

Untersuchungsergebnisse zur Energieoptimierung der Wärmeversorgung eines Maschinenbauunternehmens

Dominik Flum,
Nils Neuberger

Darmstadt, der 18.02.2020



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Kurzfassung / Abstract

Angesichts der Verknappung fossiler Brennstoffen und sich ändernder Rahmenbedingungen sind industrielle Energieversorgungssysteme immer höheren Anforderungen an Energieeffizienz und Energieflexibilität ausgesetzt.

In der vorliegenden Forschungsarbeit werden daher verschiedene Energieversorgungssysteme am Beispiel eines Maschinenbauunternehmens auf dem gegenwärtigen und zukünftigen Strommarkt untersucht. Die Untersuchungen werden mit einem Simulationsmodell in der Simulationssoftware „Dymola“ durchgeführt.

Der Hauptuntersuchungsgegenstand ist ein Blockheizkraftwerk (BHKW). Der Schwerpunkt liegt auf den Wechselwirkungen des BHKW mit einem möglichen Wärmerückgewinnungssystem und unter Berücksichtigung zukünftiger Strompreisszenarien in verschiedenen Konfigurationen. In diesem Zusammenhang wird auch eine bivalente Wärmeversorgung untersucht.

Dieser Beitrag fasst wesentliche Forschungsergebnisse, die während der Betreuung und Anfertigung der Masterarbeit von Nils Neuberger entstanden sind, zusammen.

Schlagwörter: Energieeffizienz, Energieflexibilität, Bivalenz

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung / Abstract.....	i
Inhaltsverzeichnis	ii
Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis.....	vii
Abkürzungsverzeichnis	viii
Symbolverzeichnis.....	ix
Indizes	x
1 Einleitung	1
2 Grundlagen.....	2
2.1 Grundlagen der Energieversorgung des produzierenden Gewerbes	2
2.2 Energieflexibilität	3
2.3 Energieeffizienz.....	4
2.4 Kraft-Wärme-Kopplung.....	4
2.4.1 Betriebsweisen	5
2.5 Modellierungsansätze von Energieversorgungssystemen	6
3 Anwendungsfall.....	7
3.1 Lastspezifischen Parameter	7
3.1.1 Lastverlauf Heizlast.....	8
3.1.2 Lastverlauf Strombedarf.....	9
3.1.3 Lastverlauf der Reinigungsanlage.....	10
3.2 Energieversorgungssystem	10
3.2.1 BHKW	11
3.2.2 Pufferspeicher	13
3.2.3 Heizkessel	14
3.2.4 Elektrodenkessel	15
3.2.5 Kühlturm	16
3.2.6 Wärmerückgewinnungsanlage.....	16
4 Simulationsmodell	20
4.1 Software.....	20
4.2 Vereinfachende Annahmen	21
4.3 Allgemeiner Systemaufbau	21
4.4 BHKW	22
4.4.1 Betriebsweisen	23
4.4.2 Förderung	28
4.5 Pufferspeicher	29
4.6 Kesselanlagen.....	29
4.7 Kühlturm.....	29
4.8 Wärmerückgewinnungsanlagen in Gasnitrieröfen.....	30

4.9	Strompreis.....	31
4.10	Verbraucher.....	33
5	Anwendung des Simulationsmodells	35
5.1	Wirtschaftlichkeitsanalyse des BHKW	35
5.2	Energieeffizienz.....	36
	5.2.1 Variation der Pufferspeichergröße	40
5.3	Energieflexibilitätspotential	41
	5.3.1 Stromgeführte Konfiguration.....	41
	5.3.2 Bivalente Konfiguration.....	46
	5.3.3 Gegenüberstellung der energieflexiblen Konfigurationen.....	49
	5.3.4 Analyse des Fördersystems	51
5.4	Gesamtanalyse.....	53
6	Fazit und Ausblick.....	56
7	Anhang	59
8	Literaturverzeichnis	66

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sankey-Diagramm der Produktionslandschaft	8
Abbildung 2: Gemittelter Lastverlauf der Heizwärme	9
Abbildung 3: Stromverbraucher	9
Abbildung 4: „Logano S825L-LN“ Wirkungsgrad über der mittleren Kesseltemperatur	15
Abbildung 5: Systemaufbau der Wärmerückgewinnungsanlage.....	17
Abbildung 6: Allgemeiner Systemaufbau.....	22
Abbildung 7: Qualitative, geordnete Jahresdauerlinie des Wärmebedarfes bei wärmegeführter Betriebsweise.....	24
Abbildung 8: Qualitative, geordnete Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs bei stromgeführter Betriebsweise.....	25
Abbildung 9: Grenzkosten der stromgeführten Betriebsweise.....	26
Abbildung 10: Qualitative, geordnete Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs bei bivalenter Betriebsweise.....	27
Abbildung 11: Grenzkosten der bivalenten Betriebsweise.....	28
Abbildung 12: Zusammensetzung der KWK-Fördermenge.....	28
Abbildung 13: Wöchentlicher Verlauf der Wärmeleistung des AWT	31
Abbildung 14: Day-Ahead Preisverläufe	32
Abbildung 15: Volatile Strompreise.....	32
Abbildung 16: Stromlastverlauf des Anwendungsfalls	33
Abbildung 17: Jährlicher Heizlastverlauf und wöchentliche thermische Last einer Reinigungsanlage	34
Abbildung 18: Kostengruppen der Konfigurationen Referenzfall und Status Quo	36
Abbildung 19: Anteile an der thermischen Versorgung.....	38
Abbildung 20: Spezifische Wärme- und Strombereitstellungskosten über den Vollbenutzungsstunden.....	38

Abbildung 21: Kostengruppen der wärmegeführten Betriebsweise unter Variation der WRG-Anlagen.....	39
Abbildung 22: Darstellung der Gesamtannuität und des Energiebedarfs.....	40
Abbildung 23: Pufferspeichervariation in der wärmegeführten Konfiguration mit vier WRG-Systemen.....	41
Abbildung 24: Annuitäten des Status Quo und der stromgeführten Konfiguration.....	43
Abbildung 25: Vollbenutzungsstunden über dem Strompreisszenario.....	44
Abbildung 26: Spezifische Energiekosten über die Vollbenutzungsstunden	45
Abbildung 27: Spezifische Wärme- und Stromerzeugungskosten der Energieversorgung.....	45
Abbildung 28: Gesamtannuitäten der stromgeführten Betriebsweise.....	46
Abbildung 29: Anteile der thermischen Versorgung	48
Abbildung 30: Spezifische Energiekosten über den Vollbenutzungsstunden	49
Abbildung 31: Gesamtannuitäten der bivalenten Konfiguration	49
Abbildung 32: Kostengruppen des Preisszenarios „Volatil 12“	50
Abbildung 33: Vergleich der Annuitäten	51
Abbildung 34: Einfluss der Zuschlagshöhe auf die Vollbenutzungsstunden	52
Abbildung 35: Kostengruppen der strom- und wärmegeführten Konfiguration unter Berücksichtigung von vier Wärmerückgewinnungssystemen	54
Abbildung 36: Gesamtannuitäten der strom- und wärmegeführten Konfiguration unter Berücksichtigung von vier Wärmerückgewinnungssystemen	55
Abbildung 37: Technische Daten „TSP Avus 800b“ (am Modul)	60
Abbildung 38: Hauptabmessungen und Gewichte „TSP Avus 800b“ (am Modul).....	60
Abbildung 39: Technische Daten des Motors.....	61
Abbildung 40: Abmessungen „Logano S825L LN“	62
Abbildung 41: Technische Daten „Logano S825L LN“.....	63
Abbildung 42: Kesselwirkungsgrad „Logano S825L LN“ in Abhängigkeit von der mittleren Kesselwassertemperatur (Mittelwerte der Baureihen)	63

Abbildung 43: Technische Daten der Pufferspeicher „LZO“.....	64
Abbildung 44: Technische Daten der Pufferspeicher „ThermoOne P“	65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Elektrische Last des Werkes	10
Tabelle 2: Thermische Last der Reinigungsanlage "Aichilin Flexiclean"	10
Tabelle 3: Technische Daten „TSP Avus 800b“	12
Tabelle 4: Gesamtkosten des Erdgas-BHKW	13
Tabelle 5: Technische Daten des Pufferspeichers.....	13
Tabelle 6: Technische Daten „LZO 60.000" und „LZO 100.000".....	14
Tabelle 7: Technische Daten „Logano S825L LN“	15
Tabelle 8: Technische Daten des Elektrodenkessels der Firma Velde	15
Tabelle 9: Technische Daten des Pufferspeichers „ThermoOne P"	17
Tabelle 10: Technische Daten Gasnitrierofen	18
Tabelle 11: Investitionskosten der Abgas-Wärmerückgewinnungs-Anlage	18
Tabelle 12: Konfigurationsspezifische Parameter der wärmegeführten Konfiguration.....	37
Tabelle 13: Konfigurationsspezifische Parameter der stromgeführten Konfiguration	42
Tabelle 14: Konfigurationsspezifische Parameter der bivalenten Konfiguration	47
Tabelle 15: Technische Daten des Elektrodenkessels der Firma „Velde"	64

Abkürzungsverzeichnis

KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz
Vbh	Vollbenutzungsstunden
BHKW	Blockheizkraftwerk
AWT	Abgaswärmetauscher
WRG	Wärmerückgewinnung
EDLG	Energiedienstleistungsgesetz
ORC	Organic Rankine Cycle
EE	Erneuerbare Energien

Symbolverzeichnis

\dot{Q}	Wärmestrom	[W]
k	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/m ² K]
A	Fläche	[m ²]
ΔT	Temperaturdifferenz	[°C]
η	Wirkungsgrad	[-]
H_i	Heizwert	[J/kg]
H_s	Brennwert	[J/kg]
ω	Brennstoffausnutzungsgrad	[-]
\dot{m}	Massenstrom	[kg/s]
W	Leistung	[W]
ρ	Stromkennzahl	[-]
A	Annuität	[€/a]
R_w	Restwert	[€]
a	Annuitätsfaktor	[-]
b	preisdynamische Barwertfaktor	[-]
q	Zinsfaktor	[-]
t	Betrachtungszeitraum	[a]
K	Kosten	[€]
T	Temperatur	[K]
c_p	spezifische Wärmekapazität	[J/kgK]
P	Preis	[€/kWh]

Indizes

<i>m</i>	mittlere
<i>Bs</i>	Brennstoff
<i>th</i>	thermisch
<i>el</i>	elektrisch
<i>K</i>	kapitalgebunden
<i>V</i>	bedarfsgebunden
<i>B</i>	betriebsgebunden
<i>E</i>	Erlöse
<i>Modul</i>	Modulkosten
<i>spez.</i>	spezifische
<i>I</i>	Investitions-
<i>Reinigung</i>	Reinigungsanlage
<i>Vl</i>	Vorlauf
<i>Rl</i>	Rücklauf
<i>zu</i>	zugeführt
<i>w</i>	Wasser
<i>kühl</i>	Kühlleistung
<i>Eg</i>	Erdgas
<i>K</i>	Kessel
<i>Kt</i>	Kühlturm
<i>Ek</i>	Elektrodenkessel

1 Einleitung

Zu den zentralen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts zählen der weltweite Anstieg des Energieverbrauchs, die Verknappung fossiler Brennstoffe und die Notwendigkeit, die Schadstoffemissionen zu reduzieren. Die logische Folge davon ist ein deutlicher Ausbau dezentraler und regenerativer Anlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung in den kommenden Jahren (Matics 2007, S. 5). Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) spielt eine Schlüsselrolle bei der dezentralen Erzeugung von Strom und Wärme, um die Effizienz der Energiebereitstellung zu erhöhen und damit dem Anstieg des Energieverbrauchs entgegenzuwirken.

Ein Grund für den erwarteten Ausbau erneuerbarer Energien liegt neben den oben genannten globalen Einflussfaktoren in der von der Bundesregierung geplanten Energiewende. Die quantitativen Ziele definieren eine Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien (RE) von mindestens 80% bis 2050 (BMWi 2015, S. 7). Insbesondere die Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie unterliegt Wetter- und saisonalen Schwankungen. Diese Volatilität wirkt sich auf die Versorgungssicherheit und auf die Schwankungen des Strompreises aus. Es ist daher wichtig, die Energieflexibilität der dezentralen Versorgungsstandorte zu erhöhen, um besser auf Veränderungen auf dem Strommarkt reagieren zu können.

Ziel dieses Artikels ist es daher, ein entwickeltes Simulationsmodell zur Bewertung energieflexibler, dezentraler Versorgungssysteme für Industrieunternehmen hinsichtlich Energieeffizienz, Energieflexibilitätspotenzial und Wirtschaftlichkeit an einem Beispielunternehmen anzuwenden. Hier trat der Aspekt der Bivalenz in den Hintergrund, da eine wissenschaftliche Untersuchung von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen nach dem aktuellen Entwicklungspotential und den rechtlichen Rahmenbedingungen in Deutschland relevanter ist. Diese Einschätzung spiegelt sich auch im Anwendungsfall dieser Arbeit wider, in der bereits eine KWK-Anlage vorhanden ist. Ein Hauptnachteil einer bivalenten Energieversorgung ist die Notwendigkeit einer Systemredundanz und die damit verbundenen hohen Investitionssummen. Darüber hinaus kann eine KWK-Analyse nicht nur zur Steigerung der Energieflexibilität, sondern auch zur Optimierung der Energieeffizienz beitragen.

Im Zusammenhang mit der Energieeffizienz werden die Integration eines Wärmerückgewinnungssystems in das simulierte Energiesystem und sein Einfluss auf die KWK-Anlagenauslastung näher erläutert. Die Untersuchungen zur Energieflexibilität konzentrieren sich hauptsächlich auf ein stromgeführtes BHKW in Kombination mit einer Rückkühlanlage. Als Alternativ wird eine Energieflexibilitätsbereitstellung durch ein bivalentes Energieversorgungssystem untersucht. Darüber hinaus werden regulatorische Rahmenbedingungen kritisch geprüft.

2 Grundlagen

Damit die Zusammenhänge dieser Arbeit leichter zu greifen sind, werden in diesem Kapitel zunächst einige Grundlagen aufgezeigt. Nachdem Basiswissen über die Energieversorgung im produzierenden Gewerbe erläutert wurde, fokussiert sich der Grundlagenteil auf zwei Kernthematiken der Arbeit - die Energieeffizienz sowie diesbezüglich die Wärmeauskopplung und die Energieflexibilität. Unter Berücksichtigung dieser beiden Themenstellungen wird überdies ausführlich auf relevante Zusammenhänge der Kraft-Wärme-Kopplung eingegangen. Abschließend werden die Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsberechnung gebäudetechnischer Anlagen vermittelt.

2.1 Grundlagen der Energieversorgung des produzierenden Gewerbes

In industriellen Fertigungsprozessen müssen Maschinen, Aggregate und unterstützende Teilprozesse mit Energie versorgt werden, um wertschöpfende Prozesse durchführen zu können. Die Energieversorgungssysteme sind dabei für eine möglichst effiziente Transformation der Endenergien in prozessunterstützenden Nutzenergieformen zuständig. Nach VDI 4661 umfasst der Begriff „Endenergien“ die gehandelten Endenergieträger, die der Erzeugung von Nutzenergien dienen und zu diesem Zwecke endgültig als Energieträger dem Markt entnommen werden. Des Weiteren werden Nutzenergien als alle technischen Formen der Energie definiert, die der Verbraucher benötigt, um Energiedienstleistungen durchführen zu können. Die Nutzenergieformen umfassen thermische und mechanische Energie, Licht, elektrische und magnetische Feldenergie sowie elektromagnetische Strahlung (VDI-Richtlinie 4661, S. 12).

Der Fokus dieses Beitrags liegt auf der thermischen Nutzenergie in Form von Raumwärme, Warmwasser oder Prozesswärme. Auf Grund ihrer vielseitigen Nutzung, stellt sie einen entscheidenden Nachfragesektor im Bereich der Energieversorgung dar. Beispielprozesse mit einem hohen Prozesswärmebedarf sind die Bereitstellung von Heißwasser und Dampf, Trocknungs- und Entwässerungsprozesse, die Erwärmung von Einsatzstoffen und Materialien, Destillation und Eindampfen sowie Reinigungsprozesse. Hierbei wird zwischen Niederprozesswärme (bis 400 °C) und Hochprozesswärme (400 bis 2000 °C) unterschieden (Posch 2011, S. 143). Der Endenergieeinsatz in dem Prozesswärmesektor betrug im Jahre 2007 nach PEHNT 1.984 PJ. Dieser Wert entspricht einem Anteil von 43 % des Gesamtwärmebedarfes. Über 80 % des Prozesswärmebedarfs fallen dabei im industriellen Sektor an. Den größten Anteil am Gesamtwärmebedarf trägt jedoch die Raumwärme mit einem jährlichen Endenergieeinsatz von 2.250 PJ (Pehnt 2010, S. 291).

Jeder Umwandlungsprozess ist mit Verlusten behaftet, wobei sich die Höhe der Verluste je nach Ausprägung des Umwandlungsprozesses unterscheidet. Bei der Bereitstellung von Druckluft liegen diese beispielsweise bei 95 % (Hesselbach 2012, S. 20). Nach dem Energieerhaltungssatz kann Energie jedoch weder erzeugt, noch vernichtet, sondern nur in eine andere Energieform umgewandelt werden. Aus physikalischer Sichtweise verringert sich somit bei einem Umwandlungsprozess nur der Anteil der enthaltenen nutzbaren Energie - in der Fachsprache auch Exergie genannt. Ein über die Grenzen eines Systems abgeführter, nicht genutzter, Wärmetransport wird mit „Abwärme“ bezeichnet. Jedoch ist zu erwähnen, dass die Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen nicht als Abwärme bezeichnet wird, da diese eines der zwei Zielprodukte neben Strom darstellt. (Pehnt 2010, S. 291–293)

Bezogen auf die geographische Lage der Nutzenergiebereitstellung lässt sich grundsätzlich zwischen einer zentralen und einer dezentralen Energieversorgung differenzieren. Bei einer dezentralen Energieerzeugung wird die Nutzenergie verbrauchernah in Kleinkraftwerken erzeugt. Die Leistungsfähigkeit dieser Anlagen ist in der Regel nur auf die Deckung des Energiebedarfs der Verbraucher in unmittelbarer Nähe ausgelegt. Im Gegensatz dazu werden Anlagen als zentrale Versorgungseinheit bezeichnet, wenn diese elektrische Energie und Fernwärme in der Größenordnung einiger Megawatt für die gesamte Region bereitstellen.

2.2 Energieflexibilität

Produzierende Unternehmen agieren heutzutage in Bezug auf die volatilen Energiemärkte, in einem turbulenten Umfeld. Unter diesem Hintergrund rückt der Aspekt der Energieflexibilität immer mehr in den Vordergrund.

Die Energieflexibilität beschreibt im Allgemeinen die Fähigkeit eines Industrieunternehmens, die Nachfrage nach extern bezogener Energie beziehungsweise Energieträgern zeitlich flexibel zu steuern. Es wird zwischen zwei Arten der Flexibilität unterschieden. Die Zeitflexibilität beschreibt, eine temporale Verschiebung der Nutzung von externer Energie in vor- oder nachgelagerten Zeitperioden. Im Kontext dieser Arbeit steht jedoch die Produktflexibilität im Fokus. Diese beschreibt ein Energieversorgungssystem, in dem ein Wechsel der Energieträger möglich ist, ohne dabei Einfluss auf den Endenergieverbrauch zu nehmen. Die Nutzung des Flexibilitätspotentials wird in der Praxis auch als Demand Side Management (DMS) bezeichnet. In Bezug auf Strom wird das DMS folgendermaßen definiert: „DMS bezeichnet die Anpassung der Stromnachfrage z. B. eines Unternehmens in Abhängigkeit von der Situation im Stromversorgungssystem. Der jeweilige Stromverbraucher erhält ein externes Signal, beispielsweise ein Preissignal, und passt daraufhin seine Stromnachfrage im Sinne der

überbetrieblichen Anforderungen kurzfristig an“ (Deutsche Energie-Agentur 2013, S. 2). (Häfner 2018, S. 630)

Bivalenz

Ein Sonderfall der Energieflexibilität ist die Bivalenz. Eine bivalente Energieversorgung zeichnet sich dadurch aus, dass sie den Nutzenergiebedarf der Produktionsstätte mit zwei unterschiedlichen Betriebsmitteln decken kann. Anlagen mit nur einem Betriebsmittels werden als monovalent und solche mit mehr als zwei verwertbaren Endenergieformen als multivalent bezeichnet (Form et al. 2016). Ein häufig angewendetes, einfaches bivalentes System stellt zum Beispiel ein Elektrokessel in Kombination mit einem Gaskessel dar. Die Bivalenz ist in diesem Fall durch die alternative Bereitstellung der thermischen Energie durch die Umwandlung von Gas im Kessel oder Strom im Elektrokessel gegeben. Bei volatilen Strompreisen richtet sich der Betriebspunkt der Anlage nach der Wirtschaftlichkeit der Nutzenergieerzeugung. In dem Beispielsystem würde der Gaskessel während negativer Residuallast die notwendige thermische Energie produzieren. Fallen die Strombezugpreise jedoch unter einen Grenzwert, so kann durch die elektrische Bereitstellung der Wärme in der Theorie ein ökonomischer Vorteil erlangt werden.

2.3 Energieeffizienz

Die Thematik der Energieeffizienz nimmt in den meisten energie- und klimapolitischen Strategien eine bedeutende Rolle ein. Im Rahmen der Energiewende ist ein weiteres quantitatives Ziel der Bundesregierung, den Primärenergieverbrauch in Deutschland bis 2050 um 50 % zu senken (BMW 2015, S. 7). Dieses Ziel soll vor allem durch eine Effizienzsteigerung in der Energieversorgung erreicht werden. Um den Begriff der Effizienz genauer zu definieren, wird das Begriffsverständnis der Europäischen Union in der sogenannten Energiedienstleistungsrichtlinie herangezogen. Demnach beschreibt die Effizienz das Verhältnis des Ertrages an Leistung, Dienstleistungen, Waren oder Energie zum Energieeinsatz. (Pehnt 2010, S. 2)

2.4 Kraft-Wärme-Kopplung

Bei der Erzeugung elektrischer Energie mit Hilfe fossiler Brennstoffe entsteht ein großes Wärmepotential, welches bei der Stromerzeugung in konventionellen Kraftwerken häufig ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird. Das Grundprinzip der KWK-Anlagen liegt in der systematischen Ausnutzung des im Brennstoff erhaltenen nutzbaren Energieanteils - der Exergie. Dies bezieht sich besonders auf die Umwandlungsabwärme der Stromerzeugung, welche häufig zur Bereitstellung von Niedertemperaturwärme ausgekoppelt wird. Bei optimaler Auslegung der Anlage lässt sich bis zu einem Drittel des Primärenergiebedarfs im Vergleich zur konventionellen, ungekoppelten Stromerzeugung einsparen (Schaumann und Schmitz 2010, S. 6). Der Energieeffizienzverband AGFW definiert das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung

folgendermaßen: „Kraft-Wärme-Kopplung ist die gleichzeitige Umwandlung von eingesetzter Energie in mechanische oder elektrische Energie und nutzbarer Wärme innerhalb eines thermodynamischen Prozesses (AGFW 2009, S8).

In einer Brennkammer wird Brennstoff mit Luft verbrannt. Durch eine Welle ist der Motor mit einem Generator gekoppelt, welcher elektrische Energie erzeugt. Die Kühlung des Brennraumes erfolgt durch einen Wasserkreislauf. Dieser nimmt die Abwärme des Verbrennungsprozesses auf. Anschließend wird zusätzlich die im Abgas erhaltene thermische Energie über einen Rekuperator dem Wasserkreislauf zugeführt. Je weiter das Abgas heruntergekühlt wird, desto größer ist der resultierende Gesamtwirkungsgrad der Anlage.

2.4.1 Betriebsweisen

Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen werden im Allgemeinen für einen Betrieb mit langen Laufzeiten auf Vollast konzipiert. Da die Erzeugung von Strom und Wärme bei KWK-Anlagen mit nur einem Freiheitsgrad in einem festen Verhältnis zueinanderstehen, muss eine dieser Größen als Führungsgröße gewählt werden. Das Verhältnis der beiden Produkte der Energieerzeugung wird durch die Stromkennzahl definiert.

Wärmegeführte Betriebsweise

Am häufigsten wird die wärmegeführte Betriebsweise angewendet. Ein Ziel der wärmegeführten Betriebsweise ist es, eine Überproduktion von Wärme zu verhindern, da diese nur in begrenzten Mengen und verlustbehaftet in thermischen Speichern zwischengelagert werden kann. Deshalb werden die Laststufe, sowie An- und Ausschaltpunkte in diesem Fall durch die Wärmenachfrage bestimmt. Da eine Verringerung der Strombezugskosten wirtschaftlich vorteilhafter ist als die Vergütung von Einspeisestrom, wird ein größtmöglicher Anteil des selbsterzeugten Stroms von den Verbrauchern selbst genutzt. Überschüssiger Strom kann in das allgemeine Stromnetz eingespeist werden. Ein häufiger Anwendungsfall dieser Betriebsweise ist die Energieversorgung von Gebäuden. (Nowak 2015, S. 16)

Stromgeführte Betriebsweise

Eine Alternative ist die stromgeführte Betriebsweise. Die Laststufe des BHKW richtet sich hierbei nach dem Strompreis. Außerdem können Stromlastspitzen durch die Eigenproduktion abgedämpft werden. Ein Anwendungsbeispiel sind BHKW-Anlagen, die in Fernwärmenetzen von Energieversorgungsunternehmen eingebunden sind. Es entfällt die Problematik der Speicherung überschüssiger Wärme, da diese direkt in das Fernwärmenetz eingespeist werden kann. Es resultiert eine Betriebsweise ohne hohe Laufzeiten. Der wirtschaftliche Vorteil ergibt sich durch Optimierung des Bezugsprofils beim Stromeinkauf oder durch Reaktionen auf Strompreisschwankungen des Börsenpreises. (Nowak 2015, S. 16)

2.5 Modellierungsansätze von Energieversorgungssystemen

Dymola basiert auf der open source Programmiersprache „Modelica“. Die Software ermöglicht den Zugriff auf eine Vielzahl an unterschiedlich modellierten Teilkomponenten eines Energieversorgungssystems. Diese unterscheiden sich in der typischerweise physikalischen Systemmodellierung zum Teil stark von Modellierungsansätzen in anderen Simulationsprogrammen aus der Literatur. In der verwendeten Software bietet es sich an, Referenzmodelle aus öffentlichen Beispielbibliotheken wie die „Buildings“ oder „AixLib“-Bibliothek zu betrachten und auf diesem Wege Modellierungsansätze abzuleiten. Im Kontext dieser Arbeit wurde sich vor allem an dem Inhalt der beiden genannten Bibliotheken orientiert.

