerlinie), wobei die Flächen als auch die Linien gestapelt sind, d. h. sie werden addiert. Es ist zu erkennen, dass die Leistung des BHKWs (graue Linie) circa der maximalen Leistung des Gewerbegebietes entspricht. Durch die Herangehensweise mit den Überschüssen über einen Pufferspeicher das BTZ zu versorgen, ist eine Laufzeit von über 5500 Volllaststunden möglich, in denen die BHKWs effizient Wärme produzieren als auch Strom einspeisen. Es ist zudem erkennbar, dass eine Erhöhung der Leistung die Zeiten mit einer Überdeckung des Gebietes erhöht (weiße Fläche unterhalb der gelben Linie). Ein Puffer kann dies in gewissen Maßen ausgleichen, dennoch sind am Ende die BHKWs weniger ausgelastet, was deren Wirtschaftlichkeit reduziert.

Nahwärmeversorgung „Alte Ziegelei“  
2.7 Ergebnisse der Szenarien

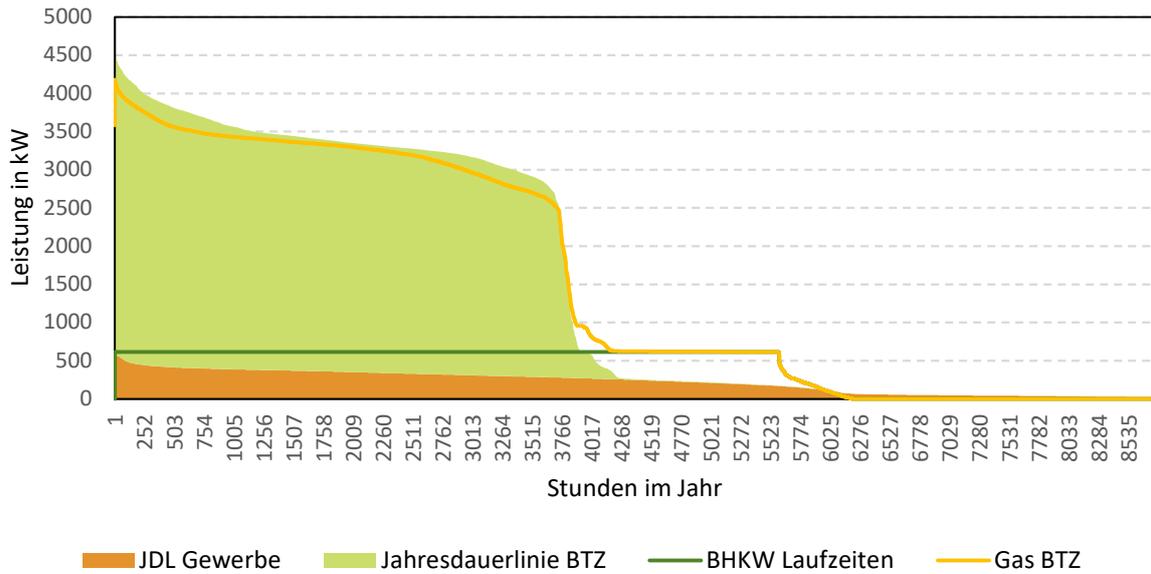


Abbildung 2.29: Jahresdauerlinie des zu versorgenden Gebietes (BTZ+ Gewerbe) und Laufzeiten der Energieerzeugung

Energetisch betrachtet versorgt auf diese Weise das BHKW 99 % mit Wärme. Zusätzlich produziert das BHKW das BTZ mit 1,6 GWh/a Wärme, was etwa 14 % der Wärme des BTZ entspricht.

Das BHKW produziert ca. 1,5 GWh/a Strom, von denen ca. 0,4 GWh/a vor Ort verbraucht werden, während ca. 1,1 GWh/ingespeist werden. Die zu installierende BHKW-Leistung entspricht 610 kW<sub>th</sub> und 270 kW<sub>el</sub>. Für das Netz sowie für die Energiezentrale sind Investitionskosten von 2,25 Mio. € notwendig, bei denen vor allem die BHKWs und der Bau des Netzes die größten Positionen sind (siehe Abbildung 2.30).



Abbildung 2.30: Investitionskosten des Szenarios 5a

Abbildung 2.31 zeigt die Einnahmen und Ausgaben gegenübergestellt. Die Summe bzw. Differenz stellt dabei den Betrag dar, der zur Abzahlung der Abschreibung sowie der Rendite genutzt wird.



**Abbildung 2.31:** Einnahmen und Ausgaben im Jahr 1 des Szenarios 5a

Um sowohl die Abzahlung als auch eine Rendite zu erwirtschaften, ist sowohl vom BTZ als auch vom Gewerbegebiet ein gewisser Wärmepreis zu erzielen. Dieser beträgt in einer Vollkostenbetrachtung 10,4 ct/kWh.

Ausgehend davon wird in der Sensitivitätsanalyse untersucht, welchen Einfluss Veränderungen von Annahmen auf den Wärmepreis haben. Anders als in den Szenarien 1-4 ist Sensitivität auf Änderungen in diesem Szenario gering. Den größten Einfluss hat der Preis für Hackschnitzel mit 0,8 ct/kWh je 10 % Veränderung.

Die Sensitivität dieses Szenarios ist deshalb gering, da ein großer Teil des Stromes eingespeist wird und daher eine Änderung der Bezugspreise (es wird mit dem Verkauf von BHKW-Strom mehr verdient) geringe Auswirkung hat.

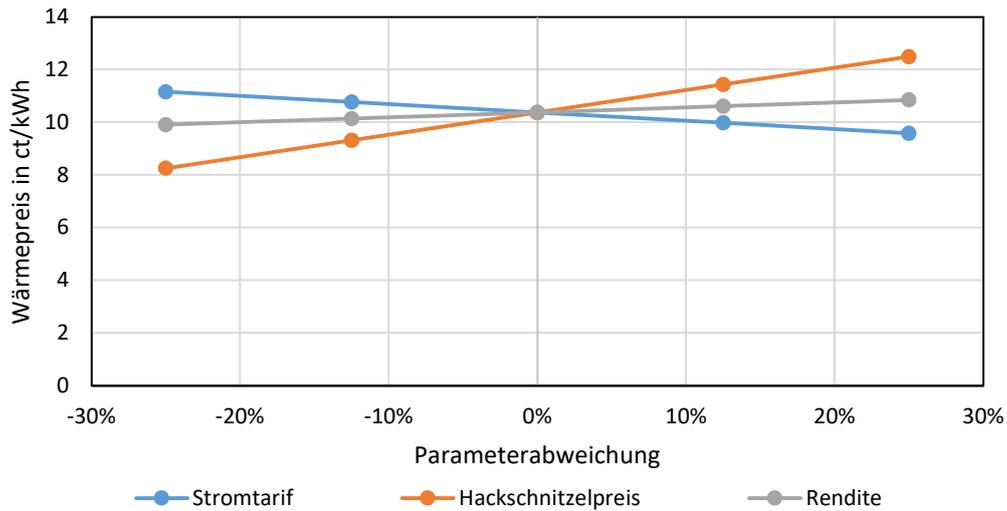


Abbildung 2.32: Sensitivitätsanalyse des Szenarios 5a

### 2.7.7 Szenario 5b

Es werden BHKWs mit einer thermischen Gesamtleistung von 3,2 MW und eine Gastherme mit einer maximalen Leistung von 1 MW sowie Pufferspeicher mit einem gesamten Energieinhalt von 130 kWh installiert. Die BHKWs sind auf den Gesamtwärmebedarf des BTZ und Gewerbegebiets ausgelegt.

