

# Energietechnische und ökonomische Bewertung von BHKW

#### **Abschlussbericht**

## Technische Universität München Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik

Ordinarius: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner

Bearbeiter: Yasin Incedag M.Sc.

Dr.-Ing. Peter Tzscheutschler

# Inhalt

Inhalt	ii
1. Einleitung	1
2. Objekteigenschaften und –daten	2
Klinikum Nord	2
Klinikum Ost	3
Vorliegende Daten	5
Lastgänge und Energieverbrauch	6
3. Auswertung des BHKW-Betriebs	11
Betriebsverhalten und Nutzungsgrade	11
Speicher	17
Verluste	20
4. Ökonomische Betrachtung	21
Erweiterungsoptionen	21
Energieversorgungsmodell (ficus)	22
5. Ergebnisse und Ausblick	30
Anhang	32
Quellen	

## 1. Einleitung

Zum Projekt "Energietechnische und ökonomische Bewertung von BHKW", initiiert durch den Solarenergie-Förderverein Bayern e.V. und unterstützt durch die Bayernwerk Natur GmbH sollen Praxisdaten von ausgewählten Objekten mit Gas-Ottomotor-BHKW ausgewertet werden. Nach erster Evaluierung der Datenlage wurden zwei Objekte ausgewählt. Bei beiden Objekten handelt es sich um
Kliniken mit Therapie-, Pflege- und akutmedizinischen Angeboten, wobei ein Gebäude nördlich von
München (im Folgenden mit Klinikum Nord bezeichnet) und ein Gebäude in Niederbayern, nahe der
österreichischen Grenze (im Folgenden mit Klinikum Ost bezeichnet) gelegen ist.

Ziel des Projektes war es, Energiedaten der Gebäude, insbesondere für das Jahr 2016 aufzubereiten, ein Energieprofil zu erstellen, die bestehenden technischen Anlagen energietechnisch zu beurteilen, sowie überschlägige ökonomische Betrachtungen anzustellen, auch in Bezug auf solarbasierte Alternativen in der Strom- und Wärmeversorgung der Gebäude. Diese Aufgaben wurden unter Zuhilfenahme von am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik entwickelten Modellen durch die Technische Universität München bearbeitet.

Die Datenbereitstellung erfolgte größtenteils durch die Bayernwerk Natur GmbH. Aufgrund einer nicht hinreichend hohen Auflösung der Daten beschränken sich energietechnische Betrachtungen auf monatliche Zählerdaten. Die Erstellung der Gebäudelastdaten war jedoch in stündlicher Auflösung abschätzbar, sodass basierend darauf ökonomische und ökologische Betrachtungen im Modell angestellt werden konnten.

## 2. Objekteigenschaften und -daten

Die betrachteten Objekte werden folgend bezüglich der energietechnischen Ausrüstung, sowie des Energieverbrauchsverhaltens anhand der bereitgestellten Daten beschrieben.

#### Klinikum Nord

Die technischen Geräte zur Energieversorgung des Objekts "Klinikum Nord" gestalten sich wie in *Tabelle 1* dargestellt.

Tabelle 1: Technische Ausstattung des Energieversorgungssystems im Klinikum Nord

внкw:	2G G-Box 50		
Spezifikationen:	25,0 - 49,5 kW <sub>el</sub> / 50 - 100 kW <sub>th</sub>		
	$0,265-0,34~(\eta_{el})~/~0,716-0,691~(\eta_{th})$		
Thermischer Speicher:	Pufferspeicher, Warmwasser (Fa. Unbekannt)		
Spezifikationen:	2860 I		
Heizkessel:	Viessmann Vitoplex 200 (2x)		
Spezifikationen:	440 kW (η <sub>th</sub> 0,89 – 0,95)		

Bei dem Objekt handelt es sich um ein Klinikum mit Akutmedizinischen, sowie Reha-, Pflege- und Therapieeinrichtungen. Die Bettenzahl, die Belegung zum jeweiligen Zeitpunkt, sowie die Nutzfläche des Objektes sind unbekannt.