„AixLib“

Die „AixLib“-Bibliothek wurde vom Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik am E.ON Energy Research Center mit dem Fokus auf dynamische Gebäudesimulation entwickelt. Sie umfasst Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung, wie Wärmepumpen, Kesselanlagen, Pufferspeicher und KWK-Anlagen. Sie baut wiederum auf eine, mit der International Building Performance Simulation Association (IBPSA) gemeinschaftlich entwickelte, Annex60 Bibliothek auf. Die Bibliothek bietet Modelle unterschiedlichster Detaillierungsgrade, wodurch sowohl Modelle mit Fokus auf einzelne Gebäude, als auch großskalige Simulationen auf Stadtteilebene entwickelt werden können. (E.ON Energy Research Center 2017)

„Buildings“

Die „Buildings“-Bibliothek ist eine Open-Source-Bibliothek für die dynamische Modellierung von gebäudespezifischen oder städtischen Energiesystemen, entwickelt an der „University of California“. Sie bietet Möglichkeiten zur schnellen, flexiblen Modellierung um die Planungs- und Entwicklungskosten von Energiesystemen zu verringern. Der technische Hintergrund der verschiedenen Modelle ist in dem Paper von M. WETTER ausführlich dokumentiert. (Wetter 2009)

3 Anwendungsfall

Um das Energieflexibilitäts- und effizienzpotential realitätsnah zu untersuchen, wird als Anwendungsfall ein existierender Produktionsstandort aus der Industrie verwendet. Im Folgenden werden last- und versorgungsspezifischen Parameter erläutert, die auf realistische Rahmenbedingungen des Unternehmens basieren. Das betrachtete Werk entwickelt und fertigt im Allgemeinen Komponenten des Bereiches der Leittechnik. Hierbei zählt das Härten der Werkstoffe in Hochtemperaturöfen, auf welche in Kapitel 3.2.6 genauer eingegangen wird, zu den stromintensivsten Prozessen. Der zu beheizende Wohnraum beläuft sich auf eine Fläche von 90.000 m² und stellt eine wesentliche Wärmesenke des Gesamtsystems dar. Weitere Hauptenergieverbraucher des Werkes sind Fertigungsprozesse der mechanischen Bearbeitung, Reinigung, Prüfung und Beleuchtung. (Anwendungsfall 2015)

Bevor die einzelnen Parameter des Systems bestimmt werden, wird zunächst die Ausgangssituation ausgeführt. Die Betrachtung der Energieversorgung fokussiert sich auf zwei Teilkomponenten. Neben einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des BHKW in diversen Konfigurationen, liegt das Hauptaugenmerk auf einer Wärmerückgewinnungsanlage. Um die Effizienz der Energieversorgung zu steigern, besteht die Möglichkeit, Abgaswärmetauscher in die Abgasströme der Gasnitrieröfen zu integrieren. Auf die Leistungsdaten der Öfen, sowie der Wärmerückgewinnungsanlage wird in Kapitel 3.2.6 genauer eingegangen.

3.1 Lastspezifischen Parameter

Die lastspezifischen Parameter wurden im Rahmen des Energieaudits nach dem Geltungsbereich des deutschen Energiedienstleistungsgesetzes (EDLG) in Form eines Energieaudits ermittelt. Die Anforderungen an ein Energieaudit lauten folgendermaßen:

Die Basis stellen aktuelle, kontinuierlich oder zeitweise gemessene, belegbare Betriebsdaten zum Energieverbrauch und den Lastprofilen dar, die verhältnismäßig und in einem Maße repräsentativ sind, dass sich daraus ein zuverlässiges Bild der Energieeffizienz ergibt. Nach Kap. 3.1 des BAFA-MERKBLATTS FÜR ENERGIEAUDITS (Stand: 08.07.2015) gilt ein Energieaudit als repräsentativ wenn mindestens 90 % des gesamten Energieverbrauchs vom Energieaudit erfasst wird. (Anwendungsfall 2015, S. 3–4)

In dem nachfolgenden Sankey-Diagramm werden alle, für diese Arbeit relevanten, Energieflüsse des Werkes graphisch dargestellt zusammengefasst. Da der „Use Case“ anonym bleiben muss, werden die Energieflüsse nur quantitativ aufgezeigt.

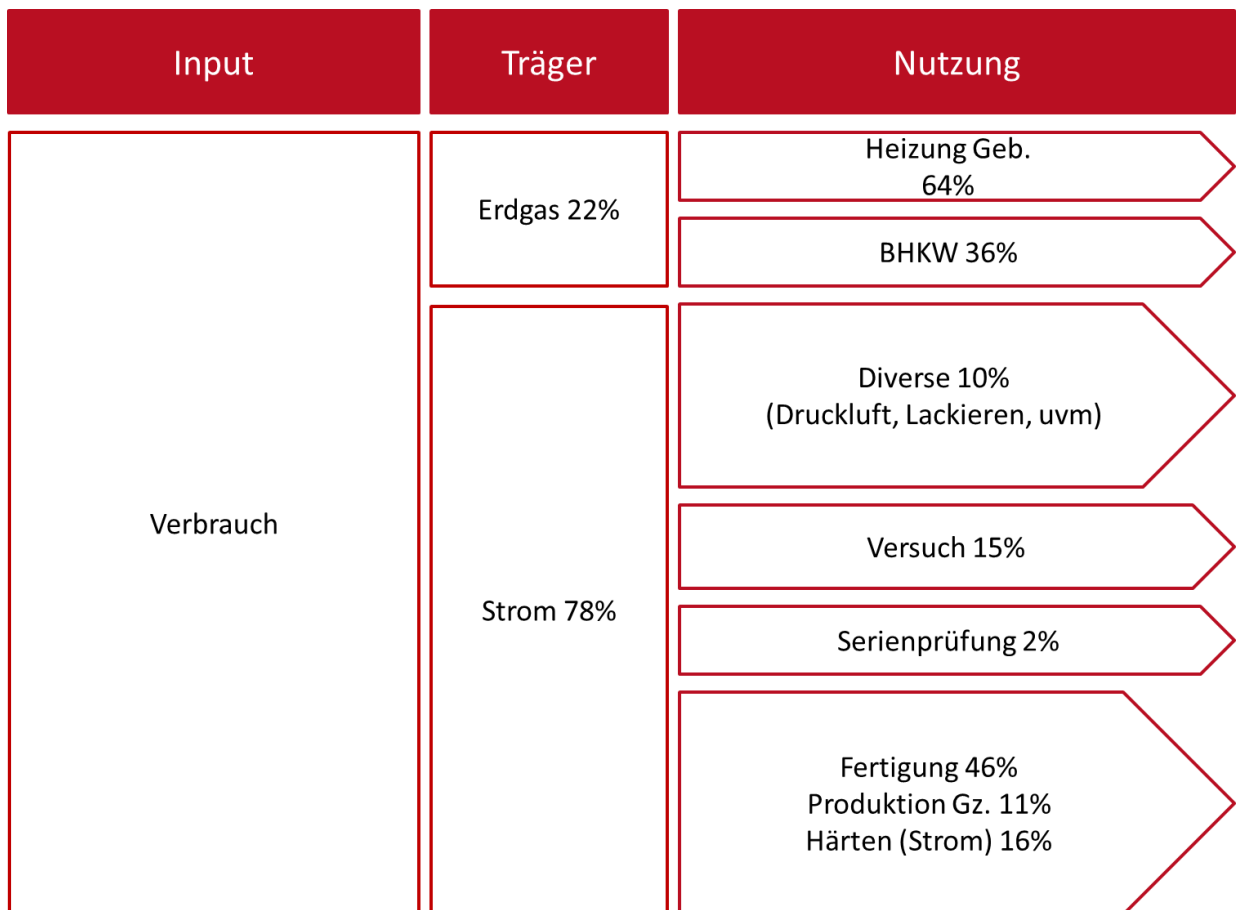


Abbildung 1: Sankey-Diagramm der Produktionslandschaft (Anwendungsfall 2015, S. 14)

Weitere lastspezifische Größen der Produktionsstätte sind Propan-, Heizöl- und Dieserverbräuche. Jedoch haben die Konsumenten dieser Energieträger keinen Einfluss auf die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit und werden aus diesem Grund vernachlässigt.

3.1.1 Lastverlauf Heizlast

Die Heizlast des Gebäudes stellt die größte Wärmesenke des Systems dar. Die Auswertung in Form des Audits ergab einen spezifischen Heizwärmebedarf zwischen 160 und 180 kWh/m² im Jahr (Anwendungsfall 2015, S. 17). In Abbildung 2 ist der Lastverlauf der Heizlast über ein Jahr kontinuierlich dargestellt. In den Wintermonaten beläuft dieser sich auf einen Wert von bis zu 4.500kW, während die Last in den Sommermonaten über einen längeren Zeitraum nicht die 500 kW überschreitet. Da die Werte am Hauptanschluss gemessen wurden, ist davon auszugehen, dass der dargestellte Heizlastverlauf alle thermischen Verluste des Wärmeverteilungsnetzes beinhaltet. (Anwendungsfall 2015, Folie 3)

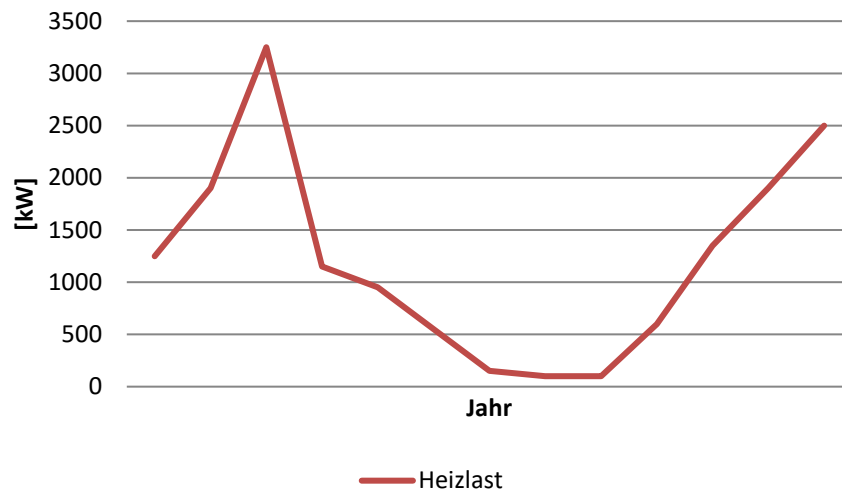


Abbildung 2: Gemittelter Lastverlauf der Heizwärme (Anwendungsfall 2015, Folie 31)

3.1.2 Lastverlauf Strombedarf

Der Stromverbrauch des Werkes stellt sich aus den in Abbildung 3 dargestellten Stromverbrauchern zusammen und beläuft sich auf einen Gesamt-Stromverbrauch von ca. 50.000 MWh pro Jahr. (Anwendungsfall 2015, Folie 9)

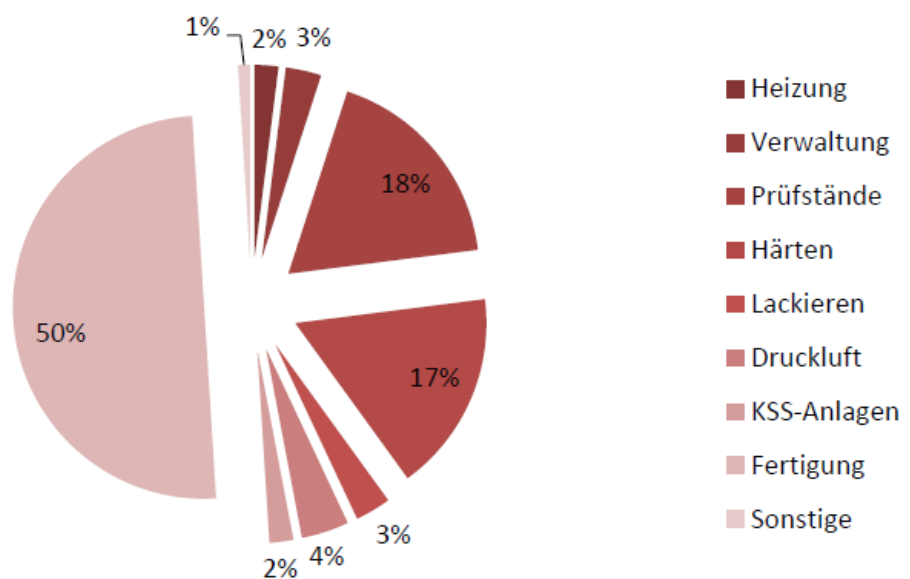


Abbildung 3: Stromverbraucher (Anwendungsfall 2015, Folie 12)

Der wöchentliche Verlauf des Lastverlaufs, sowie die durchschnittliche mittlere Leistung des Werkes ist in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Elektrische Last des Werkes (Anwendungsfall 2015, Folie 20)

Betriebszustand		Mittlere Leistung [kW]	Verhältnis zu Tag- Betrieb [%]
Tagbetrieb	8:00-16:00	7.192	100
Nachtbetrieb	0:00-6:00	6.443	90
Wochenende	Sa-So	2.020	28

3.1.3 Lastverlauf der Reinigungsanlage

Die Wäscherei stellt eine zentrale Verbrauchereinheit der Untersuchung dar. In dem Werk befinden sich vier Reinigungsanlagen des Modells „Aichilin Flexiclean“ mit jeweils drei Reinigungsbecken. Die Maße des zu erwärmenden Wasserbeckens betragen 3,8 m *3,1 m *0,67 m, was einem Beckenvolumen von ca. 7,9 m³ ergibt. Des Weiteren beträgt die Wassertemperatur konstante 80 °C, wobei die Erwärmung durch elektrische Heizstäbe erfolgt. Die durchschnittliche Leistungsaufnahme der Beckenbeheizung unter der Woche, basierend auf einer mehrtägigen Messung am Hauptanschluss der Aichilin-Reinigungsmaschine abzüglich der Hilfsaggregate, wie Vakuum- und Umflutpumpe, beträgt 35,47 kW, während am Wochenende eine durchschnittliche Arbeit von 13,3 kWh resultiert. (Anwendungsfall 2015, Folien 70-78)

Tabelle 2: Thermische Last der Reinigungsanlage "Aichilin Flexiclean" (Anwendungsfall 2015, S. 78)

Betriebszustand		Mittlere Leistung [kW]	Verhältnis zu Tag- Betrieb [%]
Arbeitstage	Mo-Fr	35,47	100
Wochenende	Sa-So	13,3	37,5

3.2 Energieversorgungssystem

Die Produktionsstätte besitzt bereits ein eigenes dezentrales Energieversorgungssystem. Dieses besteht aus einem BHKW, einem Pufferspeicher sowie einem Heizkessel und einem Kühlturm. Außerdem bestehen Überlegungen zu einer Investition in eine Wärmerückgewinnungsanlage.

Während in diesem Abschnitt kurz auf alle Komponenten der derzeitigen oder im Zuge dieser Arbeit untersuchten Teilkomponenten der Energieversorgungsanlage eingegangen wird,

beschränkt sich die Ausführung der wirtschaftlichen Aspekte auf solche Komponenten, die noch nicht vorhanden sind oder betriebsgebundene Kosten verursachen.

3.2.1 BHKW

Zur Deckung der Heizgrundlast ist in dem Energieversorgungssystem des Werkes ein BHKW integriert. Da zu dem BHKW-Modell keine detaillierten Daten außer einer elektrischen Leistung von 901 kW_{el}, zur Verfügung stehen, wird auf Basis der Recherchen ein Gasmotor-BHKW mit der entsprechenden elektrischen Leistung angenommen (Anwendungsfall 2014). Der Gasmotor „GE Jenbacher J412 GS-B05“ läuft auf 12 Zylindern mit einem Hubraum von insgesamt 36 l. Außerdem ist ein Toleranzwert von +0 °C/-5 °C für die Rücklauftemperatur des Wasserkreislaufes angegeben, bevor sich das BHKW aus sicherheitstechnischen Gründen automatisch abschaltet. Diese Vorsichtsmaßnahme ist notwendig, da eine ausreichende Kühlung des Motorblocks zu diesen Bedingungen nicht mehr gewährleistet werden kann. Die Leistung des Moduls ist stufenlos einstellbar. Mit Hilfe der drei Betriebspunkte aus Tabelle 3 werden die Wirkungsgrade und die Energiezufuhr interpoliert. Die Interpolationsfunktionen werden unterhalb der Betriebspunkte in derselben Tabelle aufgeführt.

Zudem ist die Anlage für einen Anfahrvorgang alle fünf Betriebsstunden unter Normalbedingungen ausgelegt. Die Anfahrzeit beträgt hierbei weniger als zwei Minuten. In Tabelle 3 sind alle weiteren relevanten Daten dieses Modells aufgelistet. Die Datenblätter wurden von der Firma „2-G“ zur Verfügung gestellt und befinden sich im Anhang.

Tabelle 3: Technische Daten „TSP Avus 800b“ (Anhang)

Technische Daten:		Teillast: 100%	75%	50%
JMS 412 B05				
elektrische Leistung	[kW _{el}]	901	675	448
elektrischer Wirkungsgrad	[%]	0,429	0,418	0,395
$\eta_{el} = -0,968y^2 + 0,213y + 0,313$				
thermische Leistung	[kW]	931	728	526
thermischer Wirkungsgrad	[%]	0,444	0,450	0,463
$\eta_{th} = 0,056y^2 - 0,123y + 0,51$				
Gesamtwirkungsgrad	[%]	0,873	0,868	0,858
$\eta_{ges} = -0,04y^2 + 0,09y + 0,823$				
Brennstoffzufuhr	[kW]	2.098	1.616	1.135
$\dot{Q}_{Bs} = 8,065y^2 + 1913,903y + 176,032$				
Warmwasserkreislauf (RI/VI)	[°C]	70/90	70/85,6	70/81,3
Wasservolumenstrom	[m ³ /h]		40	
Betriebsstunden pro Start	[h/1]		5	
Anfahrzeit	[min]		2	
zul. Betriebsdruck	[bar]		3,5/9	
(min./max.)				

Kapitalgebundene Kosten des Modul „TSP Avus 800b“

Auf Basis der Kostensätze, lassen sich die kapitalgebundenen Kosten ermitteln. Diese setzen sich zusammen aus den Investitionskosten sowie den Transport- und Einbindungskosten. Die kapitalgebundenen Kosten für ein Erdgas-BHKW Modul mit einer elektrischen Leistung von 901 kW_{el} werden in Tabelle 4 aufgelistet. Demnach ergibt sich ein gesamter Investitionsbetrag von 701.499,- €. Da die betriebsgebundenen Kosten in Abhängigkeit der erzeugten elektrischen Leistung angegeben werden, können diese erst im Rahmen der Simulationen bestimmt werden.

Tabelle 4: Gesamtkosten des Erdgas-BHKW (ASUE 2014, S. 14)

Kostenart	Formel	Betrag [€]
spezifische Modulkosten	$4.907 * \dot{Q}_{el}^{(-0,352)}$	447,-
Modulkosten	$\dot{Q}_{el} * k_{spez.}$	403.160,-
Transport bis Abnahme	$k_{Modul} * 0,07$	28.221,-
Einbindungskosten	$k_{Modul} * 0,67$	270.117,-
Gesamtkosten		701.499,-

3.2.2 Pufferspeicher

Ein Pufferspeicher sorgt für die hydraulische Entkopplung des BHKW-Kreislaufes vom restlichen Erzeuger- sowie Hauptkreislauf. Zudem kann durch ihn ein positiver Effekt auf die Betriebsstunden des BHKW erreicht werden. Das Volumen des Tanks beträgt 40 m³ (Anwendungsfall 2014). Basierend auf dem Referenzprodukt „LZO 40.000“ der Firma BTD werden die folgenden, in Tabelle 5 aufgelisteten, Produktdaten angenommen.

Tabelle 5: Technische Daten des Pufferspeichers (BTD GmbH 2018, S. 8; Dipl.-Ing. Nierobis 2018^[1])

Technische Daten: „LZO 40.000“		
Volumen:	[m ³]	40
Höhe	[mm]	8.950
Durchmesser	[mm]	2.500
Isolationsdicke	[mm]	200
Wärmeleitfähigkeit Mineralwolle (Glaswolle)	[W/mK]	0,035-0,045 ^[1]

Im Rahmen der Effizienzanalyse ist unter anderem eine Untersuchung der Auswirkungen der Pufferspeichergröße auf die Vollbenutzungsstunden des BHKW vorgesehen. Dementsprechend werden in diesem Kapitel zwei weitere Ausführungsformen desselben Speichertyps vorgestellt. Der Zuschlagsanspruch ergibt sich mit 250,- €/m³ jedoch maximal 30 % der Investitionskosten.

Tabelle 6: Technische Daten „LZO 60.000“ und „LZO 100.000“ (BTD GmbH 2018, S. 8; Dipl.-Ing. Nierobis 2018^[1])

Technische Daten:		„LZO 60.000“	„LZO 100.000“
Volumen:	[m ³]	60	100
Höhe	[mm]	9.900	16.000
Durchmesser	[mm]	2.900	2.900
Isolationsdicke	[mm]	200	200
Wärmeleitfähigkeit (Glaswolle)	Mineralwolle [W/mK]	0,035-0,045 ^[1]	0,035-0,045 ^[1]
Investitionskosten	[€]	51.913,-	76.821,-
KWK-Zuschlag	[€]	15.000,-	23.046,-

3.2.3 Heizkessel

Zum Zweck der Deckung der Spitzenlast, sowie Redundanz des BHKW während unwirtschaftlichen Betriebszuständen, Wartung oder Betriebsausfällen, sind in dem Energieversorgungssystem zwei Heizkessel des Typs Logano S825L LN der Firma Buderus integriert (Anwendungsfall 2014). Die Nennwärmeleistung des Heizkessels beträgt 3.000 kW bei Auslegungstemperaturen von 70 °C Rücklauf- und 95 °C Vorlauftemperaturen. Weitere relevante Daten werden in Tabelle 7 dargestellt. (Buderus 2005, S. 17)

Logano S825L LN (6 bar)		
Kesselgröße		3.000
Max. Nennwärmeleistung	[kW]	3.000
Kesselgewicht	[kg]	6.900
Wasserinhalt	[m ³]	4,1
Zul. Vorlauftemperatur	[°C]	110
Zul. Betriebsdruck	[bar]	6

Tabelle 7: Technische Daten „Logano S825L LN“ (Buderus 2005, S. 17)

Abschließend ist in Abbildung 4 der Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der mittleren Kesseltemperatur und der Last abgebildet.

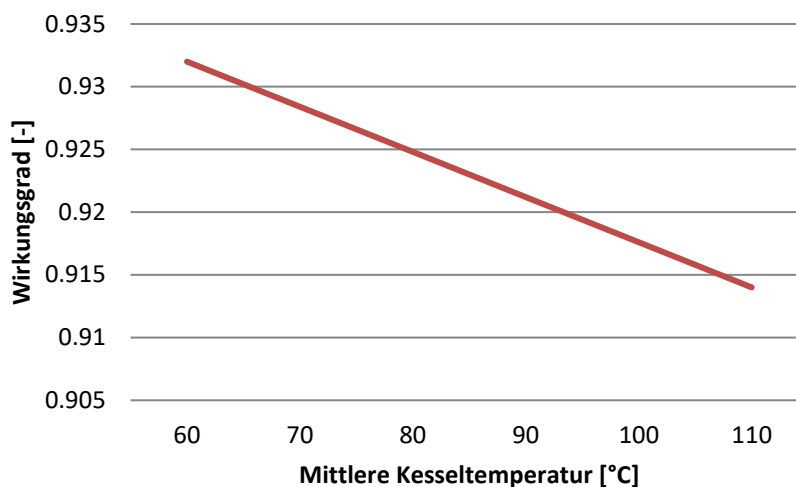


Abbildung 4: „Logano S825L-LN“ Wirkungsgrad über der mittleren Kesseltemperatur (Buderus 2005, S. 34)

Betriebsgebundene Kosten

Da der Heizkessel bereits als eine Komponente des aktuellen Energieversorgungssystems des Anwendungsfalls besteht, werden die kapitalgebundenen Kosten im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur zur Bestimmung der betriebsgebundenen Kosten ermittelt. Bei einer vorhandenen Kesselleistung von 3 MW ergeben sich gemäß der Kostenfunktion Investitionskosten in einer Höhe von ca. 47.000,- € sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten von 940,- €/a.

3.2.4 Elektrodenkessel

Um Untersuchungen bezüglich einer bivalenten Anlagenversorgung durchzuführen, wird außerdem ein Elektrodenkessel berücksichtigt. Diese Bauform des Elektrokessels wird insbesondere in hohen Leistungsklassen besonders häufig verwendet. Auf eine Anfrage hinsichtlich eines Modells in dem Leistungsbereich von 3 MW bei der Firma „Velde“ wurden folgende Leistungsdaten zur Verfügung gestellt.

Tabelle 8: Technische Daten des Elektrodenkessels der Firma Velde (Anhang)

Elektrodenkessel der Firma „Velde“		
Wirkungsgrad	[-]	>0.99
Stufenloser Regelbereich	[%]	0-100
Anfahrzeit	[min]	<5

Kapital- und betriebsgebundene Kosten

Die Investitionskosten folgen aus der Kostenkurve der spezifischen Investitionskosten und einer Modulleistung von 3.000 kW. Es resultiert ein Wert von 751.612,- €. Außerdem ergeben sich Wartungs- und Instandhaltungskosten in einer Höhe von 7.516,- €/a.