In Abbildung 2.33 ist der Jahresverlauf des Wärmebedarfs des BTZ und des Gewerbegebiets sowie die Bereitstellung der Wärme durch die BHKWs, Gastherme und Pufferspeicher dargestellt. Die BHKWs decken ca. 95% des thermischen Jahresbedarfs. Die Gastherme deckt während der Kampagne die Spitzenlast. Der Pufferspeicher dient besonders in den Sommermonaten dazu, häufige An- und Ausschaltvorgänge der BHKWs zu reduzieren. Abbildung 2.33 zeigt den monatlichen Wärmebedarf und die -erzeugung. Der höchste Wärmebedarf tritt im Oktober mit 2,4 MWh auf und der geringste im Juni mit 0,5 MWh.

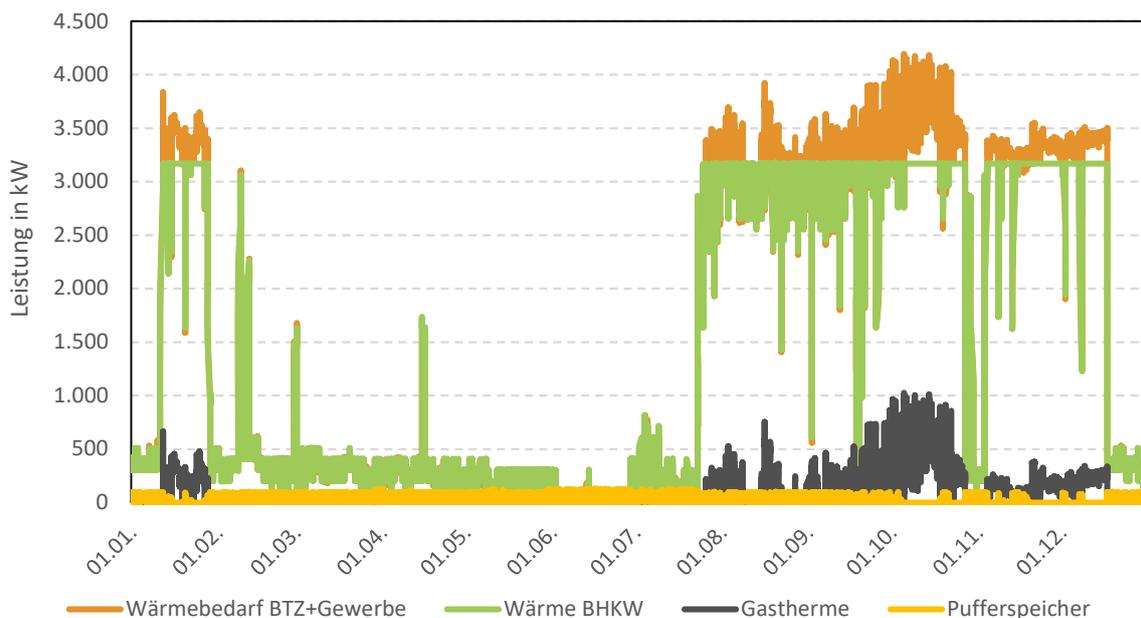


Abbildung 2.33: Wärmesektor Jahresverlauf in Szenario 5b

Nahwärmeversorgung „Alte Ziegelei“  
2.7 Ergebnisse der Szenarien

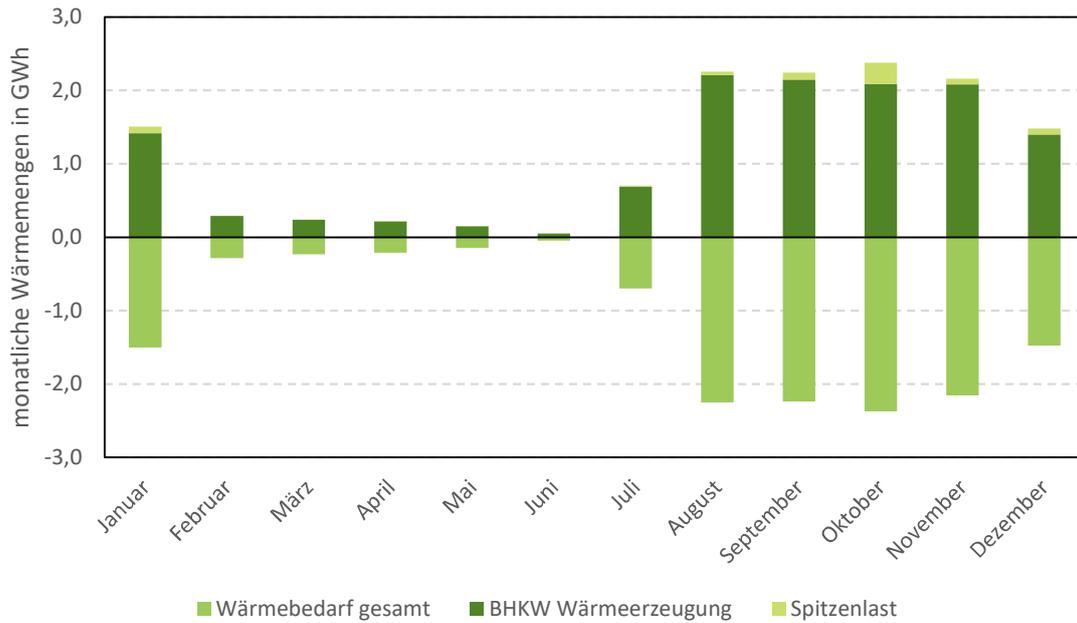


Abbildung 2.34: Wärmesektor monatlich Szenario 5b

Die BHKWs erzeugen in einem Jahr insgesamt ca. 5.700 MWh Strom und ca. 12.950 MWh Wärme. Abbildung 2.35 zeigt die monatliche elektrische Bereitstellung und den elektrischen Bedarf. Außerhalb der Kampagne muss der Strombedarf zusätzlich durch Netzbezug gedeckt werden. Insgesamt werden ca. 30 MWh des elektrischen Bedarfs über das Netz gedeckt. Damit ergibt sich ein Autarkiegrad von 96 %.