Ein Ausschnitt des R&I-Fließbildes des Heizsystems im Klinikum Nord ist in *Abbildung 1* zu sehen. Es wird ersichtlich, dass die Heizgeräte (Kessel 1, Kessel 2, BHKW und thermischer Speicher) hydraulisch nicht voneinander entkoppelt sind. Kessel und BHKW sind mit eigenen Pumpen ausgestattet. Der Speicher wird beladen, sobald die Heizkreisventile geschlossen sind, bzw. keine Last anliegt und die Heizgeräte betrieben werden. Die Speichertemperaturen werden an vier verschiedenen Punkten gemessen.

Bei einer Besichtigung der Anlage konnte nicht geklärt werden, welcher Temperaturwert als Eingangssignal für die Regel des BHKW eingesetzt wird. Die Steuerung der Anlage erfolgt durch die Firma 2G selbst. Änderungen an Regelgrößen durch beispielsweise den Betreiber sind nicht möglich. Nur das Starten der Anlage nach Störung ist durch Personal vor Ort und mit Hilfe der Anweisungen durch 2G durchzuführen. Ferner wird die Modulationsfähigkeit des BHKW zu keinem Zeitpunkt genutzt, da Wartungsverträge auf Betriebsstundenbasis abgeschlossen wurden und bei Modulation die bereitgestellte "Kilowattstunde teurer wird".

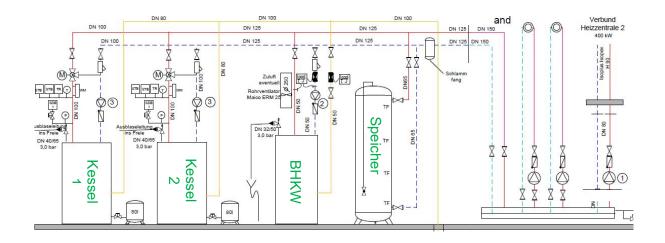


Abbildung 1: Ausschnitt des R&I-Fließbildes des Heizsystems im Klinikum Nord

Welche Teile und Elemente des Gebäudes (bspw. Fußbodenheizung, Lüftung, o.ä.) vorhanden sind bzw. durch diese Heizanlage betrieben werden wird aus den Fließbildern nicht ersichtlich.

Die Kessel werden wechselweise betrieben, damit Störungen und Defekte der Anlagen sich frühzeitig bemerkbar machen und die Zustände (Abnutzungserscheinungen, etc.) der Anlagen gleich sind.

Es besteht ein Erdgasanschluss, der ausschließlich die Heizgeräte und das BHKW versorgt. Ein Anschluss an das Stromnetz ermöglicht einen Bezug und die Ausspeisung (BHKW) von Strom.

Die Wartung der Anlagen findet ausschließlich durch 2G Personal statt. Kleinere Maßnahmen, wie bspw. das Nachfüllen des Ölbehälters im BHKW werden gelegentlich auch durch das technische Betriebspersonal der Klinik übernommen. Wartungsereignisse in diesem Objekt werden in *Tabelle A 1* aufgeführt.

#### Klinikum Ost

Das Klinikum Ost ist ähnlich ausgestattet wie das Klinikum Nord. Eine Auflistung der technischen Ausstattung der Energieversorgung ist in *Tabelle 2* aufgeführt.

Bei diesem Objekt handelt es sich ebenfalls um ein Klinikum mit Akutmedizinischen, sowie Reha-, Pflege- und Therapieeinrichtungen. Die Bettenzahl beträgt laut Angaben des Klinikums 220. Die Nutzfläche, sowie Belegung zu gegebener Zeit sind nicht bekannt.

Eine Besichtigung dieses Objekts war nicht möglich, daher konnten auch Betriebsspezifische Besonderheiten nicht ausgewiesen werden. Es wird an dieser Stelle angenommen, dass auch hier der Betrieb wie im Klinikum Nord über Fernsteuerung durch 2G erfolgt und dass Wartungsvorhaben ausschließlich durch 2G Personal durchgeführt wird.