3.2.5 Kühlturm

Als Hilfsaggregat zur Rückkühlung des BHKW-Rücklaufs soll ein Kühlturm dienen. Da bisher kein Kühlturm in dem Energienetz der Produktion vorgesehen ist, werden in diesem Abschnitt vor allem die kapitalgebundenen Kosten bestimmt. Auf Basis der Literaturrecherche fällt die Auswahl auf einen Nasskühlturm mit radialem Ventilator. Dieser repräsentiert die gängigste Bauform und weist die höchsten Wirkungsgrade auf. Die maximal notwendige Kühlleistung zur Berechnung der Investitionskosten wurde im Nachhinein aus den Ergebnissen einer Simulation entnommen und beträgt: $\dot{Q}_{Kühl} = 800 \text{ kW}$.

Kapital- und betriebsgebundene Kosten

Die Investitionskosten werden entsprechend der Kostenfunktionen errechnet. Demnach resultieren die Investitionskosten in einen Betrag von 22.719,- € bei spezifischen Kosten für einen Kühlturm mit einer Kühlleistung von 0,8 MW von 28,39,- €/kW.

Des Weiteren werden die Betriebskosten simulationssynchron nach der Formel aus Abschnitt berechnet.

3.2.6 Wärmerückgewinnungsanlage

Die vorrangige Aufgabe der Wärmerückgewinnungsanlage ist es, die Heizlast der Reinigungsbecken zu decken. Da diese, wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, im Status Quo elektrisch beheizt werden und das thermische Potential des Abgasstromes der Gasnitrieröfen ungenutzt bleibt, erhofft man sich somit einen wirtschaftlichen Vorteil. Überdies werden in der vorliegenden Arbeit weitere Wärmerückgewinnungsanlagen integriert, um deren ökonomisches und energetisches Potential zu beurteilen.

Zum besseren Verständnis des Wärmerückkopplungssystems, ist dieses in Abbildung 5 vereinfacht dargestellt. Abgasseitig wird eine Abgasverrohrung von den Fackeln bis zum Wärmetauscher installiert. Mit Hilfe eines Rippenrohr-Wärmetauschers erfolgt die Übertragung der thermischen Leistung von der Abgas- auf die Wasserseite. Der Rippenrohrwärmetauscher basiert auf einer robusten Bauweise aus Edelstahl. Außerdem ist abgasseitig ein externer Bypass vorhanden, der die Regelbarkeit der Wärmeleistung ermöglicht. Wasserseitig ist für jeden AWT ein eigener 5 m³ Pufferspeicher zur Glättung der Wärmeleistung vorgesehen. Die Auslegung der AWT wurde von einem deutschen Energiedienstleister durchgeführt. Demnach erreicht je ein

Wärmerückgewinnungs-System, bestehend aus je einem Abgaswärmetauscher an drei Gasnitrieröfen, eine Leistung von 52 kW, um ein Reinigungsanlage zu versorgen.

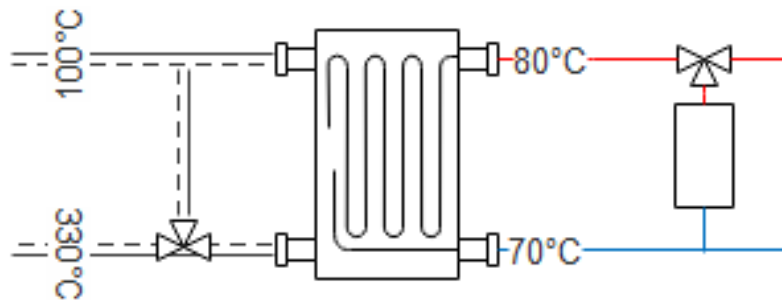


Abbildung 5: Systemaufbau der Wärmerückgewinnungsanlage

Da zu dem verwendeten Pufferspeicher keine detaillierten Daten zur Verfügung stehen, wird im weiteren Verlauf ein, in Tabelle 9 vorgestelltes Referenzprodukt, berücksichtigt.

Tabelle 9: Technische Daten des Pufferspeichers „ThermoOne P“ (BTD GmbH 2018, S. 5; Dipl.-Ing. Nierobis 2018^[1])

Technische Daten: „ThermoOne P“		
Volumen:	[m ³]	5
Höhe	[mm]	3.014
Durchmesser	[mm]	1.600
Isolationsdicke	[mm]	100
Wärmeleitfähigkeit Mineralwolle (Glaswolle)	[W/mK]	0,035-0,045 ^[1]

Gasnitrieröfen

Das Nitrieren ist ein Verfahren zur Oberflächenbearbeitung. Bei Temperaturen von 480 °C bis 590 °C diffundiert atomarer Stickstoff aus dem Prozessgas in die Oberfläche des Bauteils. Die entstandene Randschicht ist sehr hart, aber auch spröde und weist eine sehr hohe Verschleißfestigkeit auf. Ein großer Vorteil des Verfahrens ergibt sich durch die Tatsache, dass während der Prozedur keine thermische Umwandlung im Werkstoff entsteht, wodurch auch bereits vergütete oder fertig bearbeitete Bauteile behandelt werden können. (Härtetechnik Hagen GmbH 2018)

In dem hier beschriebenen Werk befinden sich 22 dieser Hochöfen. Sie sind sogenannte Einkammeranlagen mit Ofentemperaturen von 550 °C. Überdies erfolgt die Kühlung der Chargen mit Hilfe einer Gebläsechargenkühlung während überschüssige Wärme über den Kühlturm abgetragen wird. Der Ofen wird 24 h und 7 Tage die Woche betrieben. Die Volumenströme und Abgastemperaturen dürfen im Kontext dieses Beitrags nicht explizit genannt werden. (Anwendungsfall 2018, S. 79–87)

Tabelle 10: Technische Daten Gasnitrierofen (Anwendungsfall 2018, S. 79–87)

Technische Daten:	Mittelwert bei T>100°C	Maximalwerte
Gasnitrierofen		
Temperatur [°C]	331	554
Normvolumenstrom [Nm ³ /h]	230	297

Kapitalgebundene Kosten

Durch ein Richtpreisangebot eines Unternehmens in der Branche der Abgastechnologien liegen folgende Informationen über die Investitionskosten vor. In dem Angebot werden die Ausgaben in vier Teilleistungen aufgeteilt:

- Abgasseite inklusive Verrohrung, Wärmetauscher mit Bypass und Maschinenbühne
- Wasserseite mit der Verrohrung und einem 5 m² Wasserspeicher
- Mess- Steuerungs- und Regelungstechnik inklusive Schaltschrank und Verkabelung
- Montage

In Tabelle 11 werden die anfallenden Kosten tabellarisch aufgelistet.

Tabelle 11: Investitionskosten der Abgas-Wärmerückgewinnungs-Anlage (Schröder 2018)

Leistung	Kosten [€]
Abgasseite	42.650,-
Wasserseite	51.250,-
MSR	14.300,-
Montage	26.500,-
Gesamtpreis	134.700,-

Die betriebsgebundenen Kosten der Wärmerückgewinnungsanlage resultieren aus der Wartung und Reinigung der Wärmetauscher. Da diese Kosten jedoch in Bezug auf die Investitionskosten sehr gering sind, werden diese im Rahmen der bevorstehenden Untersuchungen vernachlässigt.

4 Simulationsmodell

Die Vorgehensweise im Bereich der Energieversorgung zeichnet sich in den meisten Unternehmen, insbesondere bei kleinen und mittelständischen Unternehmen, durch einen experimentellen Charakter aus. Zum Beispiel werden Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz meist durch statische „vorher-nachher“-Berechnungen validiert und direkt umgesetzt. Während diese Vorgehensweise bei kleinen Investitionen wie Energiesparlampen kein großes finanzielles Risiko birgt, kann bei der Installation von beispielsweise Wärmerückgewinnungsanlagen mit einem großen Investitionsvolumen ein beträchtlicher finanzieller Schaden entstehen, wenn erwartete Einsparungen nicht erzielt werden. Da die erzeugte Abwärme nicht immer produktionsynchron anfällt, ist es schwer den Einspareffekt über einfache Wirtschaftlichkeitsberechnungen zu bestimmen und das Management beziehungsweise die Geschäftsleitung von einer Investition zu überzeugen. Zu diesem Zweck werden, speziell bei Anwendungen mit zeitlichen Abhängigkeiten und vernetzten Energieströmen, Simulationsprogramme herbeigezogen. Sie ermöglichen mit Hilfe von Modellen eine realitätsnahe, detaillierte Darstellung der Problemstellung. Es ist jedoch darauf zu achten, die Detaillierungstiefe der Modelle in einem anforderungsgerechten Rahmen zu halten. Der Aufwand sollte den Nutzen nicht übersteigen. (Hesselbach 2012, S. 95)

4.1 Software

Um eine dynamische Simulation des zu untersuchenden Energieversorgungssystems durchzuführen, wird die Simulationssoftware Dymola ausgewählt. Dymola ist eine kommerzielle Modellierungs- und Simulationsumgebung die auf der Open-Source-Modellierungssprache Modelica basiert. Diese Programmiersprache ist eine objektorientierte, gleichungsbasierte Programmiersprache, wodurch sich zwei signifikante Vorteile ergeben. Die modellierten Klassen basieren auf allgemeinen Gleichungen anstelle von Zuweisungskommandos und ermöglichen so eine akausale Modellierung, das heißt ohne vorher definierte Richtung des Datenflusses. Dies hat den Vorteil, dass nicht nach gesuchten Variablen aufgelöst werden muss. Ein zweiter wesentlicher Vorteil ist die Wiederverwendbarkeit der Klassen, die eine multi-domain Modellierung ermöglicht. Mithilfe einer Klasse können die physikalischen Eigenschaften unterschiedlicher Natur, wie zum Beispiel elektrische, hydraulische oder thermodynamische Zusammenhänge, dargestellt werden. (Fritzson 2012, S. 29)

Während die Simulationsumgebung Dymola eine Vielzahl kommerzieller Bibliotheken zur Verfügung stellt, besteht zusätzlich die Möglichkeit Open-Source-Bibliotheken zu nutzen. Diese werden von Modelica-Nutzern kostenfrei auf „www.modelica.org“ zur Verfügung gestellt. Im

Rahmen dieser Arbeit, wird auf die Klassen der zwei öffentlichen Bibliotheken „Buildings 5.0.1“ und „AixLib 0.6.0.“ zurückgegriffen.

4.2 Vereinfachende Annahmen

Um den Rechenaufwand einzugrenzen werden folgende vereinfachende Annahmen getroffen:

- Der Druckverlust über die verschiedenen Systemkomponenten wird nicht berücksichtigt. Der netzinterne Druckverlust hat alleine einen Einfluss auf den leistungsspezifischen Stromverbrauch der Pumpen. Da der elektrische Verbrauch der Pumpen jedoch viel kleiner als die Stromkosten der Anlage ist, kann dieser vernachlässigt werden.
- Die Kosten für die Einbindung neuer Komponenten in das bestehende Wärmenetz werden nicht berücksichtigt. Diese betragen nur wenige Prozentpunkte der Investitionskosten, weshalb der Einfluss auf die Gesamtannuität gering ist.
- Der Erdgasbezugspreis wird mit einem konstanten Bruttobezugspreis von 4,4 ct/kWh angenommen (Anwendungsfall 2015, Folie 15).
- Bei allen Verbrauchern wird von einer einheitlichen Vorlauftemperatur von 90°C und Rücklauftemperatur von 70°C ausgegangen um den Regelaufwand zu minimieren.
- Die Heizlast beinhaltet die thermischen Verluste des Verteilernetzes.
- Die förderungsbedingten Netznutzungsentgelte werden vom lokalen Stromnetzbetreiber festgelegt. Wegen der geographischen Lage des Anwendungsfalls wird hierfür ein Betrag in der Höhe von 2 ct/kWh angenommen (Bundesnetzagentur 2017).

4.3 Allgemeiner Systemaufbau

In Abbildung 6 ist die Systemkonfiguration in Form eines R&I- Fließschemas dargestellt. Der Heizkreislauf des BHKW ist mit Hilfe eines Pufferspeichers von dem Hauptkreislauf entkoppelt. In dem Rücklauf des BHKW befindet sich der Kühlturm, um bei Überhitzung des Kreislaufs eine konstante Rücklauftemperatur des Blockheizkraftwerks von 70 °C zu garantieren. Wird eine Rücklauftemperatur von 70 °C überschritten, kann der Gasmotor nicht mehr ausreichend gekühlt werden und muss abgeschaltet werden. In dem Heizkreislauf liegt außerdem ein konstanter Massenstrom von 11,1 kg/s vor, der den Herstellerangaben entspricht. Ein Proportionalventil vor dem Kühlturm steuert den zu kühlenden Wassermassenstrom.

Im Hauptkreislauf folgt auf den zuvor genannten Pufferspeicher ein zweiter Pufferspeicher, welcher den Abgaswärmetauscher vom Hauptkreislauf entkoppelt. Um auf Lastspitzen sowie Abweichungen der Rücklauftemperatur beim Verbraucher reagieren zu können, ist außerdem ein Heizkessel in Reihe geschaltet. Je nach Untersuchungsrahmen kann als Spitzenlastkessel zusätzlich ein Elektrodenkessel integriert werden. Der Verbraucherblock beinhaltet alle

Verbraucher der Anlage, wozu die Reinigungsanlagen, der Heizkreislauf sowie die Stromlast des Werkes zählen. Die Leistungen der erzeugenden Komponenten werden durch PID-Regler nach der jeweiligen Vorlauftemperatur auf einen Wert von 90 °C geregelt. Um eine konstante Rücklauftemperatur von 70 °C zu garantieren, liegt in dem Hauptkreislauf kein konstanter Wassermassenstrom vor. Dieser wird nach der Vorlauftemperatur am Verbrauchernetz von 70°C geregelt. Der maximale Massenstrom ergibt sich aus den Pumpen des im Anwendungsfall integrierten Versorgungssystems und beträgt 138,8 kg/s (Anwendungsfall 2014).

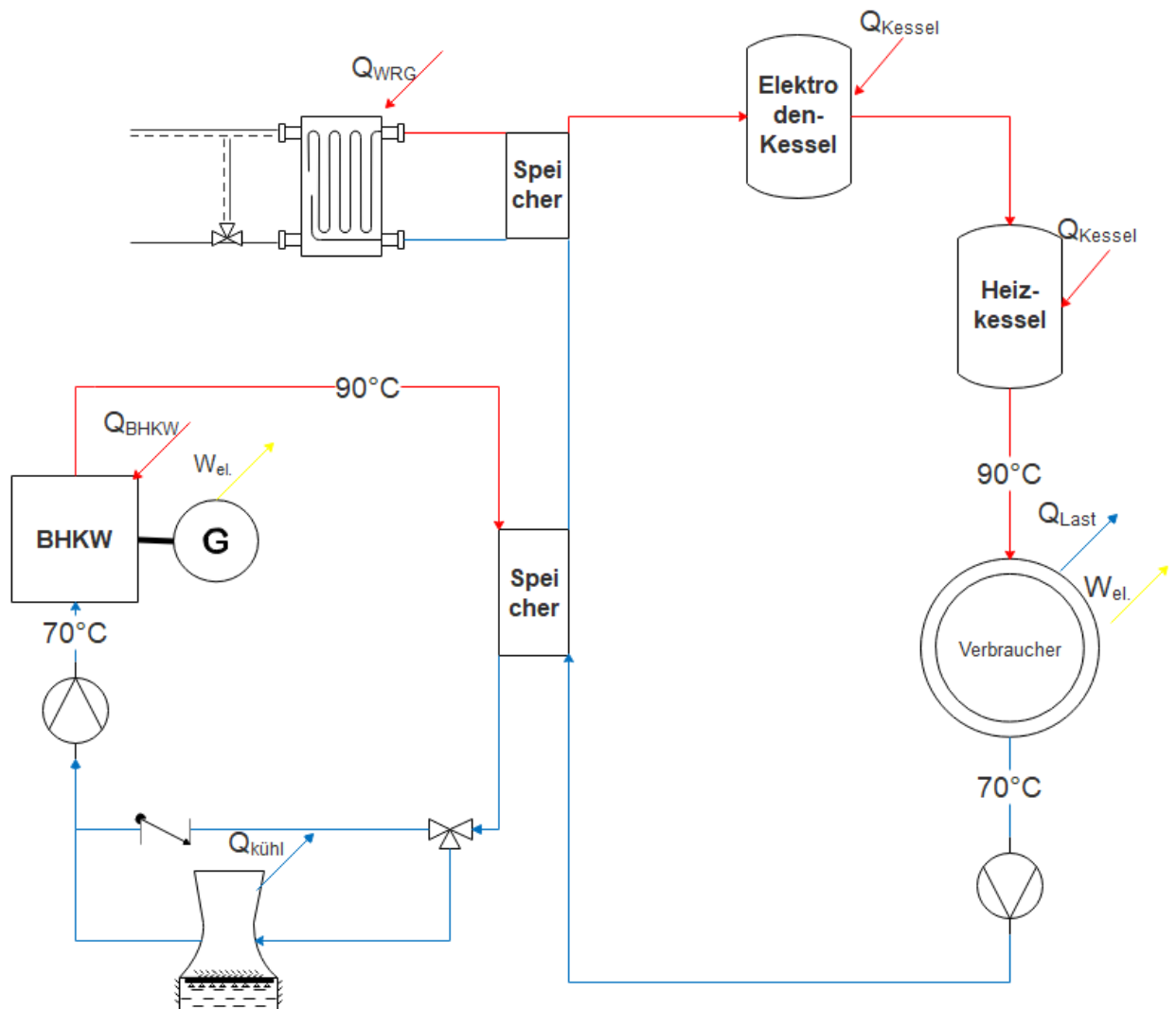


Abbildung 6: Allgemeiner Systemaufbau

4.4 BHKW

Das BHKW ist an einen alleinstehenden Wasserkreislauf mit einem durch eine Pumpe erzeugten konstanten Wassermassenstrom von 11,1 kg/s angeschlossen. Der Heizkreislauf des BHKW muss durch einen Pufferspeicher vom Hauptkreislauf abgegrenzt werden, da für eine realitätsnahe Simulation der Betriebsweise eines BHKW eine konstante Temperaturspreizung in Abhängigkeit

der Last zwischen Vor- und Rücklaufemperatur gegeben sein muss. Diese ist nur bei einem konstanten Wassermassenstrom gegeben, der im Hauptkreislauf nicht realisierbar ist. Ein PID-Regler steuert die Leistung des Moduls in Abhängigkeit von der Vorlaufemperatur des Pufferspeichers der Wärmerückgewinnungsanlage. Zusätzlich ist eine Logik hinterlegt, die das BHKW bei Vorlaufemperaturen von über 70 °C, gemäß der technischen Auslegung, automatisch stoppt. Damit Schwankungen der Rücklaufemperatur auf Grund der schwingenden PID-Regler-Signale keinen maßgeblichen Einfluss auf das BHKW haben, ist bei der Grenztemperatur eine Toleranz von +0,5 °C vorgesehen. Zudem wird im stromgeführten Betrieb von einer Grenztemperatur abgesehen, da für den Untersuchungszweck die Stillstandzeiten nur durch die Grenzkosten bestimmt werden. Der Betriebsbereitschaftsverlust des Moduls wird durch die thermische Trägheit des Systems über die Wärmekapazität des Kessels angenähert, da diesbezüglich keine Angaben vom Hersteller zur Verfügung stehen. Auf dieser Basis wird die Masse des Kessels mit 5.800 kg veranschlagt. Als Werkstoff wird Stahl mit einer Wärmekapazität von 460 J/kgK bei 25 °C und Atmosphärendruck angenommen. Des Weiteren werden durch die Anfahrzeit bedingte Verluste vernachlässigt, da diese weniger als zwei Minuten beträgt. Außerdem gilt die Annahme, dass die thermischen Verluste über die Kesselwände in den Wirkungsgradangaben bereits berücksichtigt werden.

Da das Modell auf den Herstellerangaben von „2G“ zu dem entsprechenden Modul basiert und die Betriebsparameter vom Fabrikant optimal aufeinander abgestimmt sind, sind diese im Zuge der Simulation nicht variierbar.

4.4.1 Betriebsweisen

Das Modell des BHKW lässt sich in Abhängigkeit der zu untersuchenden Konfiguration nach einer wärmegeführten und einer stromgeführten Fahrweise betreiben.

Wärmegeführte Betriebsweise

In einer wärmegeführten Betriebsweise orientiert sich die Last des BHKW immer an der Wärmelast des Gesamtsystems. Da die Wärmerückgewinnungsanlage, abgesehen von den Investitionskosten, Wärme ohne betriebsgebundene Kosten zur Verfügung stellt, sorgt diese für die Deckung der Grundlast des Gesamtsystems. Um trotzdem möglichst viele Betriebsstunden des BHKW ohne Rückkühlung seitens des Hilfsaggregates zu erreichen, ist dieses für die Bereitstellung des nächst größeren Wärmebedarfes zuständig. In den Sommermonat, wenn die thermische Last kleiner ist als die der WRG-Anlagen, einschließlich der minimalen thermischen Leistung des BHKW bei 50 % Last, schaltet das BHKW automatisch ab. Der Heizkessel stellt die teuerste Wärme bereit, ist jedoch in der Regelung der Leistung sehr flexibel, weshalb sich eine Versorgung der Lastspitzen anbietet. In Abbildung 7 ist eine geordnete Jahresdauerlinie der

Gesamtwärmelast des Anwendungsfalls qualitativ dargestellt. Sie veranschaulicht noch einmal die Hierarchie der thermischen Nutzenergiebereitstellung.

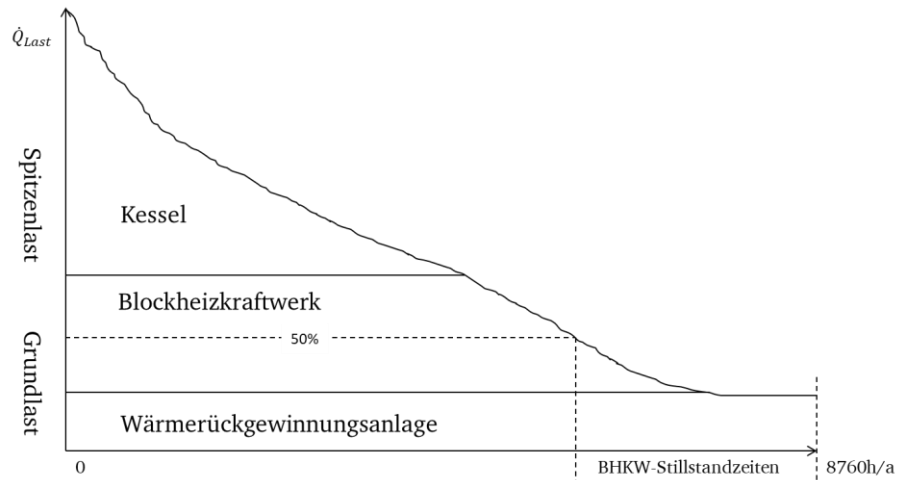


Abbildung 7: Qualitative, geordnete Jahresdauerlinie des Wärmebedarfes bei wärmegeführter Betriebsweise

Stromgeführte Betriebsweise

Unter einer stromgeführten Betriebsweise wird verstanden, dass die KWK-Anlage nicht unter Berücksichtigung der Wärmeabdeckung gesteuert wird, sondern in Abhängigkeit der Residuallast. Die Zeiten der positiven und negativen Residuallast werden anhand der schwankenden Strompreise simuliert. Bei einer negativen Residuallast ergeben sich hohe Strombezugspreise, dementsprechend fallen diese bei positiver Residuallast. Liegt der Strompreis unter den Grenzkosten der Stromerzeugung, die im folgenden Abschnitt berechnet werden, so bleibt das BHKW auch bei vorliegendem Wärmebedarf ausgeschaltet. In diesem Fall übernimmt der Heizkessel oder gegebenenfalls die WRG-Anlagen die thermische Energieversorgung. Im umgekehrten Fall wird die überschüssige Wärme durch den Kühlturm abgetragen. Die abgetragene Wärme entspricht qualitativ dem schraffierten Bereich in Abbildung 8. In derselben Grafik werden die genannten Zusammenhänge durch eine geordnete Jahresdauerlinie veranschaulichend veranschaulicht.

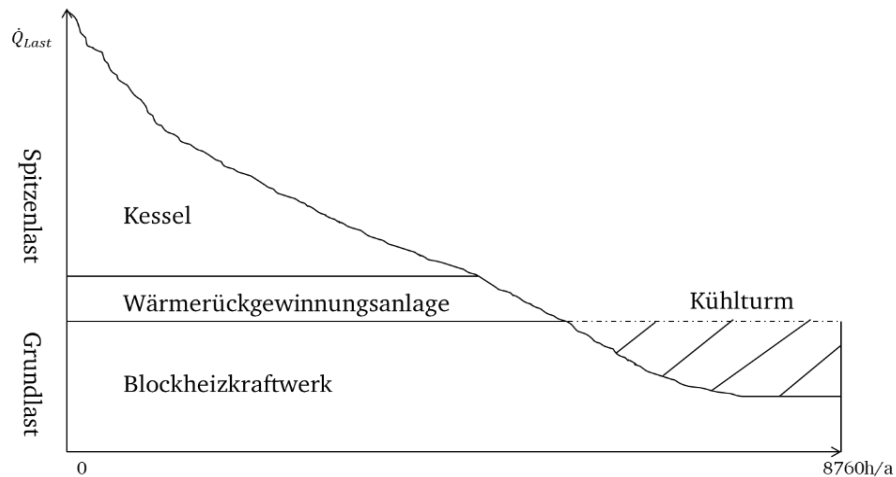


Abbildung 8: Qualitative, geordnete Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs bei stromgeführter Betriebsweise

Um die Grenzkosten des BHKW zur Stromerzeugung zu berechnen, werden die spezifischen Stromerzeugungskosten unter Berücksichtigung des Einflusses der Wärmeerzeugung mit den Strombezugskosten abgeglichen. Das BHKW wird nur dann betrieben, wenn ein wirtschaftlicher Vorteil gegenüber dem Strommarkt und dem Heizkessel erzielt werden kann.