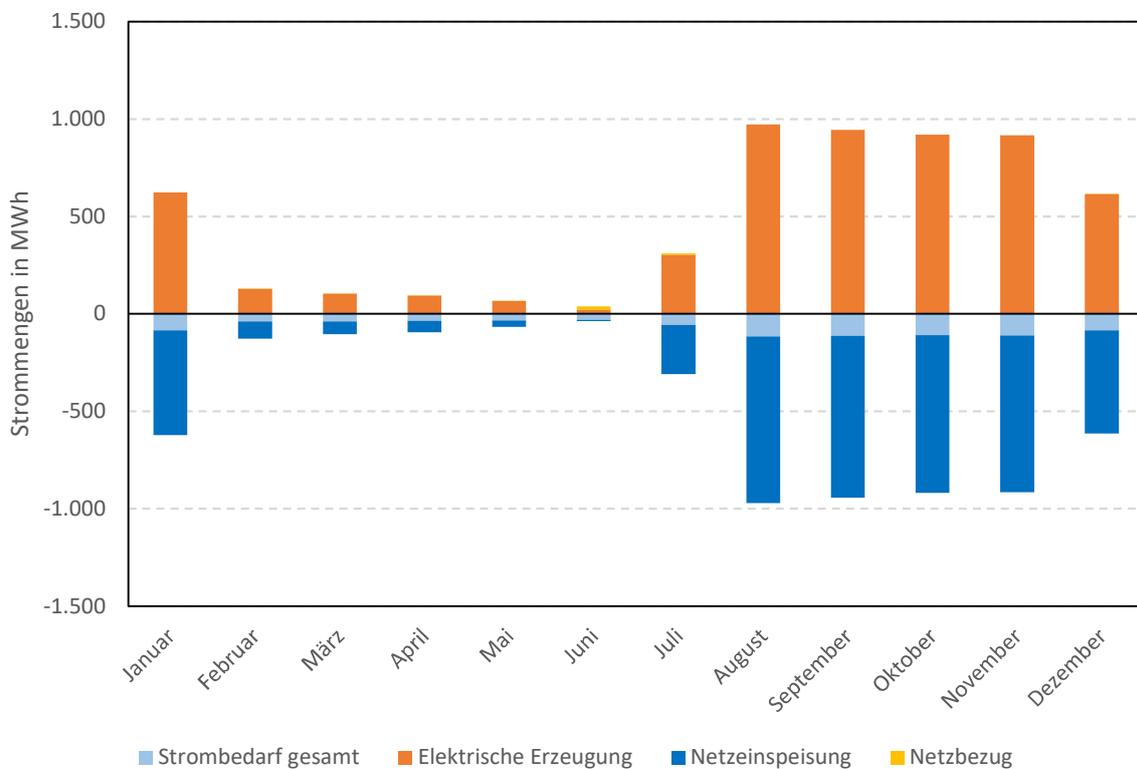


Abbildung 2.35: Stromsektor monatlich in Szenario 5b

Der Stromüberschuss der BHKWs wird ins Netz eingespeist (s. Abbildung 2.36). Die hohen Einspeisungsmengen, besonders in den Monaten August bis Januar ergeben sich daraus, dass die

## Nahwärmeversorgung „Alte Ziegelei“ 2.7 Ergebnisse der Szenarien

BHKWs während der Kampagne hohe Leistungen erbringen, um den thermischen Bedarf zu decken und hohe Stromüberschüsse entstehen. Insgesamt werden jährlich ca. 4.900 MWh Strom eingespeist und 830 MWh direkt verbraucht, was einem Eigennutzungsgrad von 15 % entspricht.

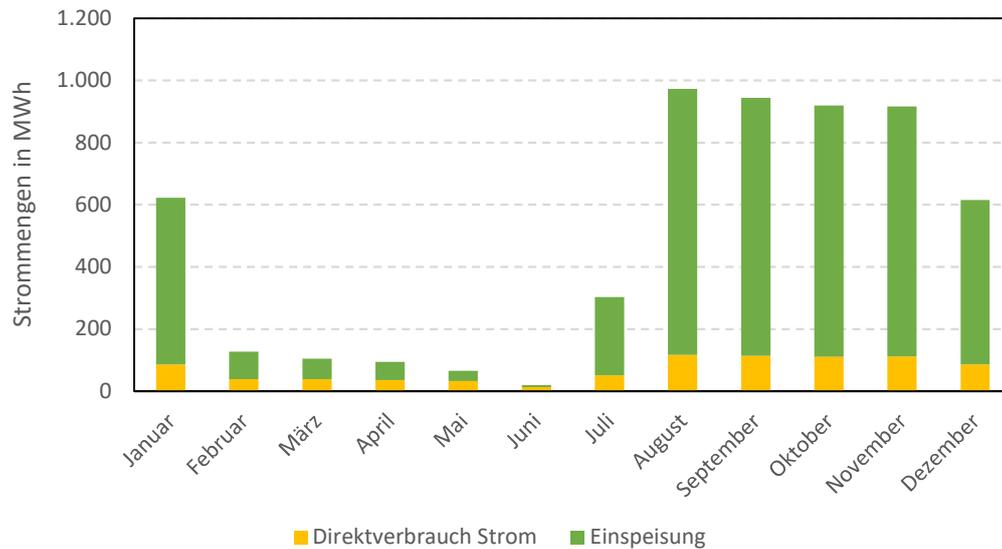


Abbildung 2.36: Stromdirektverbrauch und -einspeisung BHKWs Szenario 5b

Das Gewerbegebiet und BTZ werden mit 31 BHKWs mit einer thermischen Leistung von je 102 kW und mit einer elektrischen Leistung von je 45 kW sowie einem Spitzenlastkessel mit einer thermischen Leistung von 225 kW versorgt. Das Gas für die BHKWs wird von einem Holzvergaser (HV) produziert. Die erzeugte Wärme kann mit Pufferspeichern in jedem Gebäude mit je 300 l zwischengespeichert werden. Die Investitionskosten der Komponenten und ihre Leistung sind in der Tabelle 2.6 dargestellt.

Tabelle 2.6: Anlagengrößen und Investitionskosten Szenario 5b

Komponente	Leistung/Kapazität	Kosten
HV + BHKW	31 x 102 kW <sub>th</sub> = 3168 kW <sub>th</sub> 31 x 45 kW <sub>el</sub> = 1395 kW <sub>el</sub>	5.456.000 €
Gastherme	1027 kW <sub>th</sub>	0 €
Pufferspeicher	19 x 300 l = 5700 l 19 x 7 kWh = 133 kWh	15.770 €

Zu den Investitionskosten kommen noch 10.000 € für die Installation der Heizzentrale, 133.000 € für die Hausübergabestationen, 855.000 € für die Rohrleitungen und 140.000 € für die Projektkosten. Insgesamt ergeben sich damit Investitionskosten von ca. 6,6 Millionen €.

Die jährlichen Betriebskosten setzen sich aus 136.800 € Instandhaltung, 10.000 € Wartung und 203.000 € Betriebsführung zusammen. Die jährlichen Kosten für den Bezug des Holzes betragen 1.035.000 € und 88.000 € für den Gas Bezug.

Jährlich werden durch den Verkauf der Wärme an BTZ und Gewerbegebiet Einnahmen von ca. 1.255.000 € generiert. Durch die Stromerzeugung der BHKWs können 120.000 € Netzbezugskosten eingespart werden. In den ersten acht Jahren wird die Stromeinspeisung durch die BHKWs mit 725.000€ vergütet, anschließend sinkt diese, mit Wegfallen der BHKW-Förderung, auf 485.000 €.