Tabelle 2: Technische Ausstattung des Energieversorgungssystems im Klinikum Ost

внки:	2G G-Box 50		
Spezifikationen:	25,0 – 49,5 kW <sub>el</sub> / 50 – 100 kW <sub>th</sub>		
	$0,\!265-0,\!34\left(\eta_{el}\right)/0,\!716-0,\!691\left(\eta_{th}\right)$		
Thermischer Speicher:	Pufferspeicher, Warmwasser (Fa. Unbekannt)		
Spezifikationen:	1500 I (3x)		
Heizkessel:	k.A.		
Spezifikationen:	k.A.		

Abbildung 2 zeigt Ausschnitte des R&I-Fließbildes der Anlage im Klinikum Ost.

Der größere Speicher wird auch hier aufgezeigt. Dieser wird als 3 Einzeleinheiten dargestellt, die kaskadenartig miteinander verbunden sind. Alle vier Temperatursensoren am Speicher sind mit "TC<sub>2G</sub>" ausgewiesen, was suggeriert, dass alle Temperaturmessungen in der Regelung der BHKW-Anlage durch 2G berücksichtigt werden.

Neben dem größeren Speicher ist hier auch die hydraulische Weiche eine weitere Besonderheit. Diese ermöglicht die bessere Entkopplung des Betriebs der einzelnen Anlagenkomponenten und verringert dadurch die Störanfälligkeit. Es ist unklar, wie die Kessel betrieben werden. Aufgrund des größeren Anschlussdurchmessers von Kessel 1 ist jedoch anzunehmen, dass Kessel 1 größer dimensioniert ist. Der Abgaswärmetauscher deutet auch auf eine größere Effizienz von Kessel 1 hin. Neben den Heizkreisen für bspw. Küche, Bettentrakt und Lüftung ist hier auch eine Fußbodenheizung gegeben.

Es besteht ein Erdgasanschluss, der ausschließlich die Heizgeräte und das BHKW versorgt. Ein Anschluss an das Stromnetz ermöglicht einen Bezug und die Ausspeisung (BHKW) von Strom.

Die Wartungsereignisse für das Objekt Klinikum Ost sind in Tabelle A 2 aufgeführt.

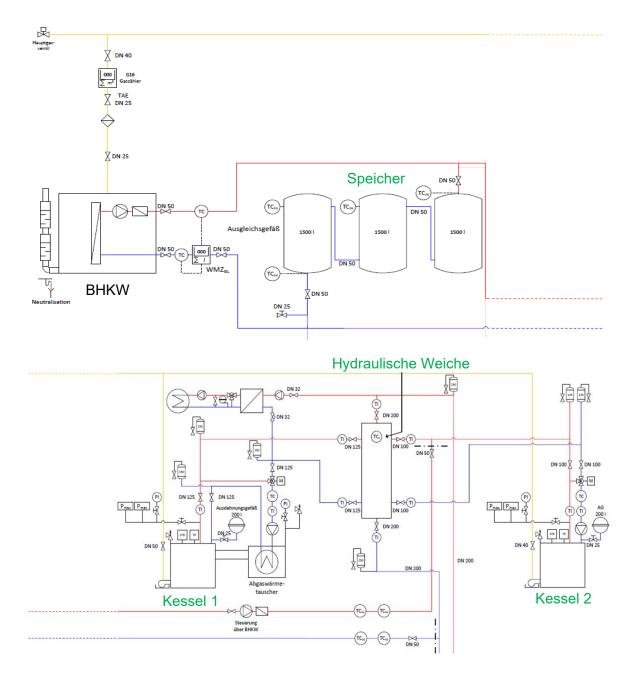


Abbildung 2: Ausschnitt des R&I-Fließbildes des Heizsystems im Klinikum Nord

## Vorliegende Daten

Für die Objekte Klinikum Nord und Klinikum Ost wurde jeweils der gleiche Datensatz durch die Bayernwerk Natur GmbH bereitgestellt. Folgende Daten standen hierbei zur Verfügung:

- Stündlicher Gasbedarf 2016 (2017)
- ¼-stündlicher Strombezug 2016 (2017)
- 1/4-stündliche Messdaten am BHKW bezüglich
  - Vor- und Rücklauftemperaturen