Zur Bestimmung der spezifischen Kosten muss der Brennstoffverbrauch zunächst anteilig der Strom- und Wärmeerzeugung zugeordnet werden. Dies erfolgt gemäß der VDI-Richtlinie 2077 mit den Formeln (VDI-Richtlinie 2077):

$$\frac{\eta_{th}}{\eta_{el} + \eta_{th}} * \dot{Q}_{Bs,BHKW} = \dot{Q}_{Bs,th} \quad (15)$$

$$\frac{\eta_{el}}{\eta_{el} + \eta_{th}} * \dot{Q}_{Bs,BHKW} = \dot{Q}_{Bs,el} \quad (16)$$

Die spezifischen Kosten der Stromerzeugung für 1kW Strom werden im Modell wie folgt ermittelt. Von den Kosten des Brennstoffverbrauchs und denen des Strombedarfs der Rückkühlung werden die förderungsbedingten Vergütungen abgezogen. Das Ergebnis wird in ein Verhältnis zum produzierten Strom gesetzt.

$$K_{el,BHKW} = \frac{\dot{Q}_{Bs,el} * (P_{Bs} - \text{Mineralölsteuer}) - W_{el,BHKW} * P_{Vergütung} + W_{el,Kühl} * P_{Strom}}{W_{el,BHKW}} \quad (17)$$

Des Weiteren erfolgt die Berechnung der spezifischen Wärmeerzeugungskosten mit dem anteiligen Brennstoffverbrauch und dem Gaspreis, abzüglich des rückerstatteten Betrags der Mineralölsteuer:

$$K_{th,BHKW} = \frac{\dot{Q}_{Bs,th} * (P_{Bs} - \text{Mineralölsteuer})}{\dot{Q}_{BHKW}} \quad (18)$$

Analog zu Formel 18, jedoch mit dem vollständigen Gasbezugspreis, werden die spezifischen Wärmeerzeugungskosten des Heizkessels berechnet und von den BHKW-bezogenen Kosten abgezogen:

$$K_K - K_{th,BHKW} = \Delta K_{th} \quad (19)$$

Der Gewinn oder Verlust der Wärmeerzeugung pro kWh_{th} wird abschließend von den Kosten der Stromerzeugung abgezogen. Liegt der resultierende Wert, unterhalb des Strombezugspreises, so ist der Betrieb des BHKW aus ökonomischer Sichtweise gerechtfertigt.

$$K_{el,BHKW} - \Delta K_{th} = K_{Grenz} < P_{Strom} \quad (20)$$

Abschließend wird der Verlauf der Grenzkosten über ein Jahr in Abbildung 9 dargestellt.

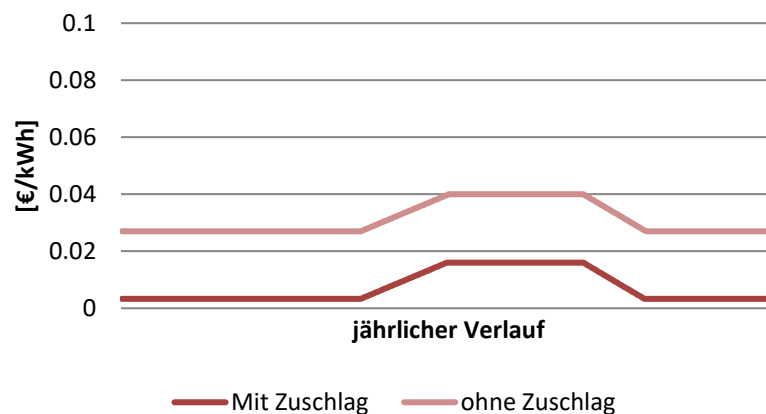


Abbildung 9: Grenzkosten der stromgeführten Betriebsweise

Bivalente Betriebsweise

In einer bivalenten Konfiguration wird das BHKW analog zum stromgeführten System nicht in Abhängigkeit des Wärmebedarfs, sondern der Strombezugskosten betrieben. Der wesentliche Unterschied der beiden Konfigurationen ist jedoch, dass in Zeiten niedriger Strombezugskosten ein Elektrodenkessel einen Großteil der thermischen Systemversorgung übernimmt. In Abbildung 10 ist die Hierarchie der thermischen Nutzenergiebereitstellung dargestellt.

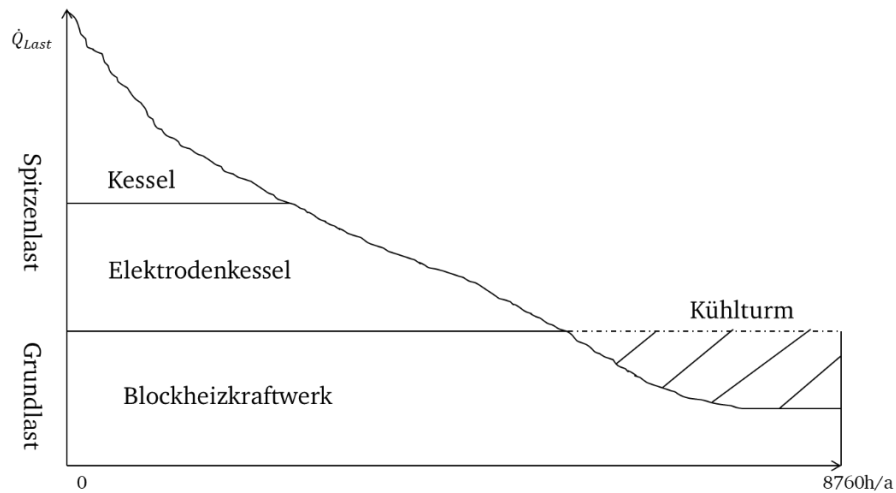


Abbildung 10: Qualitative, geordnete Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs bei bivalenter Betriebsweise

Die Schaltpunkte zwischen der thermischen Versorgung seitens des BHKW oder des Elektrokessels sind durch eine Grenzkostenfunktion gegeben. Diese errechnet sich im Wesentlichen analog zum vorherigen Abschnitt. Die Wärmeerzeugungskosten des elektrischen Heizkessels ergeben sich aus dem Strombedarf und den Börsenstrompreisen wie folgt.

$$K_{Ek} = \frac{W_{el} * (P_{Strom})}{\dot{Q}_k} \quad (21)$$

Die Grenzkosten ergeben sich folgendermaßen.

$$K_K + K_{Ek} - K_{th,BHKW} = \Delta K_{th} \quad (22)$$

$$K_{el,BHKW} - \Delta K_{th} = K_{Grenz} \quad (23)$$

Da der Börsenstrompreis im Gegensatz zum Gasbezugspreis Schwankungen unterliegt, hat auch die Grenzkostenfunktion der bivalenten Erzeugung einen volatilen Verlauf. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Grenzkosten aus Abbildung 11 in Abhängigkeit eines konstanten Strompreisverlaufes, der dem Mittelwert der volatilen Strombezugspreise entspricht, veranschaulicht.

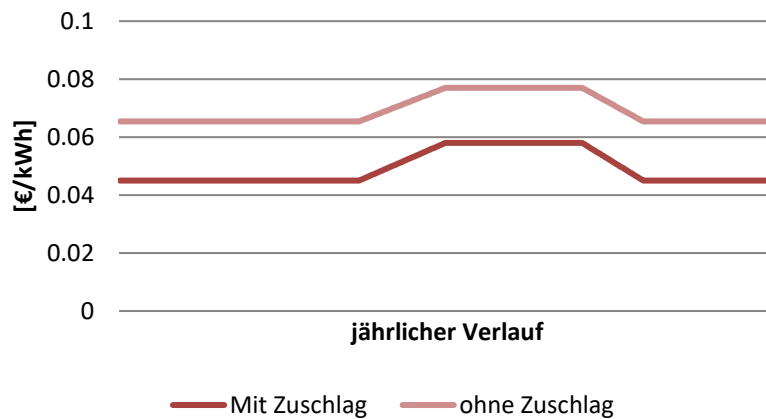


Abbildung 11: Grenzkosten der bivalenten Betriebsweise

4.4.2 Förderung

Die Beträge der Förderung leiten sich für ein KWK-Modul mit einer Leistung kleiner als 1 MW_{el} ab. In Abbildung 12 werden die resultierenden Fördersätze, sowie deren Zuordnung, graphisch veranschaulicht. Es ist zu beachten, dass der Zuschlagssatz in der gegebenen Leistungsklasse nur bei 30.000 Vbh. berücksichtigt wird. Die EEG-Umlage zählt zu den Kosten und ist deshalb mit einem negativen Vorzeichen versehen. Der Zuschuss für Investitionen in Pufferspeicher ist limitiert auf 30 % des Investitionsbetrags. Außerdem wird der Betrag der Förderzahlungen direkt vom Investitionsbetrag abgezogen, sodass dieser nur einen Einfluss auf die kapitalgebundenen Kosten hat.

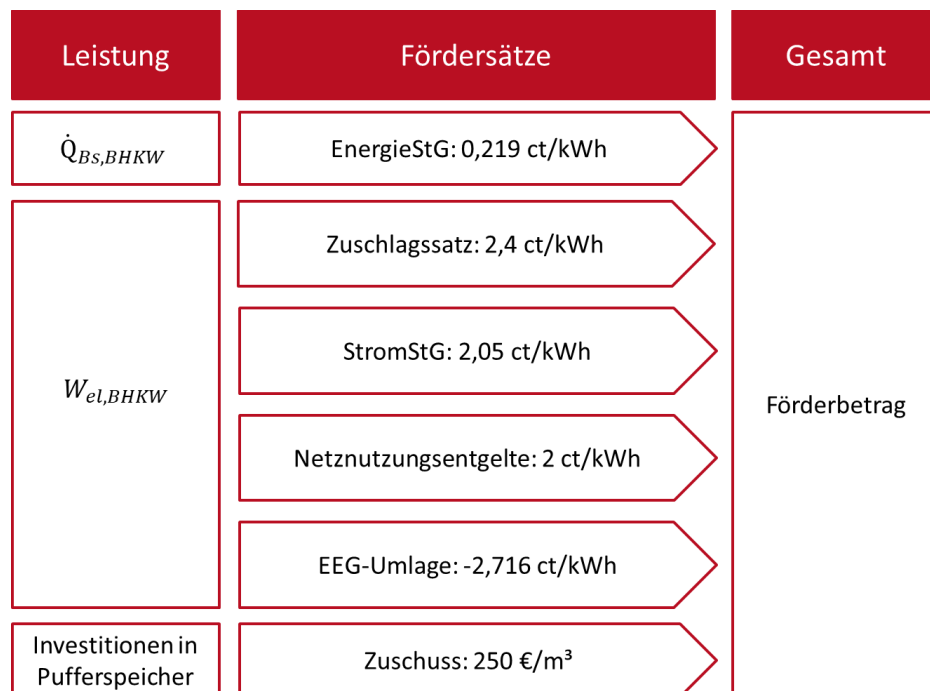


Abbildung 12: Zusammensetzung der KWK-Fördermenge

4.5 Pufferspeicher

Die Darstellung des Pufferspeichers basiert auf dem Modell „BufferStorage“ der öffentlichen „AixLib“- Bibliothek. Das Medium innerhalb des Speichervolumens ist dabei durch eine beliebig einstellbare Anzahl an Schichten, die miteinander interagieren dargestellt. Im Kontext des Modells besteht die Möglichkeit die thermischen Wechselwirkungen der Schichten durch diverse physikalische Zusammenhänge zu beschreiben. Hierbei ist es notwendig einen Kompromiss zwischen dem Nutzen der Detaillierungstiefe und dem Rechenaufwand zu finden. Demnach basiert die Berechnung der übertragenen thermischen Leistung zwischen den Schichten auf der natürlichen Konvektion der Flüssigkeiten. Die treibende Kraft stellt hierbei der Temperaturrespektive Dichteunterschied zwischen den Schichten dar. Um den Rechenaufwand gering zu halten kalkuliert das Modell jedoch nicht die induzierten Massenströme, sondern einen Wärmefluss, der dem Enthalpiefluss des Massenaustauschs durch natürliche Konvektion entspricht. Des Weiteren werden Angaben zur Geometrie des Speichers anhand von Informationen zum bestehenden Energieversorgungssystem des Anwendungsfalls gemacht. Die Eigenschaften der Speicherwände und der Isolierung werden gemäß den Angaben aus Abschnitt 3.2.2 in das Modell integriert.

4.6 Kesselanlagen

Auch die Modellstruktur der Kesselanlagen basiert auf dem einheitlichen Grundkonzept, das bereits in den allgemeinen Grundlagen der Modellkomponenten ausgeführt wurde. Aus den Angaben zur thermischen Leistung der beiden Kessel von 3 MW_{th} wird durch eine Multiplikation mit dem Kehrwert des Wirkungsgrades die zugeführte Brennstoffleistung berechnet. Der thermische Wirkungsgrad des Heizkessels ist in Abhängigkeit der mittleren Kesseltemperatur nach den Herstellerangaben durch Formel 22 definiert.

$$\eta_k = -0,00036 * (T_{Km}) + 0,9536 \quad (24)$$

Des Weiteren wird gemäß der Herstellerangaben für den Elektrodenkessel ein Wirkungsgrad von $\eta_k = 0,99$ angenommen. Für beide Systemkomponenten ist ein gleitender Betrieb möglich. Die Betriebsbereitschaftsverluste der Kesselanlagen werden über das Trockengewicht des Kessels und der damit einhergehenden Wärmekapazität approximiert.

4.7 Kühlturm

Die zentrale Einheit des Kühlturmodells bildet das Modell „YorkCalc“ aus der „Buildings“- Bibliothek. Der Funktionsblock nutzt die Temperaturspreizung und ein hinterlegtes Polynom, um die Approachtemperatur für die freie und erzwungene Konvektion zu berechnen. Das Polynom beschreibt die Charakteristik eines Kühlturms des Herstellers York (simulationresearch.lbl 2018).

Da die Feuchtkugeltemperatur einen signifikanten Beitrag zu der Berechnung der Approachtemperature leistet, wird diese nicht mit einem Standardwert vereinfacht.

Zur Berechnung der Feuchtkugeltemperatur wird daher der jahreszeitliche Verlauf der täglichen mittleren Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit verwendet. Es werden die Wetterdaten für Augsburg verwendet, da sich das Werk in unmittelbarer geographischer Nähe befindet. Der Luftdruck ist als konstant anzunehmen. Um den elektrischen Verbrauch des Modells zuverlässig zu approximieren, wird dieses um eine Kostenfunktion für offene Kühltürme mit Axialventilator erweitert. Die Kostenfunktion stellt den direkten Zusammenhang des elektrischen Verbrauchs zur Kälteleistung dar. Um das Modell bezüglich seiner Anwendungsmöglichkeiten flexibel zu gestalten ist außerdem die Kostenfunktion für einen Radialventilator hinterlegt. Eine dritte Option der Betriebskostenberechnung ergibt sich durch die ursprünglich modellierte Kostenfunktion. Diese wird im Laufe der Untersuchungen jedoch nicht berücksichtigt, da sie sich nicht mit Quellen belegen ließ.

Wie in Abschnitt 4.3 bereits erwähnt wird, ist der Kühlturm über ein 3/2-Wege-Proportionalventil mit dem Rücklauf des BHKW verbunden. Das Modell des Ventils beinhaltet eine prozentuale Charakteristik der Öffnungen 1 und 2 sowie einen linearen Zusammenhang der Öffnungen 2 und 3. Diese Ventilcharakteristiken sind typisch für Ventile des Herstellers „Siemens“ (simulationresearch.lbl 2018). Des Weiteren erfolgt die Regelung der Ventilstellung über die Rücklauftemperatur des BHKW. Ein zweiter PID-Regler ist für die Regelung der Leistung des Ventilators zuständig. Der Ist-Wert des Reglers wird von einem Temperatursensor am Ausgang des Kühlturms bezogen. Das zu kühlende Wasser wird demnach zunächst, nach der Stellung des Proportionalventils, durch den Kühlturm geleitet und durch freie Konvektion gekühlt. Übersteigt die Wasseraustrittstemperatur den Sollwert von 70 °C, so schaltet sich der Ventilator ein und das Medium wird durch erzwungene Konvektion zusätzlich gekühlt.

4.8 Wärmerückgewinnungsanlagen in Gasnitrieröfen

Um die Wärmerückgewinnungsanlage realitätsnah im Simulationsmodell auszudrücken, erfolgte die Darstellung zunächst durch eine physikalische Modellierung des Rauchgasstromes, nach den Angaben zur Betriebsauslastung des Ofens und einem Wärmetauscher zwischen Abgasstrom und Heizkreislauf. Im späteren Verlauf der Modellierung entstand durch die dynamische Darstellung jedoch ein hoher Rechenaufwand, weshalb das System vereinfacht wurde. Die finale Darstellung basiert auf einem Wärmestrom, der analog zu den anderen Modellkomponenten in ein „MixingVolume“ injiziert wird. Der Leistungsverlauf ist in Abbildung 13 dargestellt und gilt für ein Wärmerückgewinnungssystem bestehend aus drei Abgaswärmetauschern, die nach den Herstellerinformationen mit einer durchschnittlichen thermischen Leistung von 52 kW der

Versorgung einer Reinigungsanlage dienen sollen (Schröder 2018). Der Verlauf des Wärmestroms ergibt sich aus den Messungen des Betriebsvolumenstroms und der Rauchgastemperatur aus Abschnitt 3.2.6. Der operative Betrieb ist mit einem Anteil von 16 % angegeben. Währenddessen liegt die durchschnittliche Abgastemperatur bei ca. 62 % im Vergleich zum arbeitenden Zustand. Ferner ist der Wasserkreislauf der Wärmerückgewinnungsanlage durch einen Pufferspeicher vom Hauptkreislauf entkoppelt und der Wassermassenstrom an die Herstellerangaben von 9,64 kg/s angepasst. Um den Ansprüchen einer realitätsnahen Modellierung zu genügen, wurde der Verlauf der Leistung mit den Ergebnissen der physikalischen Modellierung verglichen und angepasst. Es resultiert der Leistungsverlauf aus Abbildung 13.

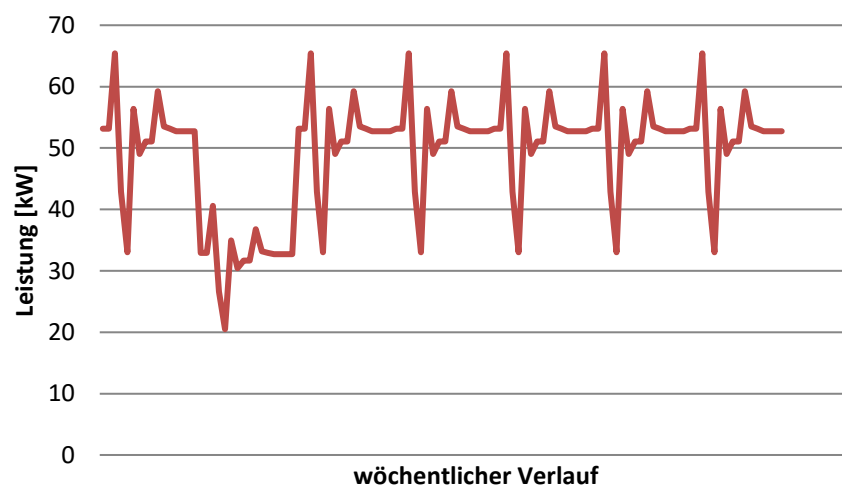


Abbildung 13: Wöchentlicher Verlauf der Wärmeleistung des AWT

Die Regelung des Teilsystems erfolgt mit Hilfe eines PID-Reglers über die Vorlauftemperatur des Pufferspeichers im Hauptkreislauf. Dadurch wird garantiert, dass die Abwärme so lange genutzt wird, bis der Pufferspeicher aufgefüllt ist.

4.9 Strompreis

Der Strompreisverlauf des Ausgangsszenarios basiert auf dem aktuellen Strommix in Deutschland und wurde vom Synergie-Projekt des PTW der TU Darmstadt bereitgestellt. Die Daten ergeben sich aus den Day-Ahead-Stundenpreisen des EPEX Spotmarktes der letzten drei Jahre. Diese wurden stündlich für eine Woche zusammengetragen. Um jahreszeitlich bedingte Schwankungen zu berücksichtigen, wurden drei Referenzwochen erstellt. Eine Woche beschreibt den Strompreisverlauf im Winter, von Dezember bis Februar, eine zweite den im Sommer, von Juni bis August. Die dritte Referenzwoche stellt den Preisverlauf in den Übergangszeiten dar. Da es sich bei den Strompreisen um Nettostrompreise handelt, werden zusätzlich die Steuern berücksichtigt. Die Höhe des steuerlich bedingten Zuschlags wird anhand des aktuellen,

konstanten Strombezugspreis des Anwendungsfalls abgeschätzt. Damit die Ergebnisse der Simulationen mit konstanten und volatilen Strompreisen vergleichbar sind, wird der Mittelwert der drei volatilen Referenzwochen mit Hilfe eines Korrekturfaktors, der dem steuerlichen Zuschlag entspricht, an den konstanten Strombezugspreis des Anwendungsfalls angeglichen.

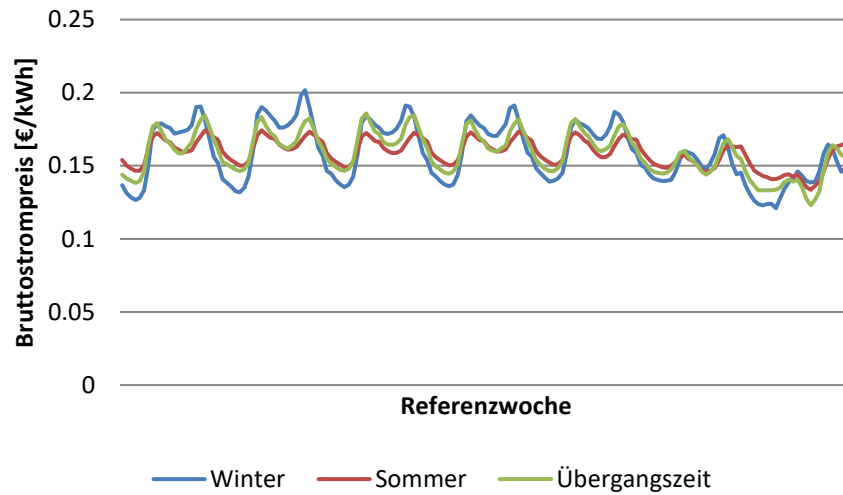


Abbildung 14: Day-Ahead Preisverläufe (Projekt Synergie 2018)

Für die Darstellung volatilerer, zukünftiger Strompreise wird die Differenz zwischen den Day-Ahead-Preisen und dem durchschnittlichen Strompreis errechnet. Diese Differenz wird im Anschluss mit drei unterschiedlichen Volatilitätsfaktoren, die der Ziffer im Namen des Strompreisszenarios entsprechen, multipliziert. In Abbildung 15 „Winter Vol. 0“ genannt, bezeichnet den aktuellen Strompreisverlauf. Es ergeben sich folgende volatile Strompreisverläufe.

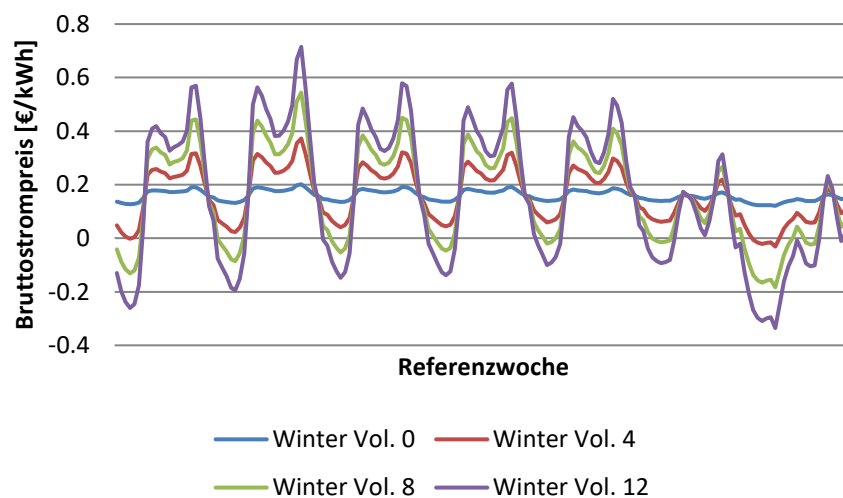


Abbildung 15: Volatile Strompreise (Projekt Synergie 2018)

Die dargestellten Strompreisverläufe werden mit Hilfe einer Text-Datei in das Modell importiert. Über den Modelica Block „CombiTable“ wird die Text-Datei durch die Funktion „filename“ hinterlegt. In in der hinterlegten Datei befinden sich die vier Strompreisszenarien, welche durch Eingabe der Tabellennamen innerhalb der Text-Datei abgerufen werden können.

4.10 Verbraucher

Abschließend wird die Komponente „Verbraucher“ vorgestellt. Das Modell beinhaltet die gesamte thermische und elektrische Last des Anwendungsfalls. Die Leistungsverläufe werden analog zum allgemeinen Aufbau in den Wasserkreislauf injiziert. In Abbildung 16 ist der wöchentliche Stromlastverlauf dargestellt. Die quantitativen Werte der Last sind in Abschnitt 3.1 aufgeführt.