Die Einnahmen und Ausgaben im ersten Jahr sind in Abbildung 2.37 abgebildet.

Nahwärmeversorgung „Alte Ziegelei“  
2.7 Ergebnisse der Szenarien

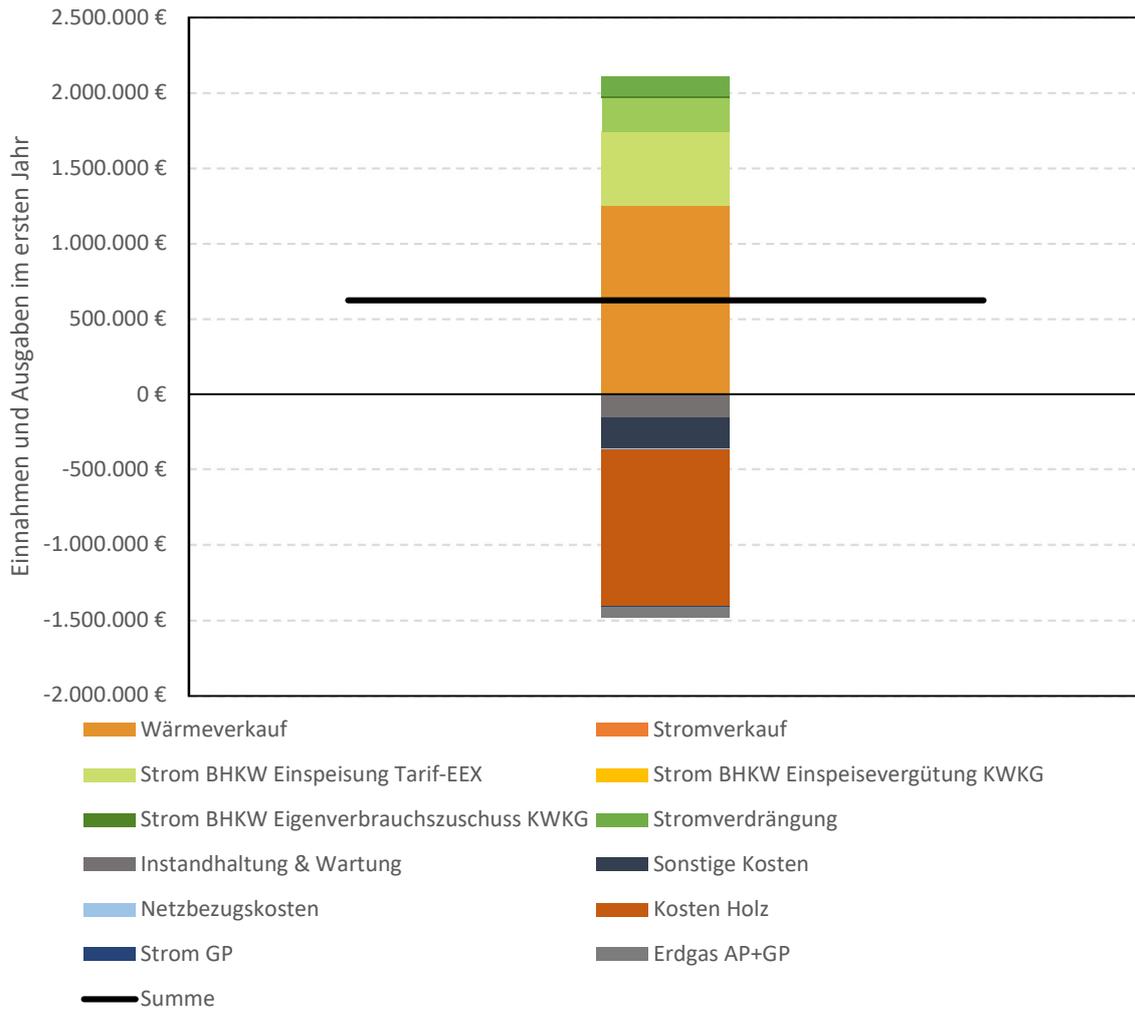


Abbildung 2.37: Einnahmen und Ausgaben im ersten Jahr Szenario 5b

Diese Einnahmen und Ausgaben ergeben einen kumulierten Cash-Flow über 20 Jahre, der in Abbildung 2.38 dargestellt ist. Ab dem Jahr 7 ist ein kleiner Knick erkennbar, der durch den Wegfall der KWKG-Vergütungen nach 30.000 Vollbetriebsstunden begründet ist.

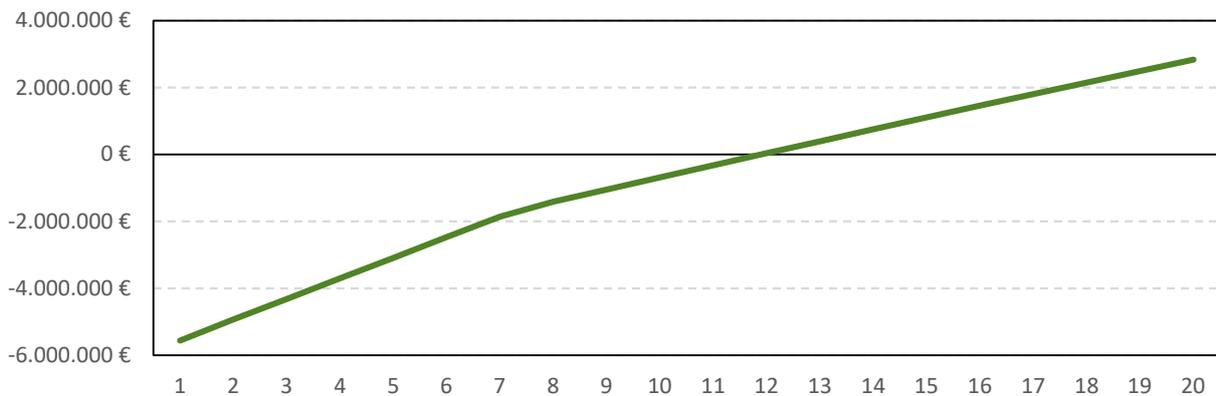


Abbildung 2.38: kumulierter Cash-Flow über 20 Jahre Szenario 5b

In diesem Szenario entstehen durch den Holz-, Gas- und Strombezug Emissionen von 1.200 t CO<sub>2</sub> pro Jahr. Der Eigenverbrauch des BHKW-Stroms und die Stromverdrängung durch die Einspeisung des BHKW-Stroms werden jährlich 2.500 t CO<sub>2</sub> eingespart. Damit ergeben sich jährliche Einsparungen von ca. 1.500 t CO<sub>2</sub>. Abbildung 2.39 zeigt die Entstehung und Einsparungen der Emissionen pro Jahr.