- Thermische Leistung
- o Durchfluss der Umwälzpumpe
- Monatliche Daten bezüglich:
  - Kesselbetriebsstunden
  - BHKW-Betriebsstunden
  - o BHKW-Anlagenstarts
  - BHKW-Energieproduktion (Strom/Wärme)
  - o BHKW-Gasbedarf
  - o Gebäude Gasbedarf (nur Klinikum Ost)

Sowohl für die technische Betrachtung der BHKW-Anlagen, sowie für den ökonomischen Vergleich mithilfe der Lehrstuhlmodelle waren weiterhin Wetterdaten vonnöten. Die Temperaturdaten wurden hierzu vom Deutschen Wetterdienst in stündlicher Form erhoben. Hierbei wurde das Wetter von München und Klinikum Nord, sowie das Wetter von Fürstenzell und Klinikum Ost als annährend gleich angenommen.

Die Globalstrahlungswerte bzw. PV-Leistungswerte wurden historischen Messungen an Anlagen auf dem Dach des Lehrstuhls für 2016 bzw. 2017 entnommen.

#### Lastgänge und Energieverbrauch

Zur Berechnung der Lastgänge des jeweiligen Objekts lagen nur die Gasbedarfe in stündlicher Form, sowie die thermischen Daten des BHKWs in ¼-stündlicher Form. Des Weiteren waren monatlich abgelesene Zählerdaten für die oben aufgelisteten BHKW Parameter gegeben. Somit konnte aus Gasbedarf und Wärmebereitstellung ein monatlicher Wärmenutzungsgrad errechnet werden. Durch Herunterbrechen der ¼-stündlichen Daten der thermischen BHKW-Leistung auf stündliche Daten und die Umrechnung der Werte in die entsprechende Gaslast durch den Nutzungsgrad konnte zunächst die Kesselgaslast errechnet werden, unter der Annahme, dass das bezogene Gas nur für die Wärmebereitstellung genutzt wird:

$$\overline{P}_{Gas,Kessel}(t_i) = \overline{P}_{Gas,Geb\"{a}ude}(t_i) - \frac{\overline{P}_{th,BHKW}(t_i)}{\overline{g}_{th,BHKW}}$$
 (2-1)

Mithilfe des kesselseitigen Gasverbrauchs und der vom Hersteller ausgewiesenen Wirkungsgrade des Kessels [1] konnte nun eine Näherung der Wärmelast der Gebäude errechnet werden. *Abbildung* 3 zeigt die aus dieser Rechnung resultierende Jahresdauerlinie des Jahres 2016 für Klinikum Nord (oben) und Klinikum Ost (unten), sowie der jeweiligen BHKWs

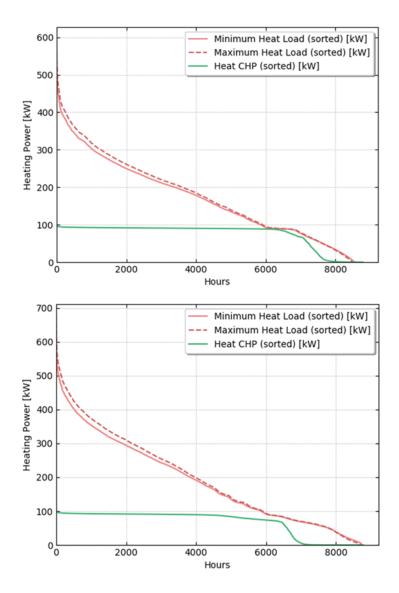


Abbildung 3: Näherung der Wärme-Jahresdauerlinie des Jahres 2016 für das Klinikum Nord (oben), Klinikum Ost (unten), sowie der jeweiligen BHKW.