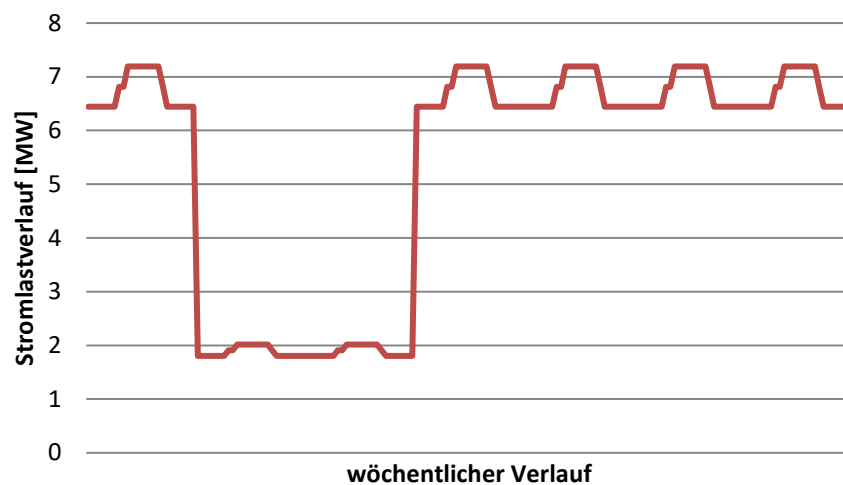


Abbildung 16: Stromlastverlauf des Anwendungsfalls

In Abbildung 17 ist der wöchentliche Lastverlauf einer Reinigungsanlage auf den Sekundärachsen und der jährliche Heizlastverlauf auf den Primärachsen abgebildet. Wie bereits im Zusammenhang mit der Wärmerückgewinnungsanlage erwähnt wurde, wird die Last der Reinigungsanlage der Stromlast zugeordnet falls keine Wärmerückgewinnungsanlagen in das Energieversorgungssystem impliziert sind.

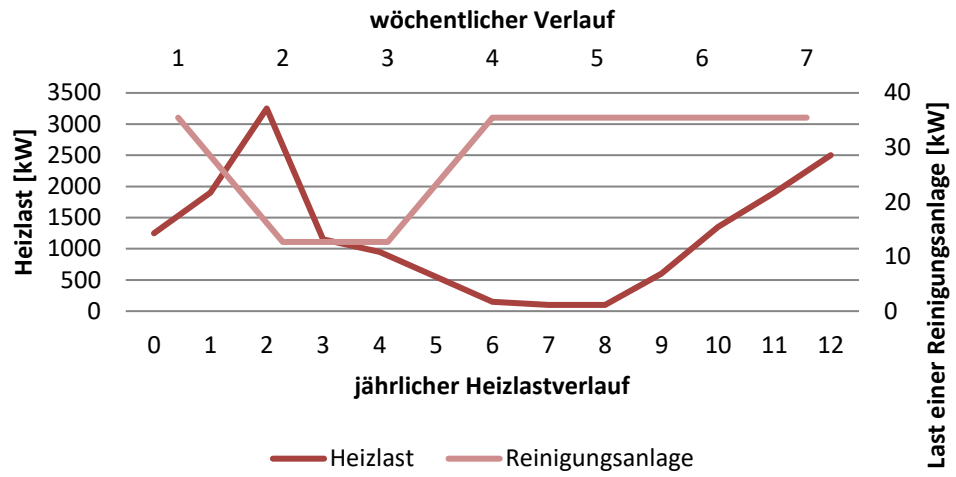


Abbildung 17: Jährlicher Heizlastverlauf und wöchentliche thermische Last einer Reinigungsanlage

5 Anwendung des Simulationsmodells

Für eine gut strukturierte, nachvollziehbare Analyse werden in diesem Kapitel zunächst die Vorgehensweise und der Untersuchungsrahmen definiert, bevor anschließend die Durchführung erfolgt und die Ergebnisse dargestellt und interpretiert werden.

5.1 Wirtschaftlichkeitsanalyse des BHKW

Bei der ersten simulationsbasierten Untersuchung steht eine ökonomische Betrachtung des BHKW im Vordergrund. Es wird ein Vergleich zwischen dem Status Quo und einem Referenzfall ohne BHKW durchgeführt, in dem die Wärmebereitstellung alleine durch zwei Heizkessel erfolgt. Im Gegensatz zu den folgenden Untersuchungen und den vereinfachenden Annahmen aus Kapitel 4.2 werden in diesem Zusammenhang die Einbindungskosten für das BHKW berücksichtigt. Da die Ergebnisse dieser vorgelagerten Untersuchung unabhängig von den folgenden Analysen sind, wird die Vergleichbarkeit der Ergebnisse dadurch nicht eingeschränkt.

In den Ergebnissen der Annuitätenmethode ist eine signifikante Abnahme der jährlichen Kosten von ca. 500.000,- € zu erkennen. Die markantesten Einsparungen ergeben sich bei den bedarfsgebundenen Kosten der Strombereitstellung. Dieser wirtschaftliche Vorteil liegt in den gesetzlichen Vergütungen der KWK-Anlage begründet, durch die eine jährliche Entlastung von 110.000,- € erwirtschaftet wird und den Stromerzeugungskosten für BHKW-Strom bei Vollast in Höhe von 4,4 ct/kWh im Vergleich zum Strombezugspreis von 15,9 ct/kWh. Der Anstieg der kapital- und betriebsgebundenen Kosten fällt im Vergleich zu den Strombereitstellungskosten klein aus. Ferner sinken die bedarfsgebundenen Kosten der Wärmeerzeugung leicht ab. Die Ursache hierfür liegt in dem vergünstigten Erdgasbezugspreis durch die Mineralölsteuerrückerstattung für den im BHKW genutzten Brennstoff, der eine Preissenkung von ca. 12,5 % zur Folge hat. Dem entgegenwirkend ist der thermische Wirkungsgrad, bezogen auf den Wärmeerzeugenden Brennstoff, des Heizkessels um 9 % höher. Es ergibt sich ein ökonomischer Vorteil von 3,5 %. Bezogen auf die Wärmeerzeugungskosten des Referenzfalls entspricht dieser Anteil einem Betrag von ca. 15.000,- €.

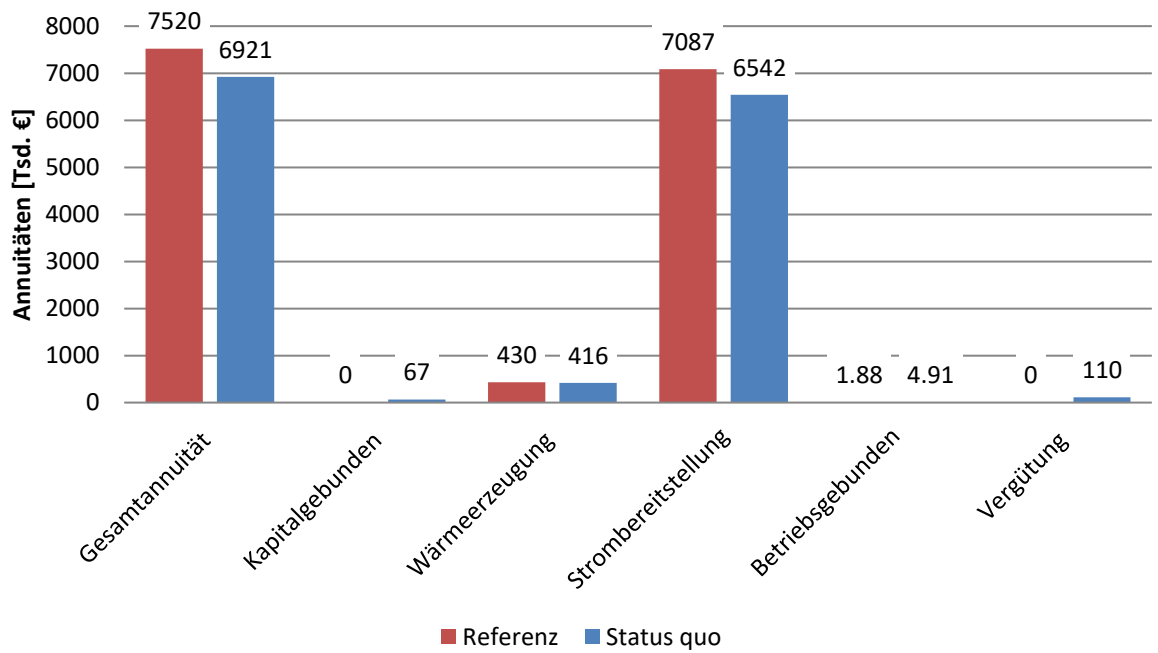


Abbildung 18: Kostengruppen der Konfigurationen Referenzfall und Status Quo

5.2 Energieeffizienz

Die Untersuchungen zur Energieeffizienz beziehen sich primär auf die Integration der Wärmerückgewinnungsanlagen in die Konfiguration der aktuellen Energieversorgung des Anwendungsfalls. Besonders im Fokus stehen hierbei das Energieeinsparpotential und die Auswirkungen der WRG-Anlage auf die Vollbetriebsstunde respektive die Wirtschaftlichkeit des BHKW. Das BHKW wird im Laufe der folgenden Untersuchungen in der wärmegeführten Fahrweise betrieben. Um die Untersuchung besser nachvollziehen zu können, sind in Tabelle 12

zunächst die konfigurationsspezifischen Parameter sowie der resultierende Systemaufbau zusammengefasst.

Tabelle 12: Konfigurationsspezifische Parameter der wärmegeführten Konfiguration

Simulationsspezifische Parameter		Systemaufbau
Parameter:	Ausprägung:	
„Anzahl Heizkessel“	1	
„Anzahl AWT-Systeme“	0-7	
„BHKW“	True	
„Modulierend“	True	
„Rückkühlung“	False	
„Bivalenz“	False	
„Volatile Strompreise“	False	

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus fünf Simulationen, bei denen die Anzahl an integrierten Wärmerückgewinnungssystemen variiert wird, verglichen und interpretiert. Es ist zu beachten, dass eine Komponente der Verbraucher, die Reinigungsanlagen, bei einem Systemaufbau ohne WRG-System elektrisch beheizt wird. Im Gegensatz dazu werden diese in einer Konfiguration mit WRG-System in den Heizkreislauf integriert. Sobald Abgaswärmetauscher im Abgasstrang der Gasnitrieröfen berücksichtigt werden, entfällt demnach der Energiebedarf der Reinigungsanlagen aus dem Strombedarf und wird der Wärmelast zugeteilt.

Abbildung 19 veranschaulicht zunächst die Anteile der einzelnen Komponenten an der Wärmeversorgung des Systems. Es ist zu erkennen, dass vor allem die Heizkesselwärme bei zunehmender Anzahl an Wärmerückgewinnungssystemen abnimmt, was einen positiven gesamtwirtschaftlichen Effekt erhoffen lässt.

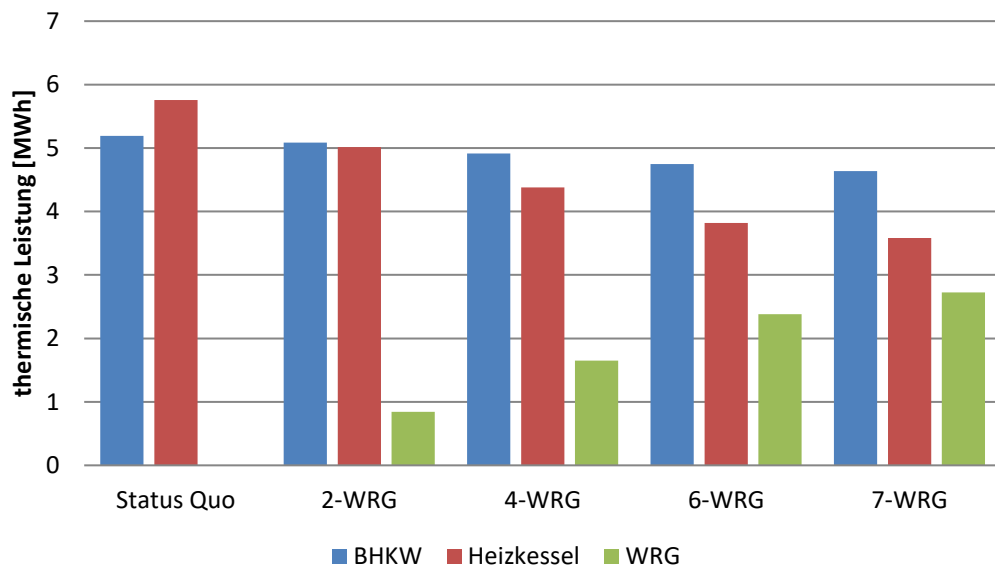


Abbildung 19: Anteile an der thermischen Versorgung

Des Weiteren sind in Abbildung 20 die spezifischen Wärme- und Strombereitstellungskosten über die Vollbenutzungsstunden des BHKW entsprechend der fünf zu untersuchenden Konfigurationen aufgetragen. Beide Werte implizieren die Vergütung durch das KWKG. Anhand der Kennzahl auf der Sekundärachse ist eine Abnahme der Wärmeerzeugungskosten, resultierend aus dem zunehmenden Anteil an „kostenloser“ Abwärme durch die WRG-Systeme, zu erkennen. Die Strombereitstellungskosten steigen zunächst nicht an, da der Gesamtstrombedarf der Anlage durch die thermische Versorgung der Reinigungsanlagen sinkt.

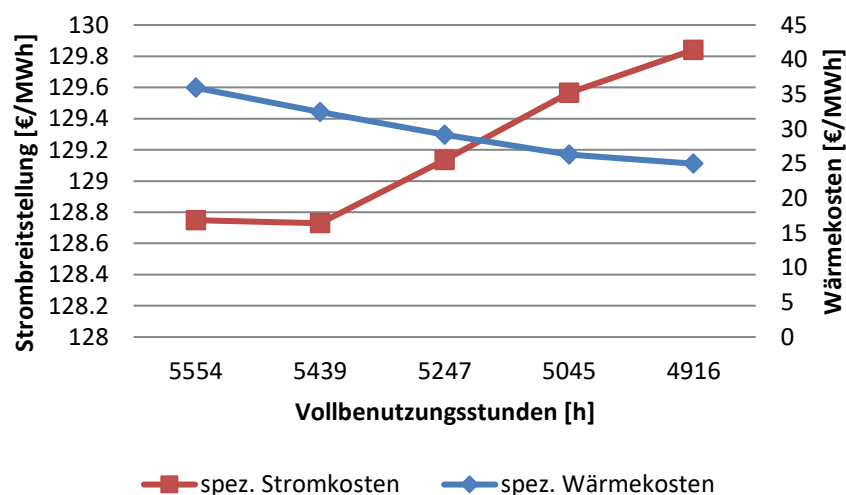


Abbildung 20: Spezifische Wärme- und Strombereitstellungskosten über den Vollbenutzungsstunden

Durch die Integration zusätzlicher Abgaswärmetauscher fallen jedoch die Vollbenutzungsstunden und somit auch der Anteil an BHKW-Strom, wodurch mehr

kostenintensiver Strom aus dem Netz bezogen werden muss und somit die Strombereitstellungskosten der gesamten Anlage steigen.

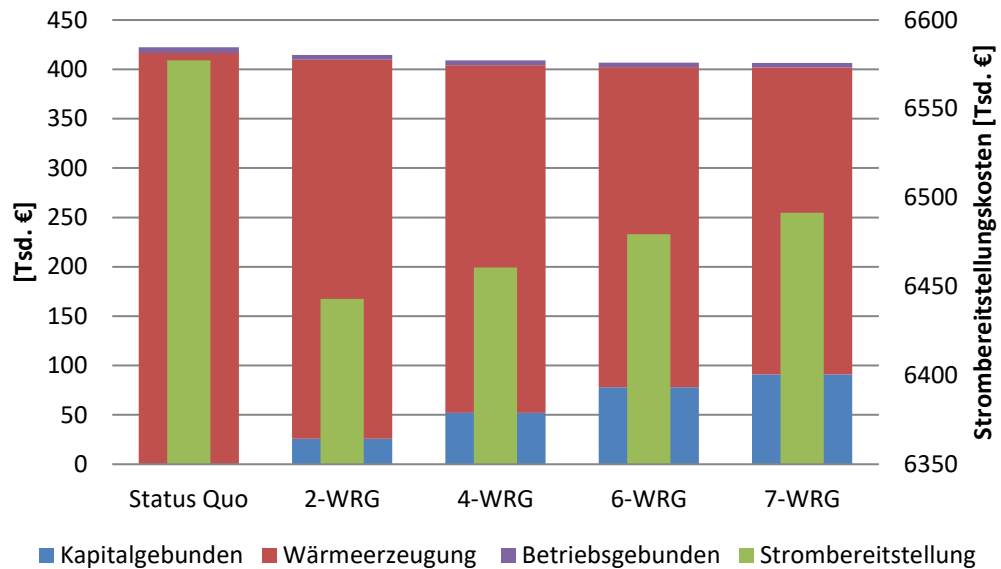


Abbildung 21: Kostengruppen der wärmegeführten Betriebsweise unter Variation der WRG-Anlagen

Anhand von Abbildung 21 ist erkennbar, dass die Kosten der Wärmeerzeugung einschließlich der kapital- und betriebsgebundenen Kosten, die ihren Ursprung in den WRG-Systemen haben, in der Summe abnehmen. Auf der Sekundärachse sind die bedarfsgebundenen Strombereitstellungskosten aufgetragen. Unter Vernachlässigung des Effekts der thermischen Versorgung der Reinigungsanlage auf die Strombereitstellungskosten ab der Konfiguration „2AWT“, ist ein kontinuierlicher Anstieg dieser Kosten zu erkennen. Dieser Anstieg ist durch den negativen Einfluss der WRG-Anlage auf die Auslastung des BHKW zu begründen.

Zur abschließenden Beurteilung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Konfigurationen sind in Abbildung 22 der Erdgasbedarf und die Gesamtannuitäten aufgetragen. Der Stromverbrauch wird in diesem Zusammenhang vernachlässigt, da die Wärmerückgewinnungsanlagen diesbezüglich keinen signifikanten Einfluss haben. Durch die graphische Darstellung lässt sich jedoch eine deutliche Einsparung des Brennstoffverbrauchs feststellen. Aus der Integration einer Wärmerückgewinnungsanlage folgt im Durchschnitt eine Einsparung von ca. 520 MWh Erdgas pro Jahr. Da die Stromversorgung auf Grund des höheren Volumens jedoch einen weitaus größeren Einfluss auf die jährlichen Annuitäten hat, und sich die Strombereitstellungskosten gemäß Abbildung 20 antiproportional zur Anzahl an WRG-Systemen verhalten, ist die Investition in eine Wärmerückgewinnungsanlage aus ökonomischer Sicht nicht zu rechtfertigen. Es ist jedoch zu empfehlen, den Nutzwärmebedarf der Reinigungsanlagen über das Heiznetz zu decken, da eine elektrische Versorgung bei den aktuellen Strompreisen signifikant höhere strombereitstellungskosten verursacht. Diese Tatsache wird durch die Darstellung der

„Gesamtannuität th.“ für eine thermische Versorgung der Reinigungsanlagen ohne integriertes Wärmerückgewinnungssystem ersichtlich. Da in Abbildung 21 alle Beträge der Primärachse in der Summe abnehmen, lässt sich die Aussage treffen, dass die Wärmerückgewinnungsanlagen in einem Energiesystem ohne BHKW eine sinnvolle Investition darstellen würde. In diesem Fall würde der negative Effekt auf die Strombereitstellungskosten nicht auftreten.

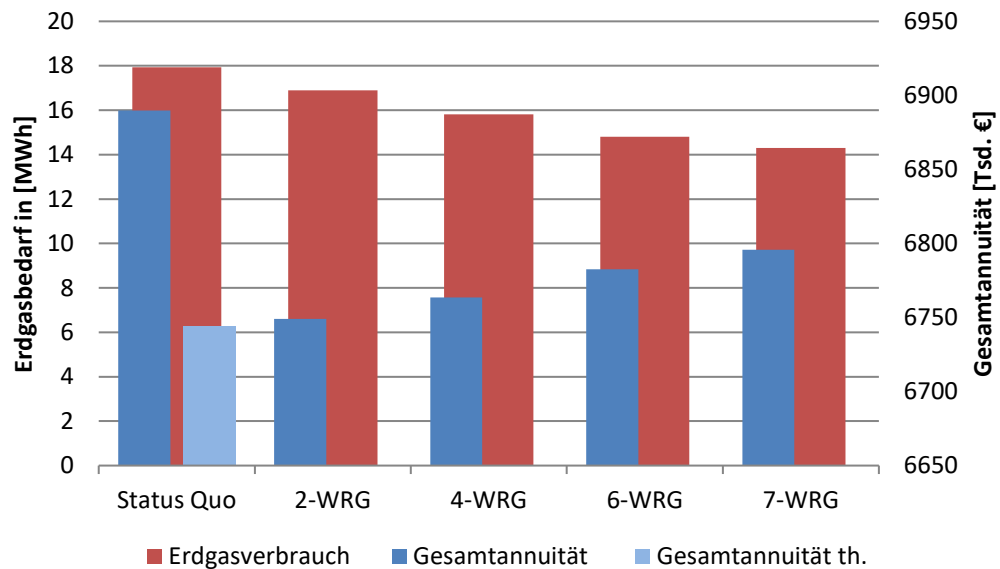


Abbildung 22: Darstellung der Gesamtannuität und des Energiebedarfs

5.2.1 Variation der Pufferspeichergröße

Im Rahmen der Untersuchungen der Energieeffizienz wird nun der Einfluss der Pufferspeichergröße auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage betrachtet. Die Analyse bezieht sich auf einen wärmegeführten Systemaufbau mit vier integrierten Wärmerückgewinnungssystemen. Diese Konfiguration wird als Basis der Untersuchungen gewählt, da die Investition in vier WRG-Systemen zum Zweck der Wärmeversorgung der Reinigungsanlagen als am wahrscheinlichsten gilt und in Simulationen bezüglich der Pufferspeichervariation weder in der stromgeführten noch der bivalenten Konfiguration signifikante Effekte erzielt werden konnten. In beiden Systemkonfigurationen hat die Wärmelast, respektive die Temperaturen im Verteilernetz, keinen Einfluss auf die Betriebspunkte der versorgenden Komponenten, weshalb auch in späteren Simulationen auf eine Betrachtung verzichtet wird. In den folgenden Untersuchungen wird der Pufferspeicher des Anwendungsfalls als gegeben angenommen während die Erweiterung um eine größere Bauform als Zusatzinvestition in den kapitalgebundenen Kosten berücksichtigt wird. Ferner wird auch die speicherspezifische Förderung durch das KWKG berücksichtigt.

Die Simulationsergebnisse aus Abbildung 23 zeigen, dass eine Variation des Pufferspeichervolumens den erwarteten Effekt erzielt, indem es einen Anstieg der

Vollbenutzungsstunden proportional zur Größe der Pufferspeicher verursacht. Durch die höheren Vollbenutzungsstunden des BHKW verringern sich nicht nur die Wärme-, sondern auch die Stromerzeugungskosten der Anlage, während die Erlöse steigen. Die Investition in einen der beiden Pufferspeichervarianten mit kapitalgebundenen Annuitäten von 3.555,- €/a und 5.178,- €/a, bei dem gewählten Betrachtungszeitraum von 15 Jahren, kann jedoch trotz einer Erhöhung der Vollbenutzungsstunden um ca. 66 h/a nicht amortisiert werden. Durch den Förderbetrag sinken die investitionsspezifischen Annuitäten um 1445,- €/a, beziehungsweise 2219,- €/a. Dieser Betrag reicht jedoch nicht aus um eine Investition aus wirtschaftlicher Sicht zu rechtfertigen.

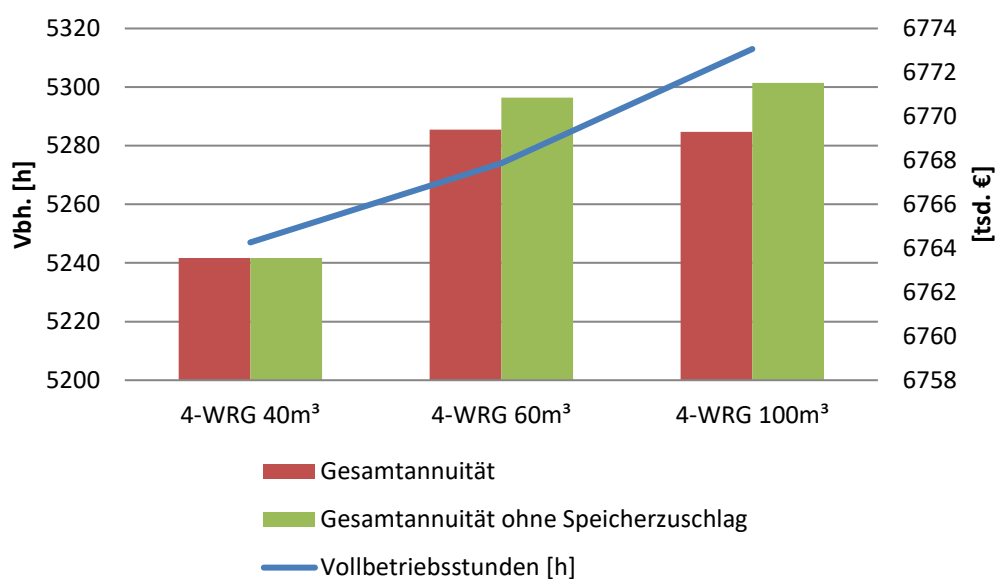


Abbildung 23: Pufferspeichervariation in der wärmegeführten Konfiguration mit vier WRG-Systemen

5.3 Energieflexibilitätpotential

In den Untersuchungen zum Energieflexibilitätpotential steht zunächst die stromgeführte Fahrweise im Vordergrund, bevor im nächsten Abschnitt eine bivalente Energieversorgung genauer betrachtet wird. Im Anschluss werden beide Konfigurationen miteinander verglichen.

5.3.1 Stromgeführte Konfiguration

Zu Beginn der Analyse erfolgt ein Vergleich zwischen der stromgeführten Konfiguration, einschließlich der Investition in einen Kühlturm als Rückkühlaggregat, und dem Status Quo, welcher eine wärmegeführte Betriebsweise impliziert. Um Aussagen über das Energieflexibilitätpotential treffen zu können, werden im Anschluss die drei verschiedenen Strompreisszenarien aus Abschnitt 4.9 in dem stromgeführten System mit den folgenden konfigurationsspezifischen Parametern verglichen.