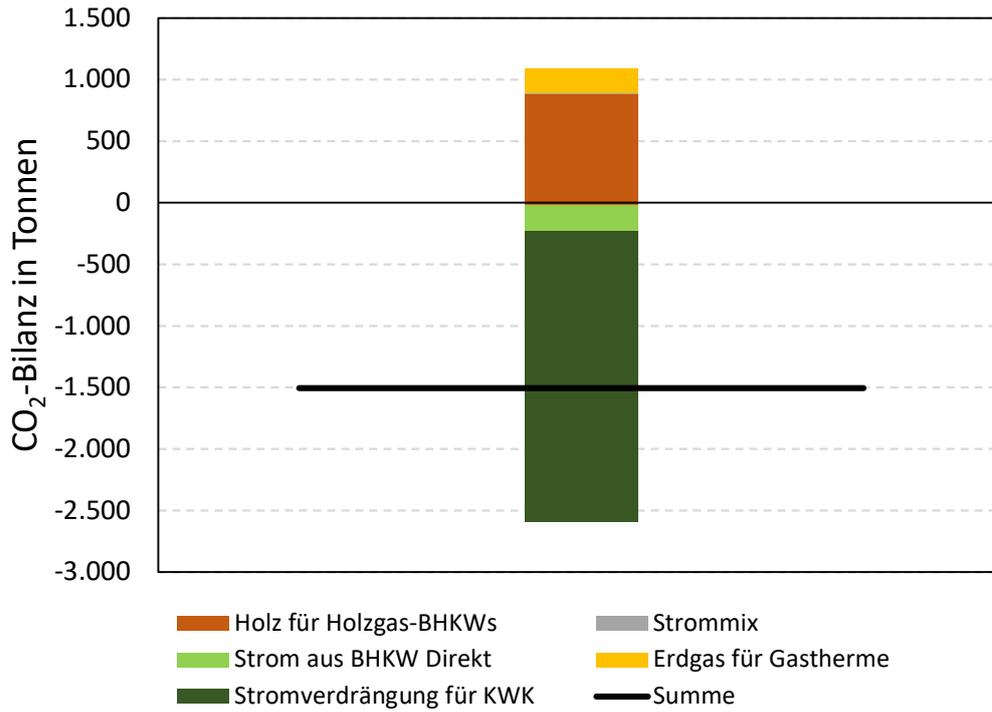


Abbildung 2.39: CO<sub>2</sub>-Bilanz Szenario 5b

## 2.8 Szenarienvergleich

In diesem Abschnitt werden alle Szenarien und deren Ergebnisse gegenübergestellt, um ein Gefühl für die Dimensionen der einzelnen Szenarien zu bekommen.

Tabelle 2.7 zeigt eine tabellarische Übersicht über die wichtigsten Ergebnisse der Szenarien im Vergleich.

**Tabelle 2.7:** Kurzübersicht über die wichtigsten Ergebnisse der betrachteten Szenarien

	Basis	Szenario 1a	Szenario 1b	Szenario 2	Szenario 4	Szenario 5a	Szenario 5b
Wo steht die Energiezentrale?	Gewerbe	BTZ	BTZ	Gewerbe	BTZ	Gewerbe	Gewerbe
Wer wird mit Wärme versorgt?	Gewerbe	BTZ	BTZ	Gewerbe, BTZ mit Gas	Beide	beide	beide
Wer wird mit Strom versorgt?	Gewerbe	BTZ	BTZ	Gewerbe	BTZ	Gewerbe	Gewerbe, aber Großteil Netzeinsp.
Anteil Holzgas an Wärme BTZ	0%	16%	98 %	18 %	24 %	14 %	96%
Investitionskosten in €	1,4 Mio.	ca. 1,2 Mio.	ca. 6,3 Mio.	min. 12 Mio.	ca. 2,6 Mio.	ca. 2,25 Mio.	ca. 6,6 Mio.
Wärmepreis Gewerbe in ct/kWh	10,3	-	-	33,17	8,55	10,4	9,3
Wärmepreis BTZ aus BHKW in ct/kWh	-	-	-	-	-	10,4	9,3
Einsparungen/ Einnahmen BTZ in €/a	-	180.000	650.000	- 379.000	335.000	110.000	290.000

Abbildung 2.40 zeigt die installierten BHKW-Leistungen in den einzelnen Szenarien, unterteilt in thermische sowie elektrische Leistung. Die elektrische Leistung folgt dabei der thermischen, d. h. die beiden stehen immer in einem konkreten Verhältnis. Vor allem in den Szenarien 1b und 5b ist die Leistung der BHKWs sehr hoch, um den Bedarf des Jahres zum Großteil zu decken. Der Rest zur Leistungsspitze ist durch den vorhandenen Gasbrenner im BTZ zu decken.

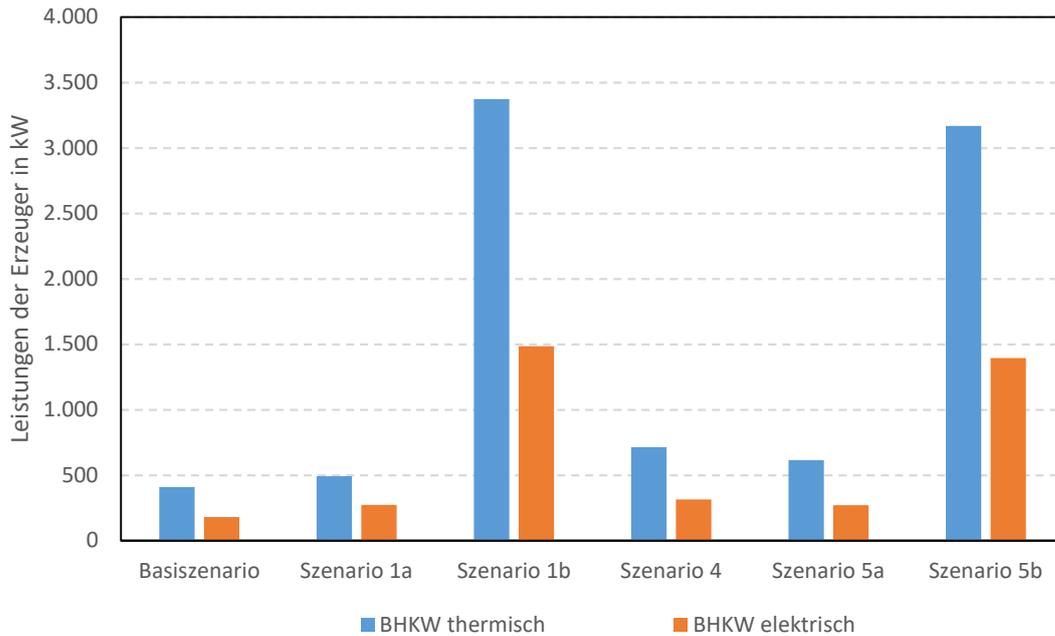


Abbildung 2.40: Leistungen der Erzeuger, Szenarienvergleich

Abbildung 2.41 zeigt einen Überblick je Szenario, wie der Strom verwendet wird, bzw. aus welcher Quelle der jeweilige Strom gedeckt wird. Das ist wichtig, denn der Strom ist der Treiber der Wirtschaftlichkeit, entweder aus Sicht der Rendite bzw. zur Quersubventionierung der Wärme und somit zur Reduktion des Wärmepreises. Der BHKW-Strom hat vier Senken,

- er kann eingespeist werden,
- er wird als Eigenverbrauch für die Holzvergaser verbraucht.
- er wird, wenn die Energiezentrale im Gewerbegebiet steht, dort verbraucht,
- oder im anderen Fall im BTZ verbraucht.