Tabelle 13: Konfigurationsspezifische Parameter der stromgeführten Konfiguration

Simulationsspezifische Parameter		Systemaufbau
Parameter:	Ausprägung:	
„Anzahl Heizkessel“	1	
„Anzahl AWT-Systeme“	0	
„BHKW“	True	
„Modulierend“	False	
„Rückkühlung“	True	
„Bivalenz“	False	
„Volatile Strompreise“	True	

Wie bereits erwähnt zielt die erste Betrachtung auf einen ökonomischen Vergleich der wärme- und stromgeführten Betriebsweise ab. Die konfigurationsspezifischen Parameter sind in Tabelle 13 aufgeführt. Die beiden Systemkonfigurationen unterscheiden sich unter anderem durch statische und volatile Strompreise, die dem aktuellen Strommix entsprechen. Da der Mittelwert des volatilen jedoch mit dem des starren Preisszenarios übereinstimmt, kann ein Vergleich zwischen den beiden Ausführungen vorgenommen werden. Die Investition in den Kühlturm mit einer jährlichen Annuität von 2.188,- € sowie die betriebsgebundenen Kosten in einer Höhe von 6.441,- €/a, werden in Abbildung 24 zur Übersichtlichkeit vernachlässigt, in dem Betrag der Gesamtannuität jedoch berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass durch die stromgeführte Fahrweise, wie erhofft, ein erheblicher monetärer Vorteil in der Strombereitstellung erwirtschaftet werden kann. Die Grenzkosten des BHKW werden in dem aktuellen Strompreisszenario nicht unterschritten, wodurch das BHKW ganzjährig betrieben werden kann. Dementsprechend sind die Stromerzeugungskosten ganzjährig, auch nach Ablauf der Zuschlagszahlungen über den 30.000 Vbh., günstiger als die Strombezugspreise. Auch der zusätzliche Strombedarf des Kühlturmes kann diese Tatsache nicht ändern. Es fällt jedoch auf, dass durch die abgetragene, überschüssige Wärme in den Sommermonaten von ca. 1,95 MWh, die jährlichen Kosten der Wärmeerzeugung und auch der Erdgasverbrauch ansteigen.

In der Summe, unter Berücksichtigung der Vergütung, ergeben sich durch eine stromgeführte Betriebsweise des BHKW, trotz Zusatzinvestition in einen Kühlturm, jährliche Einsparungen in Höhe von ca. 290.000,- € im Vergleich zur derzeitigen Energiebereitstellung des Anwendungsfalls.

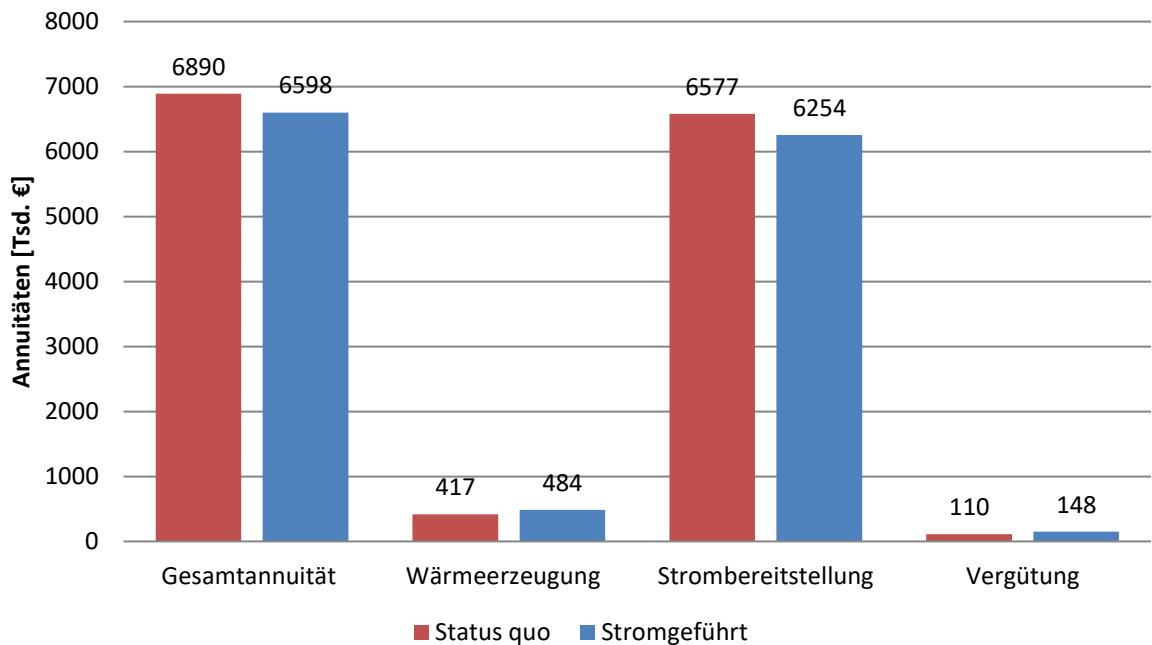


Abbildung 24: Annuitäten des Status Quo und der stromgeführten Konfiguration

Energieflexibilitätspotential der stromgeführten Konfiguration

Im folgenden Absatz wird eine Analyse des Energieflexibilitätspotentials der stromgeführten Konfiguration anhand der vier unterschiedlichen Strompreisszenarien aus Kapitel 4.9, durchgeführt. Mit Hilfe der Ergebnisse kann somit eine fundierte Einschätzung getroffen werden, wie sich das Energieversorgungssystem in zukünftigen, volatilen Strommärkten verhalten wird.

Die Volatilität der Strombezugspreise hat einen starken Einfluss auf die jährlichen Vollbenutzungsstunden der Anlage, also auf die Zeitspannen, in der das betriebene BHKW einen ökonomischen Vorteil bewirkt. Der beschriebene Effekt wird in Abbildung 25 graphisch veranschaulicht. Es wird deutlich, dass die Auslastung in einem antiproportionalen Zusammenhang zu der Volatilität der Strompreise steht. In einem deutlich zu erkennenden, direkten Zusammenhang zu den Vollbenutzungsstunden steht außerdem die thermische Energie, die in den Sommermonaten, wenn keine ausreichende Wärmelast vorliegt, vom Kühlturm aus dem System abgetragen werden muss. Die maximale Kühlleistung des Kühlturms bei „Volatil 0“ beträgt 750 kW. Des Weiteren beläuft sich die überschüssige thermische Energie auf 1.951 MWh/a.

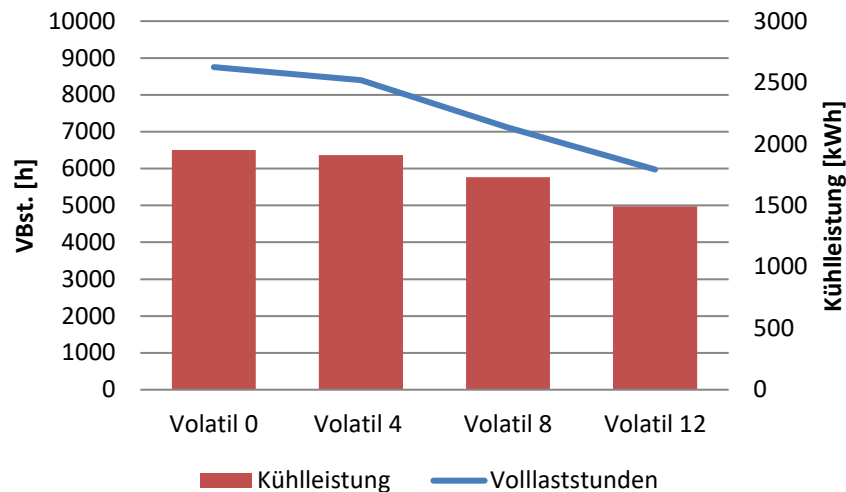


Abbildung 25: Vollbenutzungsstunden über dem Strompreisszenario

Ferner ist in Abbildung 26 der Zusammenhang zwischen den spezifischen Stromkosten und Wärmekosten über den Volllaststunden des BHKW in den vier Strompreisszenarien abgebildet. In beiden Kennzahlen werden auch die förderungsbedingten Erlöse berücksichtigt. Es wird deutlich, dass die Wärmekosten bei sinkendem Anteil des BHKW an der Wärmeversorgung steigen. Dieser Zusammenhang ist durch den wirtschaftlichen Vorteil des BHKW gegenüber dem Heizkessel, der bereits in Kapitel 5.1 ausführlicher erläutert wurde, und den abnehmenden Vergütungen proportional zu den Vollbenutzungsstunden begründet. Im Gegensatz zu den Wärmekosten sinken die spezifischen Stromerzeugungskosten. Je volatiler die Strompreise, desto tiefer und häufiger sinken die Strombezugpreise unter die Grenzkosten der Stromerzeugung des BHKW. Demnach können durch die Ein- und Abschaltvorgänge größere Gewinne in der Strombereitstellung erzielt werden. Die Strombereitstellungskosten des Energieversorgungssystems sinken erwartungsgemäß bei volatileren Strompreisen, wie in Abbildung 27 belegt wird.

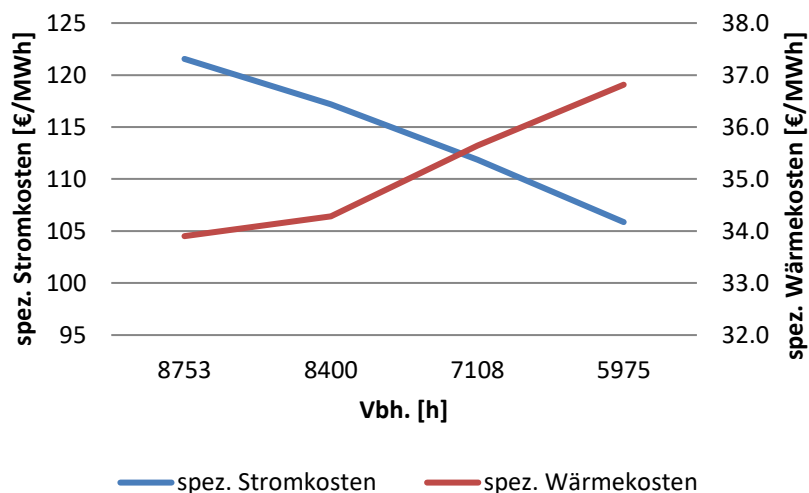


Abbildung 26: Spezifische Energiekosten über die Vollbenutzungsstunden

Während die Stromlast des Anwendungsfalls über die Szenarien konstant bleibt, fällt die Menge an produzierter thermischer Energie gemäß der durch den Kühlturm aus dem System abgetragenen Energiemenge ab. Deshalb sinkt die Summe der bedarfsgebundenen Kosten der Wärmeversorgung, obwohl die spezifischen Wärmekosten über die Volatilität ansteigen.

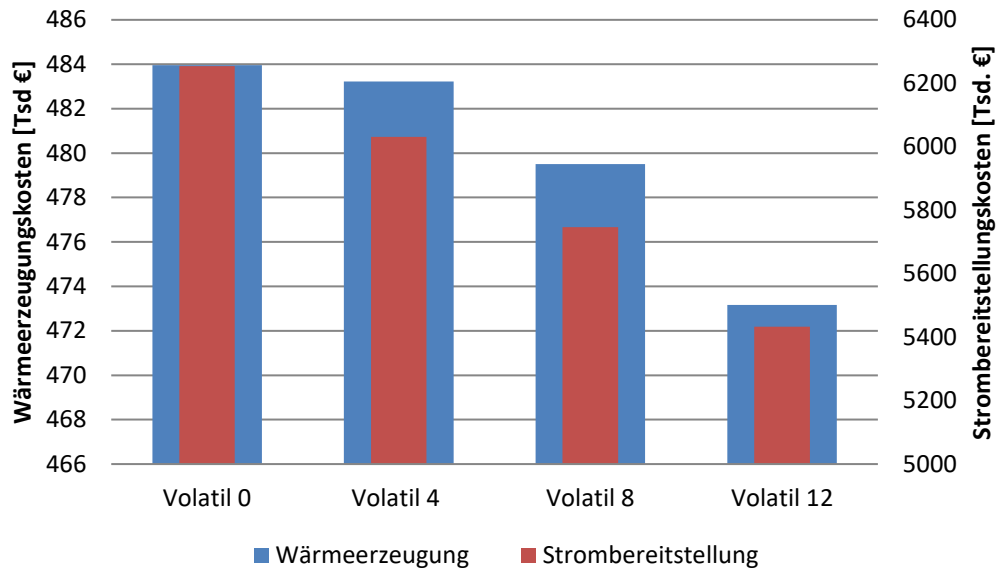


Abbildung 27: Spezifische Wärme- und Stromerzeugungskosten der Energieversorgung

Da die Investitionskosten der betrachteten Konfiguration sich auf die Beschaffung eines Kühlturmes reduzieren und jährliche Kosten von nur 2.188,- € verursachen, werden diese, genauso wie die betriebsgebundenen Kosten in derselben Höhe, nicht explizit graphisch

dargestellt. Die Beurteilung des Energieflexibilitätspotentials erfolgt nun anhand der Gesamtannuitäten aus Abbildung 28.

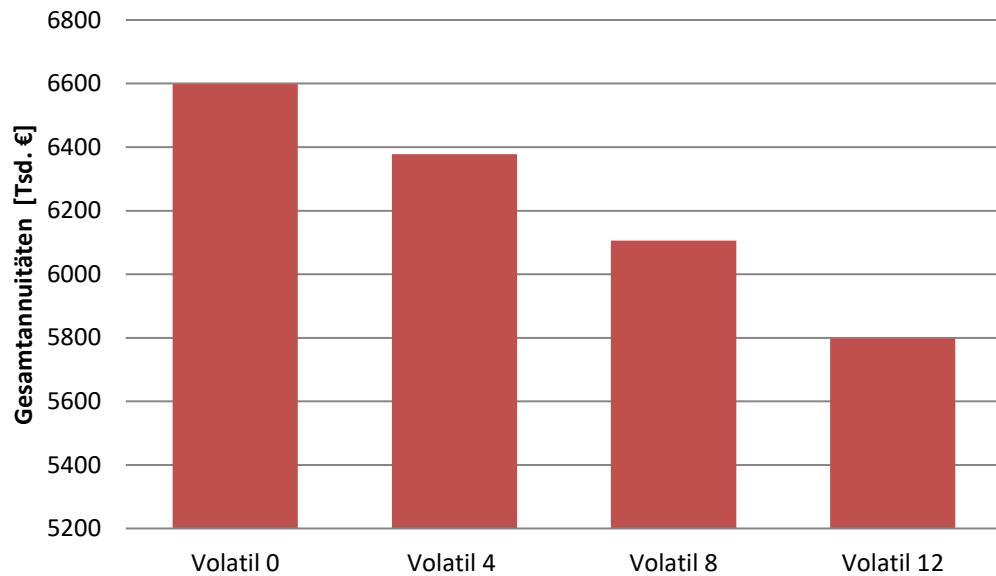


Abbildung 28: Gesamtannuitäten der stromgeführten Betriebsweise

Angesichts der Annuitäten kann der Konfiguration mit einem stromgeführt betriebenen BHKW ein hohes Energieflexibilitätspotential bescheinigt werden. Besonders in zukünftigen Strompreisszenarien mit einer hohen Volatilität kann der untersuchte Systemaufbau sein volles Potential ausnutzen. Mit einer jährlichen Zahlung von ca. 5,8 Mio. € liegen die laufenden Kosten bei stark volatilen Preisen ca. 800.000,- € unter den Gesamtannuitäten bei aktuellen Strombezugspreisverläufen.

5.3.2 Bivalente Konfiguration

Die zweite, hinsichtlich des Energieflexibilitätspotentials analysierte Konfiguration, repräsentiert eine bivalente Energieversorgung der Beispielproduktion. Die konfigurationsspezifischen Parameter und der Systemaufbau sind in Tabelle 14 zusammengefasst. Der Systemaufbau der bivalenten Konfiguration unterscheidet sich ausschließlich in einer neuen Systemkomponente, dem Elektrodenkessel. Im aktuellen Strompreisszenario treten analog zur stromgeführten Konfiguration keine Zeitpunkte auf, in denen das BHKW abgeschaltet und der Elektrodenkessel eingeschaltet wird, weshalb sich die Untersuchungsergebnisse nur in dem Aspekt der kapitalgebundenen Kosten des besagten Kessels unterscheiden. Aus diesem Grund ist ein detaillierter Wirtschaftlichkeitsvergleich der stromgeführten und bivalenten Konfiguration im aktuellen Strompreisszenario überflüssig.

Tabelle 14: Konfigurationsspezifische Parameter der bivalenten Konfiguration

Simulationsspezifische Parameter		Systemaufbau
Parameter:	Ausprägung:	
„Anzahl Heizkessel“	1	
„Anzahl AWT-Systeme“	0	
„BHKW“	True	
„Modulierend“	False	
„Rückkühlung“	True	
„Bivalenz“	True	
„Volatile Strompreise“	True	

Energieflexibilitätpotential

Um Aussagen bezüglich des Energieflexibilitätpotentials der behandelten Konfiguration treffen zu können, werden analog zum vorherigen Abschnitt die Strompreisszenarien nach der Volatilität der Strompreise variiert. Unterschreiten die Strompreise die Grenzkosten des BHKW gemäß Kapitel 4.4.1, so schaltet dieses ab und die Energieversorgung erfolgt vollständig über das Stromnetz und den Elektrodenkessel. Der Heizkessel übernimmt nur die Spitzenlasten. In Abbildung 29 wird ersichtlich, dass der Anteil des Elektrodenkessels mit steigender Volatilität, wie zu erwarten war, ansteigt. Ein auffallender positiver Effekt ist, dass der Elektrodenkessel besonders die kostenintensivere Leistung des Heizkessels substituiert. Außerdem reduziert sich die Kühlleistung durch die sinkende Anzahl an BHKW-Vollbenutzungsstunden im Sommer, wodurch auch die gesamte thermische Leistung abfällt.

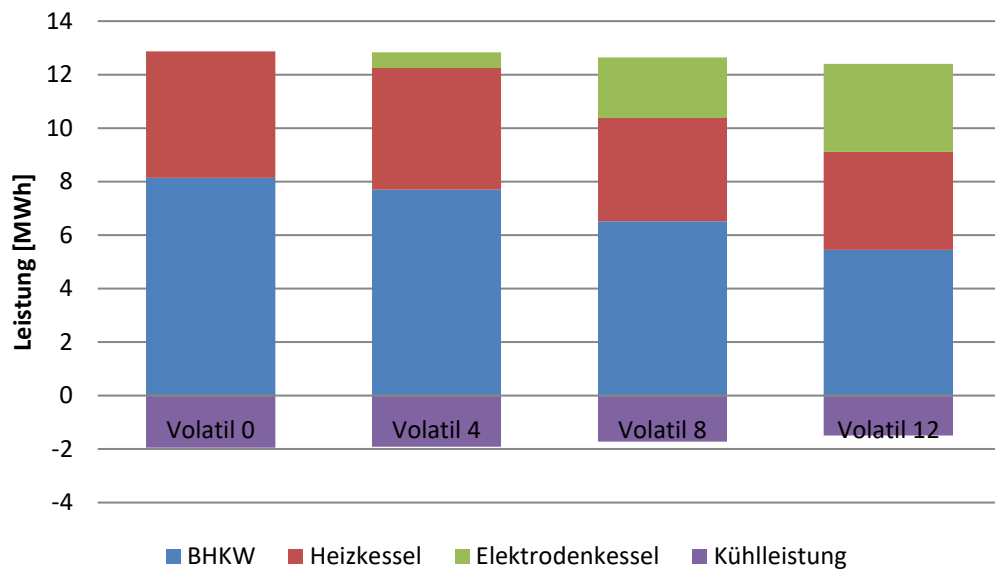


Abbildung 29: Anteile der thermischen Versorgung

Ferner sind in Abbildung 30 die spezifischen Energiekosten, die die förderungsbedingten Erlöse implizieren, über die resultierenden Vollbenutzungsstunden der vier Strompreisszenarien aufgetragen. Besonders die spezifischen Wärmeerzeugungskosten weisen einen markanten Verlauf auf. Bei steigender Volatilität verlaufen diese progressiv-negativ. Beim volatilsten Strompreisszenario egalisiert die Summe der Vergütungen die Kosten der Wärmeerzeugung, weshalb die spezifischen Wärmeerzeugungskosten einen Wert von ca. 0,- €/kWh erreichen. Die geringen Wärmebereitstellungskosten sind dadurch zu erklären, dass die stromintensive Wärmebereitstellung durch den Elektrodenkessel nur dann erfolgt, wenn eine positive Residuallast, respektive niedrige oder negative Strombezugspreise, auftritt. Dadurch kann mit Hilfe der Wärmeerzeugung zeitweise ein monetärer Gewinn erwirtschaftet werden. Des Weiteren wird bei Zeiten negativer Residuallasten ein erheblicher Anteil des teureren Bezugsstroms, durch strompreisunabhängigen BHKW-Strom ersetzt. Zudem zeigt die Graphik, dass der soeben diskutierte bivalente Energiebezug einen stärkeren Beitrag zu den spezifischen Energiekosten leistet, als die über die Volllaststunden abnehmende Summe der Erlöse.

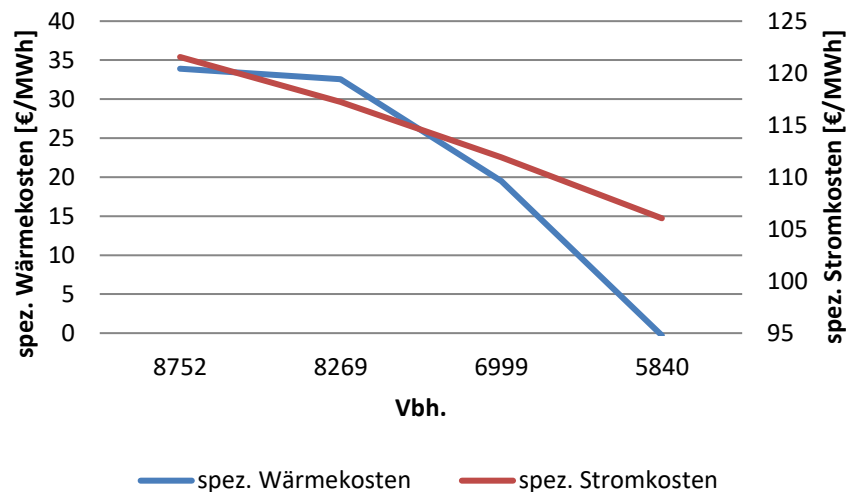


Abbildung 30: Spezifische Energiekosten über den Vollbenutzungsstunden

Abschließend lässt sich anhand von Abbildung 31 eine fundierte Einschätzung über das Energieflexibilitätspotential des untersuchten Energieversorgungssystems im zukünftigen Strommarkt treffen. Durch die bivalente Energiebereitstellung ergibt sich ein entscheidender Vorteil, indem während niedriger Strompreise nicht nur die Menge an bezogenen Strom steigt, sondern dieser auch zur Produktion von Wärme genutzt wird. Ungeachtet der zusätzlichen kapitalgebundenen Kosten zur Realisierung der Bivalenz in Höhe von 210.771,- €/a lässt sich bei volatilen Strompreisen ein monetärer Gewinn erzielen. Je volatiler die Strompreissignale ausfallen, desto größer sind die Kosteneinsparungen.

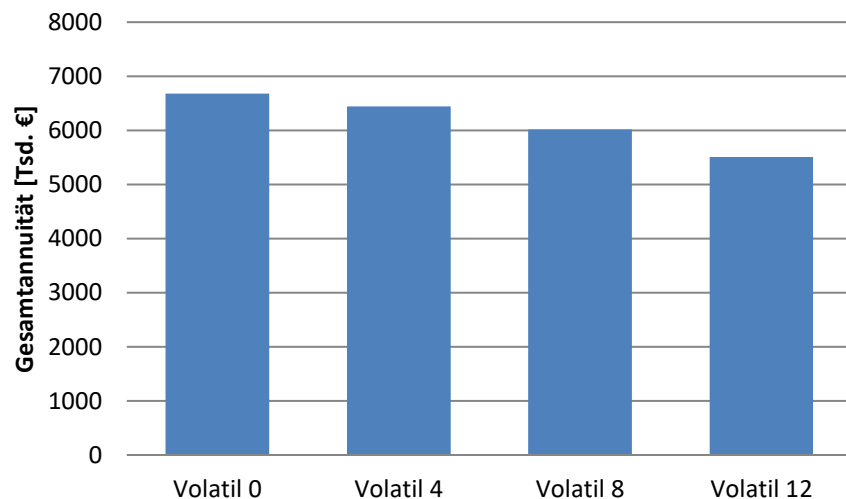


Abbildung 31: Gesamtannuitäten der bivalenten Konfiguration

5.3.3 Gegenüberstellung der energieflexiblen Konfigurationen

Mit dem Ziel, die flexibelste Konfiguration zu bestimmen, wird abschließend ein Vergleich der beiden Konfigurationen, in dem volatilsten Strompreisszenario gezogen. Bei diesem Vergleich

können die kostentreibenden Parameter der beiden Varianten am eindeutigsten identifiziert werden. Die Betriebskosten tragen nur einen sehr geringen Teil zu den Gesamtannuitäten bei, weshalb sie in der folgenden Abbildung nicht aufgeführt werden. Aus Abbildung 32 wird ersichtlich, dass die kapitalgebundenen Kosten der bivalenten Konfiguration einen relativ hohen Kostensatz darstellen, der jedoch durch die Einsparungen in der Wärmeerzeugung zumindest in einem sehr volatilen Strompreisszenario amortisiert werden kann. Durch die höheren Grenzkosten des BHKW in der bivalenten Konfiguration, schaltet dieses früher ab. Die Folge ist ein leichter Anstieg der bedarfsgebundenen Strombereitstellungskosten sowie eine Abnahme der Erlöse.