Umgekehrt wird auch dargestellt, wie viel Strom am Ende, je nachdem wo die Energiezentrale steht, aus dem Netz bezogen wird. Je größer die installierte Leistung, desto höher ist auch der Eigenbedarf, der direkt für die Holzvergaser verwendet wird.

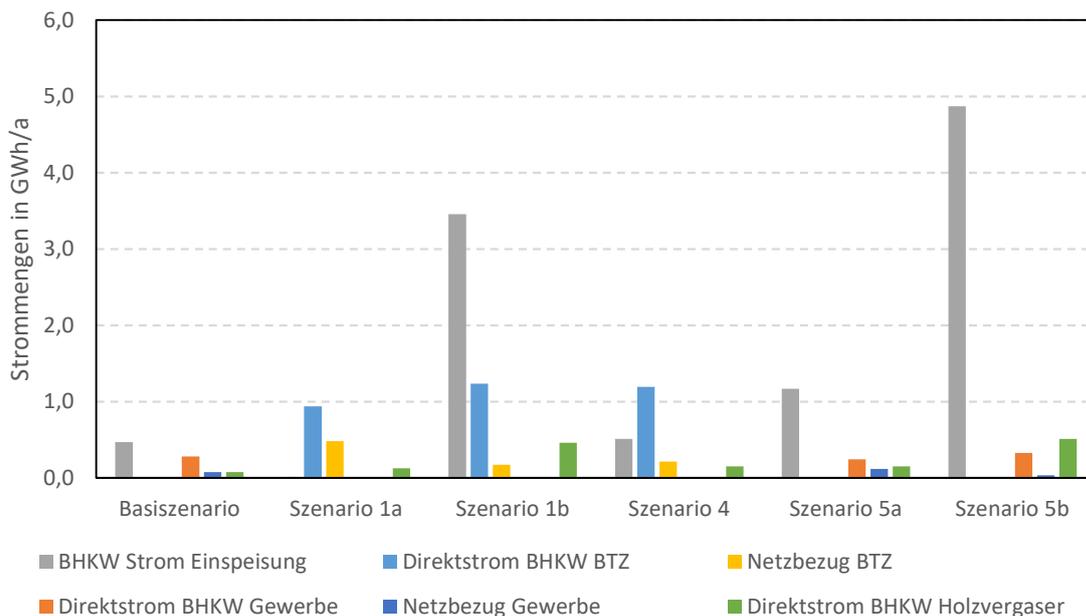
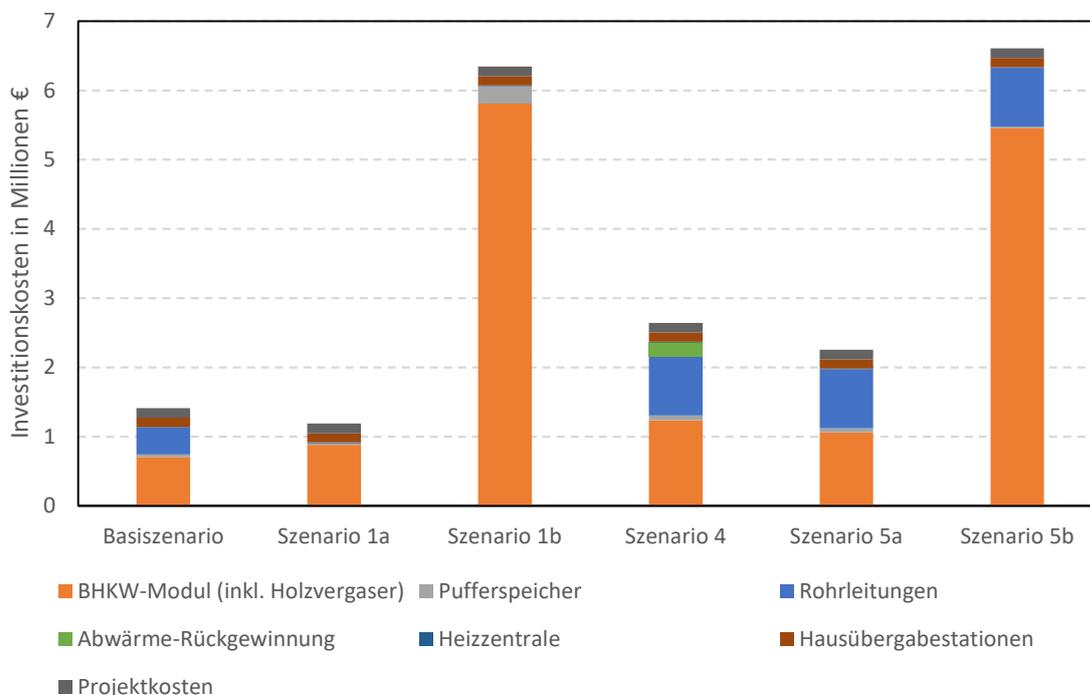


Abbildung 2.41: Strommengen, Szenarienvergleich

Abbildung 2.40 führt die installierte Leistung der BHKWs auf, was in jedem Szenario die Haupttreiber der Investitionskosten sind. Abbildung 2.42 stellt diese Investitionskosten der Szenarien in Vergleich. Dabei sind diese unterteilt in die einzelnen Positionen. Neben den Kosten für BHKWs inkl. Vergasereinheiten ist der weiterhin größte Kostenpunkt der Bau des Netzes, der nur in Szenario 1a und 1b nicht anfällt. In Szenario 4, 5a und 5b ist dieser im Vergleich zu dem Basisszenario höher, da noch die Rohrleitung zwischen dem BTZ und dem Gewerbegebiet gelegt wird.



**Abbildung 2.42:** Investitionskosten, Szenarienvergleich

Für eine wirtschaftliche Auslegung ist eine positive Bilanz notwendig, so dass sich die Investition über die Laufzeit abbezahlt (amortisiert) und bestenfalls eine Rendite erwirtschaftet werden kann.

Abbildung 2.43 zeigt die Bilanz aus Einnahmen und Ausgaben, die ebenfalls in den Abschnitten 2.7.1 bis 2.7.7 detailliert aufgeschlüsselt werden. Der Gewinn, der pro Jahr erwirtschaftet wird (schwarze Linie), dient zum einen zur Deckung der Abschreibung, aber auch zum anderen zur Erwirtschaftung einer Rendite.