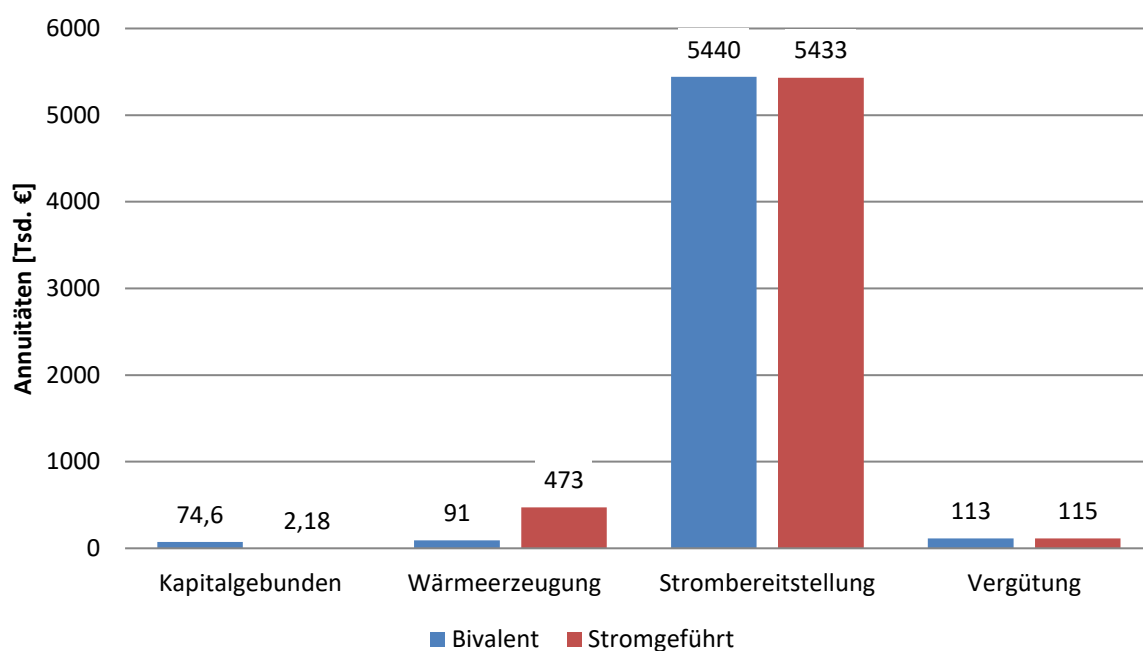


Abbildung 32: Kostengruppen des Preisszenarios „Volatil 12“

Nachdem das Verhalten der einzelnen Kostenbeiträge kurz diskutiert wurde, erfolgt anschließend die Analyse der jährlichen Gesamtkosten der Konfigurationen unter Betrachtung der vier Strompreisszenarien. Unter Berücksichtigung der jährlichen Annuität des aktuell im Anwendungsfall integrierten Energieversorgungssystems, lässt sich anhand der Ergebnisse aus Abbildung 33 eine Beurteilung über die wirtschaftlichste, und flexibelste Konfiguration treffen. Demnach ist die stromgeführte Fahrweise unter Berücksichtigung des aktuellen deutschen Strompreisverlaufes die kostengünstigste Energieversorgungsalternative. Zudem bietet diese auch bei leicht volatilen Strompreisen, die in naher Zukunft zu erwarten sind, ein ausreichendes Energieflexibilitätspotential. Die bivalente Konfiguration erweist sich unter aktuellen Strombezugspreisen auf Grund der hohen kapitalgebundenen Kosten als weniger ökonomisch. Erst bei stark volatilen Strombezugspreisen kann sich die Investition in einen Elektrodenkessel

im Vergleich zur stromgeführten Konfiguration amortisieren. Das Strompreisszenario „Volatil 12“, simuliert jedoch eine extreme Darstellung der Strombezugspreise mit stark negativen Preissignalen und gilt deshalb auch in Zukunft als eher unwahrscheinlich. Anhand der aufgeführten Gründe lässt sich die stromgeführte Betriebsweise als die wirtschaftlichste Energieversorgungsalternative mit einem suffizienten Energieflexibilitätspotential für den Strommarkt in naher Zukunft identifizieren. Aus den Annuitäten der stark volatilen Strompreisszenarien lässt sich jedoch ableiten, dass die bivalente Konfiguration das größte Flexibilitätspotential aufweist.

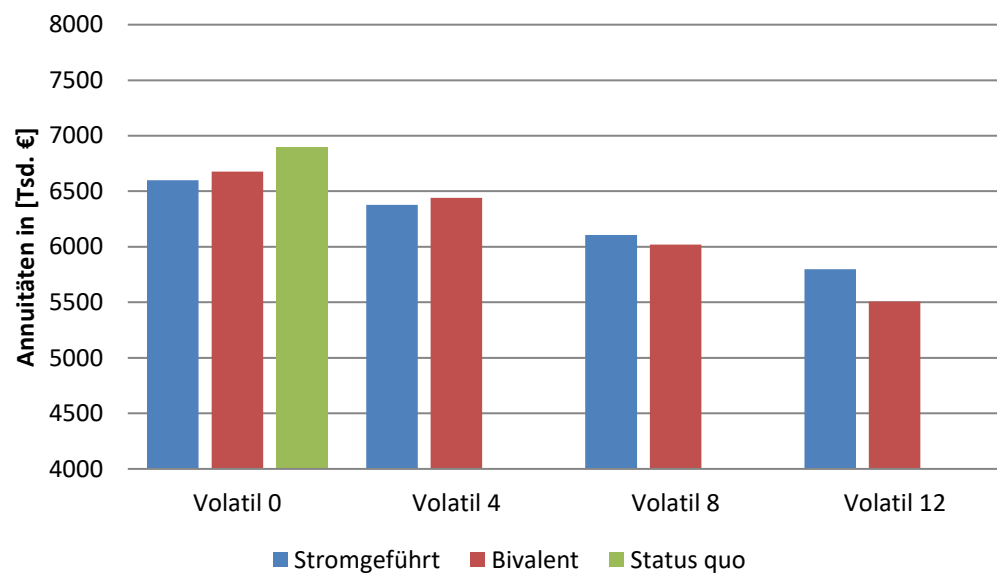


Abbildung 33: Vergleich der Annuitäten

5.3.4 Analyse des Fördersystems

Während die gesetzlichen Rahmenbedingungen bezüglich eines wärmegeführten Betriebs lediglich einen Einfluss auf die Erlöse eines BHKW haben, ergeben sich hinsichtlich eines

stromgeführten Betriebs signifikante Änderungen der Fahrweise eines Blockheizkraftwerks. Durch gestrichene Zuschlagssätze erhöhen sich die Grenzkosten des BHKW.

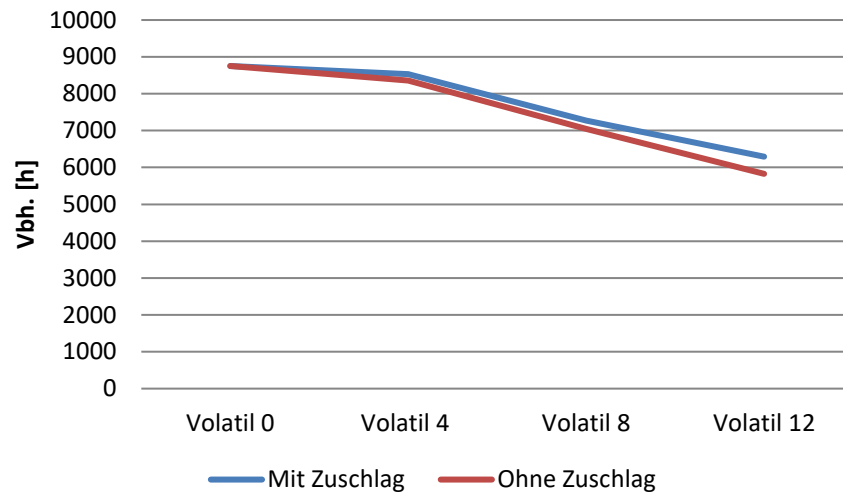


Abbildung 34: Einfluss der Zuschlagshöhe auf die Vollbenutzungsstunden

Vor allem bei steigender Volatilität haben die erhöhten Grenzkosten einen stärker werdenden Einfluss auf die jährlichen Vollbenutzungsstunden des BHKW, wie durch Abbildung 34 ersichtlich wird. Damit einhergehend erhöhen sich die Strombereitstellungskosten und es verringern sich die jährlichen förderungsbedingten Erlöse durch das BHKW, wodurch sich ein betriebswirtschaftlicher Nachteil ergibt. In keinem der in diesem Beitrag untersuchten Konfigurationen verschlechtert sich die Wirtschaftlichkeit der Anlage durch eine Erhöhung der Zuschlagssätze.

Aus volkswirtschaftlicher Sicht, unter Betrachtung des gesamten öffentlichen Stromnetzes, ergeben sich jedoch erhebliche Nachteile durch hohe Zuschlagssätze, da diese sehr geringe Grenzkosten bewirken. In dem Fall einer stromgeführten Konfiguration liegen die Grenzkosten (siehe Abschnitt 4.4.1) bei 0,003 €/kWh, wodurch sich das BHKW selbst bei positiven Residuallasten, in denen Strom sehr günstig und das Stromnetz überlastet ist, im stromgeführten Betrieb nicht abschaltet. Durch diese Tatsache wird verhindert, dass Blockheizkraftwerke zur Entlastung und Flexibilisierung des Stromnetzes beitragen. Eine Handlungsempfehlung wäre ein Zuschlagssatz, der sich nach der aktuellen Residuallast richtet. Bei einem überlasteten Stromnetz, sollten die Zuschlagssätze sinken, damit die BHKW ausgeschaltet werden und kein zusätzlicher Strom eingespeist wird. Im entgegengesetzten Fall steigen die Zuschläge bei negativer Residuallast, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu fördern und das Stromnetz zu entlasten. Der Einfluss von dezentralen Blockheizkraftwerken auf die nationale Residuallast ist jedoch eher klein, weshalb sich dieser Abschnitt eher auf die Flexibilisierung einer zentralen Energiebereitstellung mit implizierter Anbindung an ein Fernwärmenetz bezieht.

5.4 Gesamtanalyse

Eine letzte Betrachtung bezieht sich auf die stromgeführte Konfiguration. Diese erwies sich in den vergangenen Untersuchungen in Anbetracht der Wirtschaftlichkeit und Energieflexibilität in naher Zukunft, unter zusätzlicher Berücksichtigung der energieeffizienzsteigernden Maßnahmen aus Abschnitt 5.2, als die Vielversprechendste. Hierbei reduziert sich die Betrachtung auf die Integration von vier Wärmerückgewinnungssystemen, welche der thermischen Versorgung der vier Reinigungsanlagen zugeordnet werden können. Da eine erste Analyse der Energieeffizienz in Abschnitt 5.2 keinen Einsatz der Wärmerückgewinnungsanlage empfiehlt, wird eine Investition in diese Anzahl an WRG-Systeme als am wahrscheinlichsten erachtet. Auch ein Ausbau der Pufferspeichergröße in der wärmegeführten Konfiguration erwies sich als nicht rentabel, weshalb diese im Folgenden vernachlässigt wird. Damit den Annuitäten die gleichen Lasten zu Grunde liegen, wird auch beim stromgeführten Systemaufbau ohne Wärmerückgewinnungsanlage, der Bedarf der Reinigungsanlagen der Heizlast anstelle des elektrischen Lastverlaufes zugeordnet.

In Abbildung 35 sind die kapital- und bedarfsgebundenen Kosten sowie die Vergütung der drei alternativen Systemkonfigurationen bei Strompreisen „Volatil 0“ aufgetragen. Auf Grund der, durch den Kühlturm, abgetragenen Wärme bei der stromgeführten Konfiguration, steigen die Kosten der Wärmebereitstellung gegenüber dem wärmegeführten System an. Jedoch steigen in der wärmegeführten Konfiguration die Strombereitstellungskosten, da das BHKW hier nur ca. 5.554 Vbh./a gegenüber 8.752 Vbh./a aufweist. Zwischen der stromgeführten Konfiguration mit und ohne Wärmerückgewinnungsanlage, gibt es auf Grund derselben BHKW Laufleistung keine Unterschiede bezüglich der Erlöse und der bedarfsgebundenen Strombereitstellungskosten. Ersparnisse im Kostensatz der Wärmebereitstellungskosten in einer Höhe von 38.000,- €/a durch die Abgaswärmetauscher werden durch kapitalgebundene Kosten in einer Höhe von ca. 52.000,- €/a substituiert. Durch geringe Laufzeiten des BHKW im Status quo ergeben sich sehr hohe Strombereitstellungskosten.

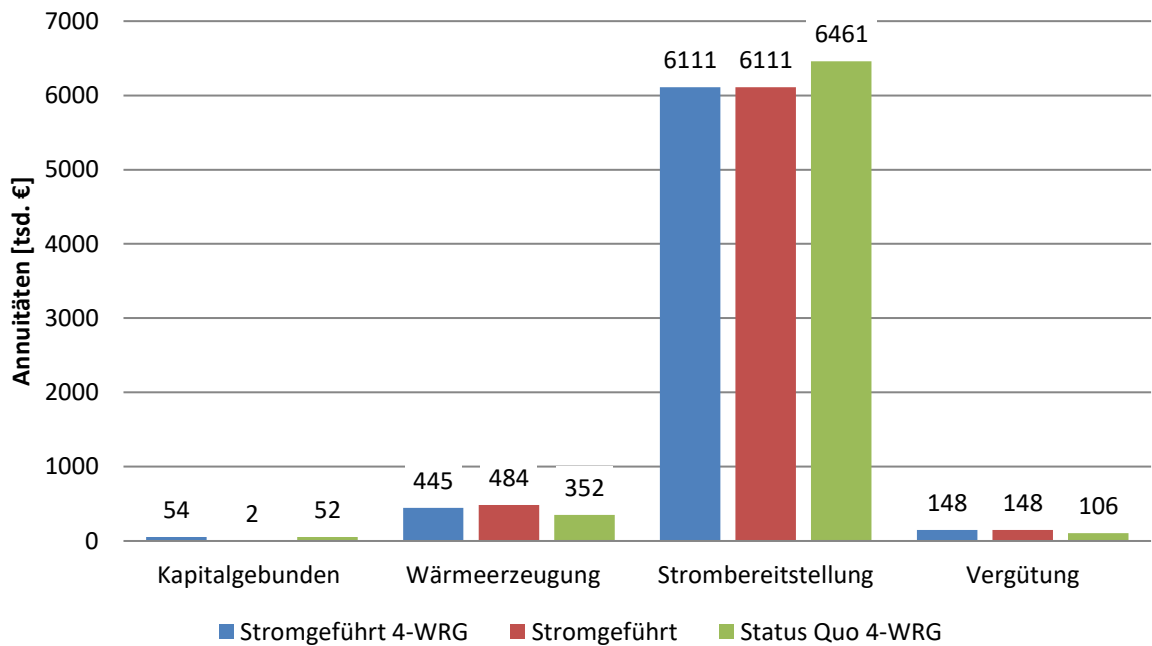


Abbildung 35: Kostengruppen der strom- und wärmegeführten Konfiguration unter Berücksichtigung von vier Wärmerückgewinnungssystemen

Zur abschließenden Bestimmung der vielversprechendsten Konfiguration werden nun die Gesamtannuitäten unter normalen und volatilen Strompreisen verglichen. Eine Analyse des Status quo unter volatilen Strompreisen ist jedoch überflüssig, da die Preissignale keine Komponenten beeinflussen und die Strombezugspreise im Mittel gleich sind. In Abbildung 36 ist zu erkennen, dass eine Differenz der jährlichen Gesamtannuitäten in einer Höhe von ca. 13.000,- €/a zu Gunsten des stromgeführten Systems resultiert. Dieser ökonomische Nachteil verringert sich zwar bei extrem volatilen Strompreisen, die Wärmerückgewinnungsanlage kann jedoch in keinem Fall seine Investition gegenüber vergleichbaren Konfigurationen amortisieren. Aus diesem Grund kann abschließend die Aussage getroffen werden, dass eine Konfiguration mit stromgeführtem BHKW und einem Hilfsaggregat zur Rückkühlung das, in naher Zukunft, flexibelste und wirtschaftlichste Energieversorgungssystem für den betrachteten Anwendungsfall darstellt.

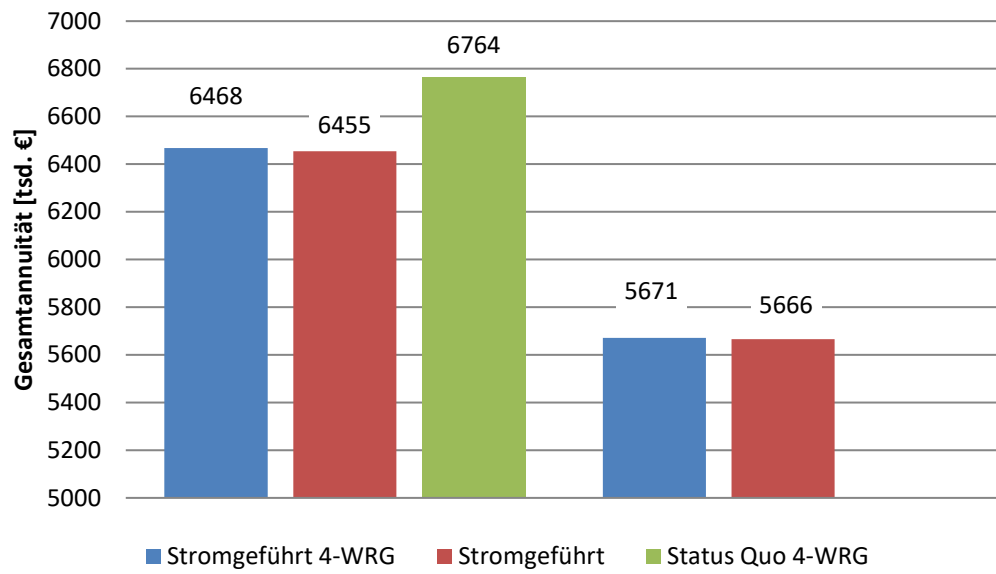


Abbildung 36: Gesamtannuitäten der strom- und wärmegeführten Konfiguration unter Berücksichtigung von vier Wärmerückgewinnungssystemen

6 Fazit und Ausblick

In Zukunft werden Zuwächse an fluktuierenden Wind- und Solarstromeinspeisungen in Verbindung mit der Verknappung der fossilen Energieträger und dem Anstieg des globalen Energiebedarfs steigende Anforderungen hinsichtlich der Energieeffizienz und –flexibilität an industrielle Energieversorgungssysteme mit sich bringen. Um dem entgegen zu wirken sind KWK-Anlagen prädestiniert, da diese eine ressourcenschonende sowie wirtschaftlich sinnvolle Flexibilitätsoption darstellen. Außerdem kann eine Wärmerückgewinnungsanlage einen Beitrag zur Energieeffizienz leisten. Um den aufgeführten Kontext zu behandeln, wurde in einem modular aufgebauten Simulationsmodell ein Anwendungsfall aus dem produzierenden Gewerbe modelliert. Durch eine Variation der simulationsspezifischen Parameter lassen sich diverse Energieversorgungssysteme darstellen und in einem energetisch und ökonomisch realitätsnahen Umfeld bewerten.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass sich durch die geschickte Einbindung von KWK-Anlagen in das Energieversorgungssystem sowohl eine Erhöhung der energetischen als auch der ökonomischen Effizienz umsetzen lässt. Durch den hohen Gesamtwirkungsgrad und die staatlichen Förderungen bietet ein BHKW eine Effizienzsteigerungsoption, die auch wirtschaftlich sinnvoll ist. Die Integration einer Wärmerückkopplungsanlage ermöglicht den Zugriff auf kostenlose thermische Nutzenergie und erhöht dadurch zwangsläufig den Gesamtwirkungsgrad eines jeden Energiesystems. In dem herangezogenen Anwendungsfall sind die Wärmeerzeugungskosten jedoch gering und Einbußen in den Erlösen so groß, dass sich die Investitionskosten nicht rentieren. In einer alternativen Betrachtung eines Energieversorgungssystems ohne KWK-Anlagen könnten sich die Wärmeerzeugungskosten erhöhen und somit die Investition in eine WRG-Anlage als sinnvoll erweisen. Des Weiteren brachte die Vergrößerung des BHKW-Pufferspeichers keinen wirtschaftlichen Vorteil. Im Gegensatz zu SCHULZ UND BRANDSTÄTT, lohnt sich diese Investition trotz der speicherrelevanten KWKG-Vergütungszahlungen nicht. Diese Zahlungen müssten erhöht werden, um einen entscheidenden Beitrag zur Flexibilisierung des Wärmemarktes zu leisten.

Aus den Modellbetrachtungen bezüglich der Energieflexibilität ging hervor, dass die stromgeführte und auch die bivalente Konfiguration ihre Vorzüge haben. Eine erste Erkenntnis ist, dass sich ein rein stromgeführter Betrieb des BHKW trotz zusätzlichen kühlturnbedingtem Strombedarfs auch bei aktuellen Strompreissignalen gegenüber dem Status Quo rentiert. Diese Beobachtung bestätigte sich auch bei einer bivalenten Konfiguration. Zusätzlich sinken die Annuitäten beider Konfigurationen bei steigender Volatilität. Dadurch bestätigte sich auch eine weitere These von SCHULZ UND BRANDSTÄTT, wonach ein stromgeführtes BHKW im zukünftigen

Strommarkt trotz geringerer Auslastungen einen ökonomischen Vorteil gegenüber einer wärmegeführten Konfiguration mit sich bringt. Der direkte Vergleich der bivalenten und stromgeführten Konfiguration ergab, dass das bivalente System erst in ferner Zukunft sein volles Flexibilisierungspotential entfalten kann. Im Gegensatz dazu hat die stromgeführte Konfiguration bereits bei weniger volatilen Strombezugspreisen ihre Vorteile. In diesem Vergleich ist es notwendig, die Strompreisszenarien kritisch zu betrachten, da die Preissignale bei Volatilitätsfaktoren von acht und zwölf zum Teil stark negative Werte einnehmen, die nicht den prognostizierten Marktentwicklungen entsprechen. Unter Berücksichtigung dieses Aspektes stellt die stromgeführte Betriebsweise die vielversprechendste Konfiguration mit dem geringsten Risiko dar. Die derzeitige Regulierung der Zuschlagszahlungen hat aus betriebswirtschaftlicher Sicht ihre Vorteile. Die Auslastung des BHKW und somit auch die Erlöse steigen durch diese Regulierung. In diesem Kontext ist es jedoch wichtig auch Zusammenhänge im dezentralen Wärmemarkt zu betrachten, da einige Flexibilitätsreserven des Wärmemarktes ungenutzt bleiben. Deshalb ist es schwierig anhand der vorliegenden Untersuchungen die Förderregelungen des KWKG ganzheitlich zu beurteilen.

Mit dem abschließenden Ziel, anhand der Bewertungskriterien die optimale Konfiguration für den Anwendungsfall zu finden, erzielte eine Berücksichtigung der energieeffizienzsteigernden Maßnahmen in der stromgeführten Systemkonfiguration keine positiven Ergebnisse. Die Investitionskosten amortisieren sich weder bei normalen, noch bei stark volatilen Strompreisen. Dementsprechend ist die stromgeführte Konfiguration vor dem Hintergrund der Simulationsergebnisse die vielversprechendste Ausprägung einer energieeffizienten, und – flexiblen Energieversorgung. Außerdem ist festzuhalten, dass sich die Anschaffung von Wärmerückgewinnungsanlagen nur in einem Energiesystem mit hohen spezifischen Wärmekosten rentiert. Zusätzlich sollte diese möglichst geringe negative Auswirkungen auf die Auslastung eines BHKW haben.

Um den Modellierungsaufwand in Bezug auf den Nutzen zu optimieren, wurden einige Annahmen auf Kosten der Ergebnisqualität getroffen. Eine Einschränkung im Detaillierungsgrad der Ergebnisse ergibt sich durch die Lastverläufe, die zu einem Großteil nur tägliche und weniger stündliche Schwankungen implizieren. Dadurch werden die dynamischen Wechselwirkungen der Teilkomponenten nur bedingt simuliert. Des Weiteren wurden zusätzliche Kosten für den Ausbau des dezentralen Wärmenetzes zur Integration neuer Systemkomponenten vernachlässigt. Im Kontext dieses Beitrags ist es trotzdem gelungen, fundierte Aussagen über das Verhalten unterschiedlicher Energieversorgungssysteme zu treffen. Anhand der Modellvalidierung kann eine Beurteilung über die Güte der Ergebnisse erfolgen. Auf Grund der geringen Abweichungen

in den Ergebnissen der Validierung ist davon auszugehen, dass das Modell das betrachtete Energieversorgungssystem im aktuellen Energiemarkt realitätsnah repräsentiert.

Ausblickend lässt sich sagen, dass in dem spezifischen Themengebiet noch Forschungspotential vorhanden ist. Obwohl es sich bei einer rein stromgeführten BHKW-Fahrweise um eine naheliegende Reaktion auf volatile Strommärkte handelt, findet diese in der Realität eher selten Anwendung. Um eine breitere Relevanz zu erreichen, wird empfohlen, in den folgenden Untersuchungen eine kombinierte Fahrweise analog zu SCHULZ UND BRANDSTÄTT (Schulz und Brandstät 2013, c 2013) durchzuführen. Über die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit hinaus wäre es außerdem interessant, das Rückkühlaggregat zu variieren. Anstelle eines Kühlturmes, der die thermische Energie aus dem System abführt, könnte eine Ad- beziehungsweise Absorptionskältemaschine oder eine ORC-Anlage die überschüssige Wärme nutzen, um zusätzliche Nutzenergie zu erzeugen.

7 Anhang

Inhaltsverzeichnis des Anhangs:

A. Technische Beschreibung „TSP Avus 800b“	99
B. Technische Beschreibung „Logano S825L LN“	101
C. Technische Beschreibung Elektrodenkessel.....	103
D. Technische Beschreibung Pufferspeicher.....	103

A. Technische Beschreibung „TSP Avus 800b“

Daten bei:	Volllast Teillast				
Treibgas Hu	kWh/Nm ³		9,5		
			100%	75%	50%
zugeführte Leistung	kW	[2]	2.098	1.616	1.135
Gasmenge	Nm ³ /h	*)	221	170	119
mechanische Leistung	kW	[1]	928	696	464
elektrische Leistung	kW el.	[4]	901	675	448
nutzbare thermische Leistung					
~ Gemisch 1.Stufe	kW		184	93	29
~ Öl	kW		125	105	84
~ Motorkühlwasser	kW		227	204	168
~ Abgas bei Abkühlung auf 120 °C	kW		395	326	245
Summe nutzbare, thermische Leistung	kW	[5]	931	728	526
Summe abgegebene Leistung	kW total		1.832	1.403	974
abzuführende thermische Leistung					
~ Gemisch 2.Stufe	kW	[9]	56	43	30
~ Öl	kW		~	~	~
~ Oberflächenwärme	ca. kW	[7]	82	~	~
spez. Kraftstoffverbrauch elektrisch	kWh/kWel.h	[2]	2,33	2,39	2,53
spez. Kraftstoffverbrauch	kWh/kWh	[2]	2,26	2,32	2,45
Schmierölverbrauch	ca. kg/h	[3]	0,19	~	~
elektrischer Wirkungsgrad	%		42,9%	41,8%	39,5%
therm. Wirkungsgrad	%		44,4%	45,0%	46,3%
Gesamtwirkungsgrad	%	[6]	87,3%	86,8%	85,8%
Warmwasserkreis:					
Vorlauftemperatur	°C		90,0	85,6	81,3
Rücklauftemperatur	°C		70,0	70,0	70,0
Warmwasserdurchflussmenge	m ³ /h		40,0	40,0	40,0

Abbildung 37: Technische Daten „TSP Avus 800b“ (am Modul)

Länge	mm	~ 6.000
Breite	mm	~ 1.800
Höhe	mm	~ 2.200
Gewicht trocken	kg	~ 11.600
Gewicht gefüllt	kg	~ 12.200

Abbildung 38: Hauptabmessungen und Gewichte „TSP Avus 800b“ (am Modul)

Hersteller		GE Jenbacher
Motortype		J 412 GS-B05
Arbeitsweise		4-Takt
Bauart		V 70°
Zylinderzahl		12
Bohrung	mm	145
Hub	mm	185
Hubraum	lit	36,66
Nenndrehzahl	1/min	1.500
mittl. Kolbengeschwindigkeit	m/s	9,25
Länge	mm	3.200
Breite	mm	1.495
Höhe	mm	2.085
Trockengewicht (Motor)	kg	5.200
Betriebsgewicht (Motor)	kg	5.695
Massenträgheitsmoment	kgm ²	9,42
Drehrichtung (auf Schwungrad gesehen)		links
Funktörgrad gem. VDE 0875		N
Starterleistung	kW	7
Starterspannung	V	24

Wärmeleistungen

zugeführte Leistung	kW	2.098
Gemisch	kW	240
Öl	kW	125
Motorkühlwasser	kW	227
Abgas bei Abkühlung auf 180 °C	kW	309
Abgas bei Abkühlung auf 100 °C	kW	424
Oberflächenwärme	kW	46

Abgasdaten

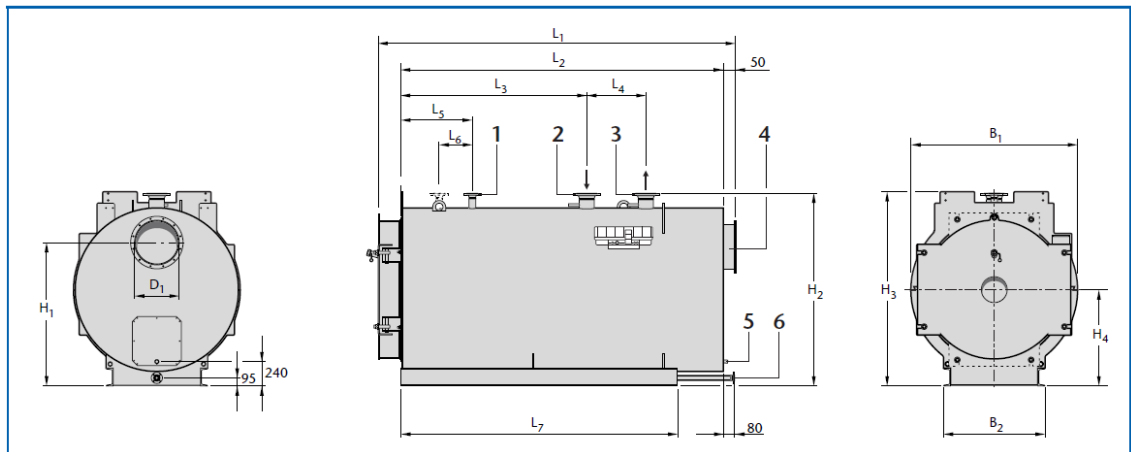
Abgastemp. bei Vollast	°C [8]	388
Abgastemp. bei p _{me} = 15,2 [bar]	°C	~ 409
Abgastemp. bei p _{me} = 10,1 [bar]	°C	~ 434
Abgasmassenstrom feucht	kg/h	4.795
Abgasmassenstrom trocken	kg/h	4.468
Abgasvolumen feucht	Nm ³ /h	3.801
Abgasvolumen trocken	Nm ³ /h	3.395
max. Abgasgedruck ab Motorausstritt	mbar	60

Verbrennungsluftdaten

Verbrennungsluftmassenstrom	kg/h	4.649
Verbrennungsluftvolumenstrom	Nm ³ /h	3.598
max. zul. Druckverlust am Luftfilter	mbar	10

Abbildung 39: Technische Daten des Motors

B. Technische Beschreibung „Logano S825L LN“



14/1 Abmessungen der Heizkessel Logano S825L LN, Kesselgrößen 750 bis 3500 (Maße in mm)

Bildlegende

- 1 Vorlauf-Sicherheitsleitung / Sicherheitsventil
- 2 Rücklauf
- 3 Vorlauf
- 4 Abgasaustritt
- 5 Entwässerung Abgaskondensat
- 6 Entleerung Kessel

Kesselgröße			750	1000	1250	1500	2000	2500	3000	3500
Länge	L ₁	mm	2680	2950	3220	3675	3725	4075	4570	4700
	L ₂	mm	2425	2695	2960	3420	3465	3820	4250	4380
Höhe	H ₂	mm	1615	1715	1815	1865	1965	2015	2115	2215
	H ₃	mm	1615	1715	1815	1865	1965	2015	2115	2215
Breite	B ₁	mm	1324	1424	1524	1574	1674	1724	1824	1924
Feuerraum	Länge	mm	2201	2471	2698	3149	3197	3553	3987	4106
	∅	mm	600	660	730	776	846	901	932	1012
Brennertür	Tiefe	mm	190	190	190	190	190	190	257	257
	H ₄	mm	800	850	900	925	975	1000	1050	1100
Grundrahmen	L ₇	mm	2100	2350	2560	3060	3060	3410	3920	3920
	B ₂	mm	910	910	930	1130	1130	1150	1260	1510
	U-Profil	mm	120	120	160	160	160	200	220	220
Abgasaustritt	D ₁	mm	→ 27/1							
	H ₁	mm	1180	1240	1340	1350	1415	1490	1500	1600
Flansch Vorlauf und Rücklauf	DN		→ 26/1							
Flansch Vorlauf-Sicherheitsleitung	DN		→ 26/3							
Abstand	L ₃	mm	1390	1560	1710	2180	2150	2490	2870	2770
	L ₄	mm	450	500	550	550	600	600	600	800
	L ₅	mm	600	600	600	650	650	800	650	750
	L ₆	mm	-	-	-	-	-	-	-	-
Entleerung Kessel	DN	25	32	32	32	32	32	32	32	32
Entwässerung Abgaskondensat	R	¾	¾	¾	¾	¾	¾	¾	¾	¾

Abbildung 40: Abmessungen „Logano S825L LN“ (Buderus 2005, S. 14)

Kesselgröße		750	1000	1250	1500	2000	2500	3000	3500
Max. Nennwärmeleistung	kW	750	1000	1250	1500	2000	2500	3000	3500
Versandgewicht	6 bar	t	2,2	2,8	3,3	4,2	4,7	5,3	6,9
	10 bar	t	2,3	2,9	3,4	4,5	5,1	6,1	8,6
Betriebsgewicht ¹⁾	6 bar	t	3,6	4,6	5,4	6,7	7,6	8,6	11,0
	10 bar	t	3,7	4,7	5,5	7,0	8,0	9,3	11,7
Wasserinhalt Kessel	m ³	1,4	1,8	2,1	2,5	2,9	3,2	4,1	4,7
Gasinhalt	m ³	1,40	1,40	1,98	2,58	3,05	3,67	4,61	5,44
Abgastemperatur	°C	→ 38/1							
Förderdruck (Zugbedarf)	Pa	0							
Heizgasseitiger Widerstand	mbar	→ 30/2							
Zul. Vorlauftemperatur ²⁾	°C	110							
Zul. Betriebsdruck	bar	6 oder 10 ³⁾							
CE-Kennzeichen		CE 0085 BO 0396							

17/1 Technische Daten der Heizkessel Logano S825L LN, Kesselgrößen 750 bis 3500 (Maße → 14/1)

1) Das Betriebsgewicht setzt sich zusammen aus dem Kesselgewicht sowie den Gewichten für Brenner, Regelgerät, Armaturen und Kesselrohrleitungen.

2) Absicherungsgrenze des Sicherheitstemperaturbegrenzers (STB); maximal mögliche Betriebs-Vorlauftemperatur (→ 61/3)

3) Höhere Drücke auf Anfrage

Abbildung 41: Technische Daten „Logano S825L LN“ (Buderus 2005, S. 17)

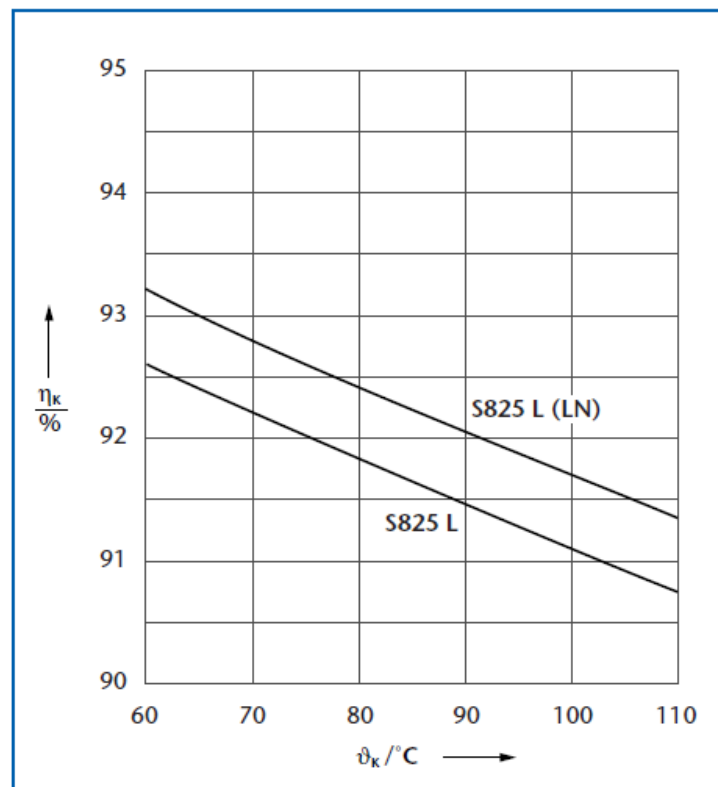


Abbildung 42: Kesselwirkungsgrad „Logano S825L LN“ in Abhängigkeit von der mittleren Kesselwassertemperatur (Mittelwerte der Baureihen) (Buderus 2005, S. 34)

C. Technische Beschreibung des Elektrodenkessels

Tabelle 15: Technische Daten des Elektrodenkessels der Firma „Velde“

Technische Daten		
Wirkungsgrad	[-]	> 99%
Laständerungsgeschwindigkeit (0-100%)	[s]	30
Anfahrzeit	[min]	< 5
geometrische Maße (D*H max.)	[m]	3,5*6,5

D. Technische Beschreibung der Pufferspeicher

Preise							
Typ	Ø [mm]	Inhalt [l]	Höhe [mm]	Druck [bar]	Art.-Nr.	Preis [€]	
						ohne Wärme- dämmung	mit Wärmedämmung 200mm Mineralwolle mit verzinktem Blechmantel zur Außenaufstellung
LZO 10.000	2000	10.000	3850	3	00471110	10.056,-	17.299,-
LZO 10.000	2000	10.000	3850	6	00471111	11.907,-	19.150,-
LZO 15.000	2000	15.000	5500	3	00471620	13.488,-	22.932,-
LZO 15.000	2000	15.000	5500	6	00471621	14.070,-	23.514,-
LZO 20.000	2500	20.000	4900	3	00472020	15.763,-	25.861,-
LZO 20.000	2500	20.000	4900	6	00472021	22.744,-	32.842,-
LZO 30.000	2500	30.000	6900	3	00473020	22.163,-	35.770,-
LZO 30.000	2500	30.000	6900	6	00473021	27.093,-	40.700,-
LZO 40.000	2500	40.000	8950	3	00474010	24.837,-	41.543,-
LZO 40.000	2500	40.000	8950	6	00474011	30.451,-	47.157,-
LZO 50.000	2500	50.000	10800	3	00475010	27.279,-	47.087,-
LZO 50.000	2500	50.000	10800	6	00475011	33.749,-	53.557,-
LZO 50.000	2900	50.000	8400	3	00475020	29.907,-	47.709,-
LZO 50.000	2900	50.000	8400	6	00475021	36.512,-	54.314,-
LZO 60.000	2900	60.000	9900	3	00476020	32.428,-	51.913,-
LZO 60.000	2900	60.000	9900	6	00476021	37.674,-	57.159,-
LZO 80.000	2900	80.000	13100	3	00478010	40.502,-	64.963,-
LZO 80.000	2900	80.000	13100	6	00478011	43.409,-	67.870,-
LZO 100.000	2900	100.000	16100	3	00479010	47.335,-	76.821,-
LZO 100.000	2900	100.000	16100	6	00479011	50.242,-	79.728,-

Weitere Größen und liegende Speicher auf Anfrage!

Abbildung 43: Technische Daten der Pufferspeicher „LZO“ (BTD GmbH 2018, S. 8)

Preise							
Typ	Ø [mm]	Inhalt [l]	Höhe [mm]	Art.-Nr.	Preis [€]		
					ohne Wärmedämmung	mit Wärmedämmung 100 mm	
ThermoOne P 2000	1250	2000	2130	08102003	1.430,-	2.100,-	
ThermoOne P 3000	1250	3000	2880	08103003	1.770,-	2.700,-	
ThermoOne P 3000	1600	3000	2014	08103013	2.020,-	2.900,-	
ThermoOne P 4000	1600	4000	2514	08104003	2.200,-	3.160,-	
ThermoOne P 5000	1600	5000	3014	08105003	2.500,-	3.620,-	
ThermoOne P 6000	1600	6000	3514	08106003	2.680,-	4.200,-	
ThermoOne P 7000	1600	7000	4014	08107003	2.830,-	4.600,-	
ThermoOne P 8000	1600	8000	4514	08108003	3.160,-	5.100,-	
ThermoOne P 9000	1600	9000	5014	08109003	3.360,-	5.500,-	
ThermoOne P 10000	1600	10.000	5514	08110003	3.630,-	5.850,-	

Daten und Maße		
	Druck	max. Temperatur
ThermoOne P	3 bar	95 °C

Abbildung 44: Technische Daten der Pufferspeicher „ThermoOne P“ (BTD GmbH 2018, S. 5)

8 Literaturverzeichnis

- AGFW (2009): AGFW-Arbeitsblatt FW 308. Zertifizierung von KWK-Anlagen -Ermittlung des KWK-Stromes-. Hg. v. AGFW| Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. Frankfurt a. M.
- Anwendungsfall (2014): Grundriss.
- Anwendungsfall (2015): Audit-Bericht.
- Anwendungsfall (2018): Grundlagenermittlung. Hg. v. PTW.
- Arbeitsgemeinschaft der Hessischen Industrie- und Handelskammer (2014): Power-to-Heat. Faktenblatt. Arbeitsgemeinschaft der Hessischen Industrie- und Handelskammer.
- ASUE (2014): BHKW-Kenndaten 2014/2015. Hg. v. ASUE. Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. Berlin.
- ASUE (2015): BHKW-Fibel. Wissen in kompakter Form. Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. Berlin.
- BAFA (2017): Merkblatt Wärme- und Kältespeicher. zur Darlegung der Zulassungsvoraussetzungen nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz für Zulassungsanträge, die ab dem 01.01.2017 im BAFA eingegangen sind. Hg. v. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. Eschborn.
- Baten (2017): Kraft-Wärme-Kopplung 2008 bis 2016 - Einfluss der Bilanzgrenze. 67. Aufl. Unter Mitarbeit von Buttermann und Nieder (Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 12).
- BHKW-Infozentrum (2016): Welcher Unterschied existiert zwischen Betriebsstunde und Vollbenutzungsstunde? Hg. v. bhkw-infozentrum.de. Online verfügbar unter <https://www.bhkw-infozentrum.de/faq-bhkw-kwk/welcher-unterschied-existiert-zwischen-betriebsstunde-vollbenutzungsstunde>, zuletzt geprüft am 18.10.2018.
- BMWi (2015): Die Energie der Zukunft. Vierter Monitoring Bericht zur Energiewende. 4. Aufl. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- Brautsch, Markus; Lechner, Raphael (2013): Effizienzsteigerung durch Modellkonfiguration in BHKW-Anlagen. [Endbericht]. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Forschungsinitiative Zukunft Bau, F 2840).
- BTD GmbH (2018): Produktübersicht & Brutto-Preisliste 2018. Behälter- und Speichertechnik Dettenhausen GmbH. Dettenhausen, zuletzt geprüft am 04.10.2018.
- Buderus (Hg.) (2005): Planungsunterlage (06/2005).

Bundesnetzagentur (2015): Leitfaden zur Eigenversorgung. Konsultationsfassung. Bonn. Bundesnetzagentur. Online verfügbar unter www.bundesnetzagentur.de.

Bundesnetzagentur (2017): Netzentgelt. Bundesnetzagentur. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Bilder/DE/Sachgebiete/Energie/Verbraucher/Energielexikon/Netzentgeltkarte_2017_Industrie.jpg?__blob=poster&v=2, zuletzt aktualisiert am 13.11.2018.

DeStatis (2018): Preise. Daten zur Preisentwicklung. Hg. v. DeStatis. Statistisches Bundesamt. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Energiepreise/EnergiepreisentwicklungPDF_5619001.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 16.10.2018.

Deutsche Energie-Agentur (2013): dena-Ergebnispapier. Markttrollen und Prozesse beim Einsatz von flexiblen Stromlasten im Energiesystem. Deutsche Energie-Agentur. Online verfügbar unter https://cache.pressmailing.net/content/5f55ac07-0b64-40d9-a6eb-b775ef6be782/13-12-23_Ergebnispapier_Markttrollen_und_Prozesse.pdf, zuletzt geprüft am 05.11.2018.

Dipl.-Ing. M. Gebhardt (2002): Preisatlas. Ableitung von Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energieerzeugung. Institut für Energie - und Umwelttechnik e.V. Duisburg-Rheinhausen.

Dipl.-Ing. Nierobis, Lars (2018): Mineralwolle. Online verfügbar unter <http://www.waermedaemmstoffe.com/htm/mineralwolle.htm>, zuletzt aktualisiert am 04.10.2018.

DWD (2018): Klimadaten Deutschland. Augsburg. Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/klimadatendeutschland.html?nn=16102>, zuletzt aktualisiert am 20.09.2018, zuletzt geprüft am 20.09.2018.

E.ON Energy Research Center (2017): AixLib. RWTH Aachen. Online verfügbar unter <http://www.ebc.eonerc.rwth-aachen.de/cms/E-ON-ERC-EBC/Forschung/OPEN-SOURCE/~modh/AixLib58/>, zuletzt aktualisiert am 13.11.2018.

Eller, Dominik (2015): Integration erneuerbarer Energien mit Power-to-Heat in Deutschland. Potentiale zur Nutzung von Stromüberschüssen in Fernwärmenetzen. Wiesbaden: Springer Vieweg (BestMasters).

VDI-Richtlinie 4661, 2014: Energiekenngröße.

-
- Erdmann, Georg; Dipl.-Wirtsch.-Ing-Dittmar, Lars (2010): Technologische und energiepolitische Bewertung der Perspektiven von Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland. TU Berlin, Berlin. Fachgebiet Energiesysteme.
- Form, Georg; Brunk, Marten F.; van Treeck, Christoph (2016): Regelstrategien zum wirtschaftlichen Einsatz von Wärmepumpen im bivalenten Betrieb. Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Forschungsinitiative Zukunft Bau, F 2968).
- Fraunhofer Institut (2014): Potenzial- und Kosten-Nutzen-Analyse zu den Einsatzmöglichkeiten von Kraft-Wärme-Kopplung sowie Evaluierung des KWKG im Jahr 2014. Unter Mitarbeit von Bernd Eikmeier, Eberhart Jochem und Markus Gailfuss. Fraunhofer Institut. Berlin.
- Fritzson, Peter (2012): Introduction to modeling and simulation of technical and physical systems with Modelica. Hoboken, N.J, Piscataway, New Jersey: Wiley IEEE Press; IEEE Xplore.
- Gailfuß, Markus (2018): KWKG 2016 – Neuregelungen im KWK-Gesetz. Online verfügbar unter <http://www.kwkg2016.de/aktuelles-kwk-gesetz-2016/neuregelung-des-kwk-gesetzes.html>, zuletzt aktualisiert am 01.08.2018.
- Häfner, Lukas (2018): Demand Side Management. In: *HMD* 55 (3), S. 627–645. DOI: 10.1365/s40702-017-0363-9.
- Härtetechnik Hagen GmbH (2018): Nitrieren. Online verfügbar unter <https://www.haertetechnik-hagen.de/nitrieren>, zuletzt aktualisiert am 24.09.2018.
- Hesselbach, Jens (2012): Energie- und klimaeffiziente Produktion. Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele ; 34 Tabellen. Wiesbaden: Springer Vieweg (Praxis).
- Kraft, Armin (2017): KWK-Wärmenetze. Auslaufmodell oder Zukunftsbaustein der Energiewende? Duisburger KWK-Symposium. EEB Enerko Energiewirtschaftliche Beratung GmbH. Duisburg, 08.06.2017.
- Lehmacher, Peter (2018): Blockheizkraftwerk. Funktionsschema einer motorgetriebenen BHKW-Anlage. Hg. v. wikipedia.org. Online verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Blockheizkraftwerk>, zuletzt aktualisiert am 09.11.2018, zuletzt geprüft am 16.11.2018.
- Matics, Jens (2007): Betriebliche Modellierung, Auslegung und Management von dezentralen Energiesystemen. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, Duisburg-Essen. Fakultät für Ingenieurwissenschaften.
- Merkel, Erik; Kunze, Robert; McKenna, Russell; Fichtner, Wolf (2017): Modellgestützte Bewertung des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes 2016 anhand ausgewählter Anwendungsfälle in Wohngebäuden. In: *Z Energiewirtschaft* 41 (1), S. 1–22. DOI: 10.1007/s12398-017-0193-z.

-
- Nowak, Wolfgang (2015): BHKW-Fibel. Wissen in kompakter Form. Hg. v. ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.
- Paschotta, Rüdiger (2010): Kühlturm. Hg. v. www.energie-lexikon.info. Online verfügbar unter <https://www.energie-lexikon.info/kuehlturm.html>, zuletzt aktualisiert am 3.11.18, zuletzt geprüft am 06.11.2018.
- Pehnt, Martin (Hg.) (2010): Energieeffizienz. Ein Lehr- und Handbuch. 1., korrigierter Nachdr. Berlin: Springer.
- Petzold (1996): Abwärmenutzung. Energiemanagement und Energieberatung. Lehrmaterial. TU Berlin, Berlin.
- Posch, Wolfgang (2011): Ganzheitliches Energiemanagement für Industriebetriebe. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden (Techno-ökonomische Forschung und Praxis). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8349-6645-2>.
- Projekt Synergie (2018): Strompreise.
- Schaefer, Helmut (Hg.) (1994): VDI-Lexikon Energietechnik. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg (Energietechnik). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-95748-2>.
- Schaumann, Gunter; Schmitz, Karl W. (2010): Kraft-Wärme-Kopplung. 4., vollständig bearbeitete und erweiterte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10351883>.
- Scheffler, Jörg (2016): Verteilnetze auf dem Weg zum Flächenkraftwerk. Rechtlicher Rahmen, Erzeuger, Netze. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=4722685>.
- Schräder (2018): (Richtpreis-)Angebot.
- Schulz, Wolfgang; Brandstätter, Christine (2013, c 2013): Flexibilitätsreserven aus dem Wärmemarkt. Bochum: Ponte Press.
- simulationresearch.lbl (2018): Buildings. Library with models for building energy and control systems. Online verfügbar unter <http://simulationresearch.lbl.gov/modelica/releases/latest/help/Buildings.html>, zuletzt aktualisiert am 26.09.2018, zuletzt geprüft am 26.09.2018.
- Sterner, Michael; Stadler, Ingo (Hg.) (2017): Energiespeicher. Bedarf, Technologien, Integration. 2. korrigierte und ergänzte Auflage. Berlin: Springer Vieweg.

VDI-Richtlinie 2077, 11.2012: Verbrauchskostenerfassung für die Technische Gebäudeausrüstung.

Wetter, Michael (2009): Modelica Library for Building Heating, Ventilation and Air-Conditioning Systems. In: Proceedings of the 7 International Modelica Conference Como, Italy. The 7 International Modelica Conference, Como, Italy, Sep. 20-22, 2009: Linköping University Electronic Press (Linköping Electronic Conference Proceedings), S. 393–402.

VDI-Richtlinie 2067, 09.2012: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen.

Zahoransky, Richard (2009): Energietechnik. Systeme zur Energieumwandlung. Kompaktwissen für Studium und Beruf. 4., aktualisierte und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden (Vieweg Studium).