Nahwärmeversorgung „Alte Ziegelei“  
2.8 Szenarienvergleich

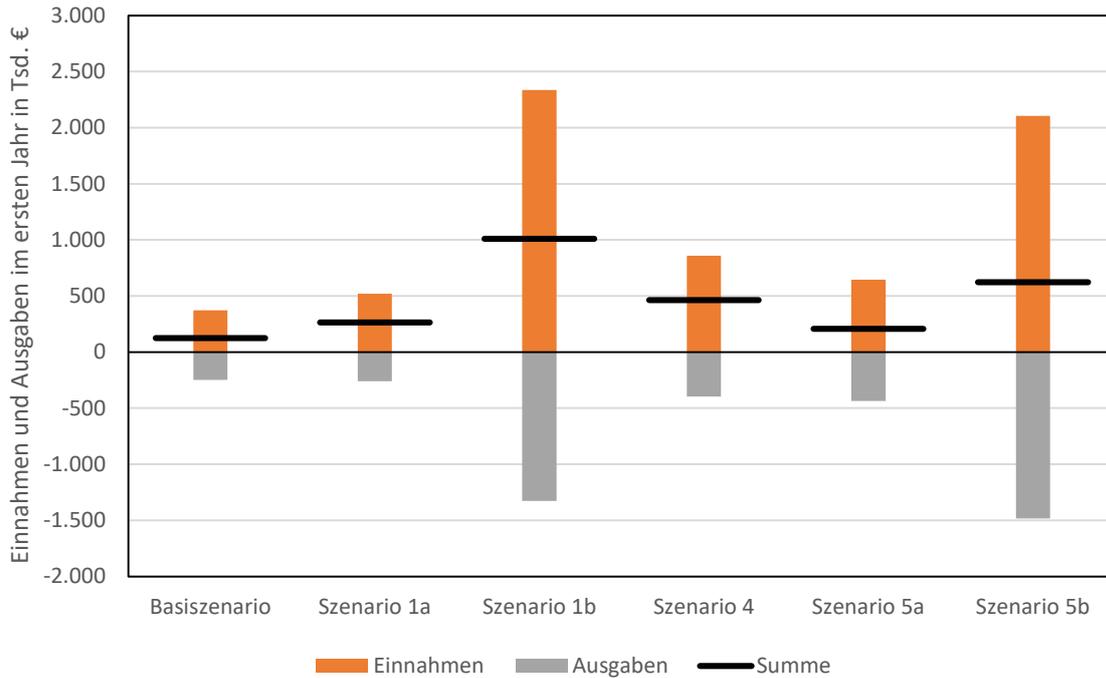


Abbildung 2.43: Einnahmen und Ausgaben im ersten Jahr, Szenarienvergleich

Aus den Einnahmen und Ausgaben ergeben sich der kumulierte Cash-Flow. Hier wird die Differenz pro Jahr zu den Investitionskosten addiert. Alle Szenarien starten in Jahr 0, also im Jahr der Investition mit einem negativen Betrag, der Summe der Investitionskosten. Es ist zu erkennen, wie schnell sich die jeweiligen Szenarien amortisieren, d. h. bis die Jahresüberschüsse die Investitionskosten abgedeckt haben und Gewinn erwirtschaftet wird. Da sich die Szenarien durch verschiedene Betreibermodelle unterscheiden, ist auch die Amortisation (=Rendite) unterschiedlich. Während im Basiszenario, in Szenario 5a und 5b die Rendite vorgegeben ist und somit die Amortisation zur selben Zeit erreichen, zahlen sich die Szenarien 1a, 1b und 4 unterschiedlich schnell ab. Je schneller die Nulllinie erreicht ist, desto höher ist die Rendite.

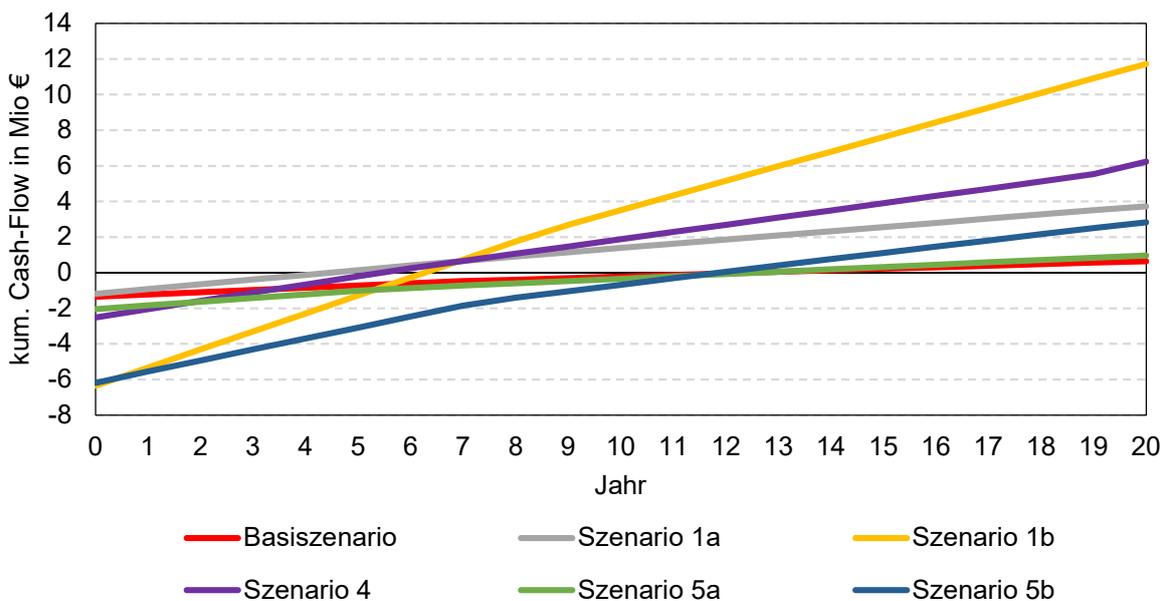


Abbildung 2.44: kumulierter Cash-Flow in Mio. € über 20 Jahre, Szenarienvergleich

### 3 Fazit

- Die Energiebedarfe des Quartiers und des BTZs sind schwer in einem Energiekonzept kombinierbar. Am besten geschieht dies in Szenario 4.
- Die hohen Energiekosten führen dazu, dass eine Eigenversorgung und alternative Energiekonzepte (z. B. Abwärmenutzung) rentabel sind. Das rentabelste System ist Szenario 1a, wobei dieses von der ursprünglichen Motivation abweicht, eine gemeinsame Versorgung via Netz zu erreichen. Hier ist die hohe Stromnutzung bei gleichzeitig geringer Einspeisung der Treiber (ähnlich dazu Szenario 4)
- Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Wirtschaftlichkeit der Energiekonzepte durch eine Preisänderungen der Energiekosten stark verändert wird. Je größer die Vertriebswege, desto resilienter ist das Energiekonzept. Durch die Vielfalt in Szenario 4 ist dies dort gegeben.
- In allen Szenarien, in denen die Energiezentrale im Gewerbegebiet steht, kann für das Gewerbegebiet ein konkurrenzfähiger Wärmepreis bei gleichzeitiger Rendite für den Betreiber erreicht werden.
- In allen Konzepten, in denen die Energiezentrale beim BTZ steht, kann für das BTZ eine hohe Rentabilität erreicht werden.
- Das rentabelste Energiekonzept mit Netz ist Szenario 4, da der Strom beim größten Verbrauch anfällt und dort in hohem Grad direktverbraucht werden kann.
- Szenario 4 bietet zudem den Vorteil, dass dies durch die zusätzliche Abwärmenutzung in einem Förderprogramm untergebracht werden kann, während eine reine Wärmebereitstellung durch Holz nicht mehr Teil einer Förderung ist. Gleichzeitig steigt aber die Komplexität deutlich.

## Anhang A

**Tabelle 3.1:** Thermophysikalische Stoffwerte von Wasser [3]

Thermophysikalische Stoffwerte von Wasser

3

**Tab. 1** Stoffwerte von Wasser beim Druck von  $p = 1 \text{ bar}^a$

$t$ °C	$\rho$ kg m <sup>-3</sup>	$h$ kJ kg <sup>-1</sup>	$s$ kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	$c_p$ kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	$\alpha_v$ 10 <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	$\lambda$ 10 <sup>-3</sup> W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	$\eta$ 10 <sup>-6</sup> Pa s	$\nu$ 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	$a$ 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	$Pr$ –
0	999,84	0,05966	-0,00015	4,219	-0,0677	555,65	1791,8	1,792	0,1317	13,61
1	999,90	4,2774	0,01526	4,216	-0,0497	558,18	1731,0	1,731	0,1324	13,07
2	999,94	8,4918	0,03061	4,213	-0,0324	560,66	1673,5	1,674	0,1331	12,57
3	1000,0	12,703	0,04589	4,210	-0,0156	563,09	1619,0	1,619	0,1338	12,10
4	1000,0	16,912	0,06110	4,207	0,0006	565,47	1567,3	1,567	0,1344	11,66
5	1000,0	21,118	0,07625	4,205	0,0163	567,79	1518,2	1,518	0,1350	11,24
6	999,94	25,322	0,09134	4,203	0,0315	570,08	1471,5	1,472	0,1357	10,85
7	999,90	29,524	0,10636	4,201	0,0463	572,31	1427,0	1,427	0,1363	10,47
8	999,85	33,723	0,12133	4,199	0,0606	574,51	1384,7	1,385	0,1368	10,12
9	999,78	37,921	0,13623	4,197	0,0746	576,66	1344,4	1,345	0,1374	9,785
10	999,70	42,117	0,15108	4,195	0,0881	578,78	1305,9	1,306	0,1380	9,466
11	999,61	46,312	0,16586	4,194	0,1013	580,85	1269,2	1,270	0,1386	9,164
12	999,50	50,505	0,18060	4,193	0,1142	582,89	1234,0	1,235	0,1391	8,876
13	999,38	54,697	0,19527	4,191	0,1267	584,89	1200,5	1,201	0,1396	8,603
14	999,25	58,888	0,20989	4,190	0,1389	586,86	1168,3	1,169	0,1402	8,342
15	999,10	63,078	0,22446	4,189	0,1509	588,80	1137,6	1,139	0,1407	8,093
16	998,94	67,266	0,23897	4,188	0,1625	590,70	1108,1	1,109	0,1412	7,856
17	998,78	71,454	0,25342	4,187	0,1739	592,57	1079,8	1,081	0,1417	7,630
18	998,60	75,641	0,26783	4,186	0,1850	594,42	1052,7	1,054	0,1422	7,414
19	998,41	79,827	0,28218	4,186	0,1959	596,23	1026,6	1,028	0,1427	7,207
20	998,21	84,012	0,29648	4,185	0,2066	598,01	1001,6	1,003	0,1432	7,009
22	997,77	92,380	0,32493	4,183	0,2273	601,49	954,40	0,9565	0,1441	6,638
24	997,30	100,75	0,35318	4,182	0,2472	604,87	910,68	0,9131	0,1450	6,297
25	997,05	104,93	0,36723	4,182	0,2569	606,52	890,02	0,8927	0,1455	6,137
26	996,79	109,11	0,38123	4,181	0,2664	608,14	870,11	0,8729	0,1459	5,983
28	996,24	117,47	0,40909	4,181	0,2850	611,31	832,38	0,8355	0,1468	5,692
30	995,65	125,83	0,43676	4,180	0,3029	614,39	797,22	0,8007	0,1476	5,424
32	995,03	134,19	0,46425	4,180	0,3202	617,38	764,41	0,7682	0,1485	5,175
34	994,38	142,55	0,49155	4,179	0,3371	620,29	733,73	0,7379	0,1493	4,943
36	993,69	150,91	0,51867	4,179	0,3535	623,10	704,99	0,7095	0,1501	4,728
38	992,97	159,27	0,54562	4,179	0,3694	625,84	678,04	0,6828	0,1508	4,527
40	992,22	167,62	0,57239	4,179	0,3849	628,49	652,73	0,6578	0,1516	4,340
42	991,44	175,98	0,59900	4,179	0,4001	631,07	628,92	0,6343	0,1523	4,164
44	990,64	184,34	0,62543	4,179	0,4149	633,57	606,50	0,6122	0,1531	4,000
46	989,80	192,70	0,65170	4,179	0,4294	636,00	585,35	0,5914	0,1538	3,846
48	988,94	201,05	0,67781	4,179	0,4435	638,35	565,39	0,5717	0,1545	3,702
50	988,05	209,41	0,70375	4,180	0,4574	640,64	546,52	0,5531	0,1551	3,566
55	985,71	230,31	0,76794	4,181	0,4910	646,04	503,63	0,5109	0,1568	3,259
60	983,21	251,22	0,83117	4,183	0,5231	651,02	466,04	0,4740	0,1583	2,994
65	980,57	272,14	0,89350	4,185	0,5541	655,59	432,91	0,4415	0,1598	2,764
70	977,78	293,07	0,95495	4,188	0,5841	659,78	403,56	0,4127	0,1611	2,562
75	974,86	314,02	1,0156	4,192	0,6132	663,58	377,42	0,3872	0,1624	2,384
80	971,80	334,99	1,0754	4,196	0,6417	667,01	354,06	0,3643	0,1636	2,227
85	968,62	355,98	1,1344	4,200	0,6695	670,08	333,08	0,3439	0,1647	2,088
90	965,32	376,99	1,1926	4,205	0,6970	672,80	314,18	0,3255	0,1657	1,964
95	961,89	398,03	1,2502	4,211	0,7241	675,17	297,09	0,3089	0,1667	1,853
99,606 <sup>b</sup>	958,64	417,44	1,3026	4,216	0,7489	677,07	282,75	0,2950	0,1675	1,761

<sup>a</sup>Zur Erklärung der Symbole siehe die Auflistung in Abschn. 2

<sup>b</sup>Zustand auf der Siedelinie

## IV Literaturverzeichnis

- [1] W. I., „Wärmetechnische Auslegung von Fernwärme- und Heißwasserleitungen,“ Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2018.
- [2] H. H. A. D. Helbig U., „Hydraulik und Gasdynamik,“ Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2018.
- [3] W. W. Kretschmar HJ., „Thermophysikalische Stoffwerte von Wasser,“ in *VDI-Wärmeatlas*, Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg, 2018.