Da der genaue Wirkungs- bzw. Nutzungsgrad der Kessel zum gegebene Zeitpunkt unbekannt sind, sind Kennlinien für eine maximale und minimale Wärmelast dargestellt. An einigen Stellen der Jahresdauerlinien (JDL) macht sich jedoch bemerkbar, dass es sich hierbei um eine Näherung handelt. Der Knick der JDL bei ca. 6000 Stunden könnte beispielsweise auf einen zu dem Zeitpunkt zu niedrig angesetzten thermischen Nutzungsgrad des BHKW zurückzuführen sein, da es sich bei den verwendeten Nutzungsgraden um Monatsmittel handelt. Außerdem wurde bereits festgehalten, dass das BHKW zu keinem Zeitpunkt moduliert, sondern gegebenenfalls taktet. Daher sind die Werte der thermischen Leistung des BHKW zwischen 0 und 90 kW auf An- und Abfahrvorgänge in der jeweiligen Stunde zurückzuführen. Beim Abgleich der BHKW Betriebsstunden mit den monatlichen Zählerwerten wurde ferner deutlich, dass sich aus den ¼-stündlichen bzw. stündlichen Daten geringere Betriebsstunden ergeben. Dies ist auf fehlerhafte Werte in den hochaufgelösten Daten zurückzuführen, beispielsweise vor, während oder unmittelbar nach Wartungsvorgängen. Diese Werte werden hier als 0 kW abgebildet. Auch die schwer ersichtliche Grundlast in beiden Objekten ist auf fehlerhafte Daten, sowie auf Fehler in der Umrechnung zurückzuführen. Dadurch ergeben sich 67 Stunden (Klinikum Nord) bzw. 292 Stunden (Klinikum Ost) in denen die Wärmebereitstellung 0 kW beträgt.

Im Vergleich zeigt sich, dass die Wärmelast im Klinikum Ost für höhere Lastbereiche (ca. > 150 kW) größer ist und im unteren Lastbereich (ca. < 150 kW) sehr ähnlich verläuft (vgl. Abbildung A1). Die maximale Wärmelast der Objekte beläuft sich auf 598 kW im Klinikum Nord und 679 kW im Klinikum Ost. Der monatliche Gasbedarf (*Abbildung 4*) zeigt, dass diese Diskrepanz vor allem durch einen stärkeren Raumwärmebedarf im Klinikum Ost im Winter zurückzuführen ist. Im Sommer verhalten sich beide Objekte thermisch nahezu gleich.

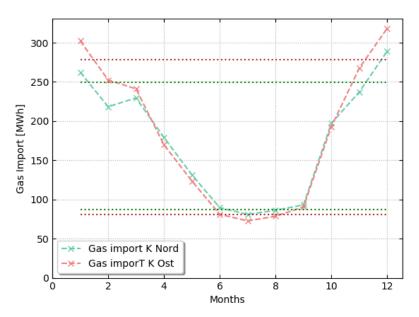


Abbildung 4: Gasbezug der Objekte Klinikum Nord und Klinikum Ost, sowie deren durchschnittlicher Gasbedarf in den Winter- und Sommermonaten

Der durchschnittliche Gasbedarf in den Wintermonaten beträgt hier 250 MWh (Klinikum Nord) bzw. 280 MWh (Klinikum Ost) und in den Sommermonaten 87 MWh (Klinikum Nord) bzw. 81 MWh (Klinikum Ost). Dieser Unterschied könnte auf unterschiedliche Dämmung, Sanierungsgrade oder Nutzflächen der Objekte zurückzuführen sein.

Aus den monatlichen elektrischen Nutzungsgraden und den stündlichen Netzbezugsdaten lassen sich außerdem die Strom-JDL der Objekte näherungsweise errechnen. Die Berechnungen beruhen auf der Annahme, dass der gesamte vom BHKW erzeugte Strom von dem Objekt selbstgenutzt werden. Laut technischem Betriebsleiter der Anlage wird zumindest ein erheblicher Teil dieses Stroms selbst genutzt. Quantifizierbar ist dies am Klinikum Ost, für welches monatliche Ausspeisungszähler für die Jahre 2016 und 2017 vorliegen (siehe Tabelle A 3). Demzufolge beträgt der Fehler dieser Annahme etwa 11% (2016) bzw. 13% (2017) bezogen auf die jährliche BHKW Stromproduktion und 5% (2016) bzw. 7% (2017) bezogen auf den gesamten Stromverbrauch.

Die Jahresdauerlinien werden in Abbildung 5 dargestellt.

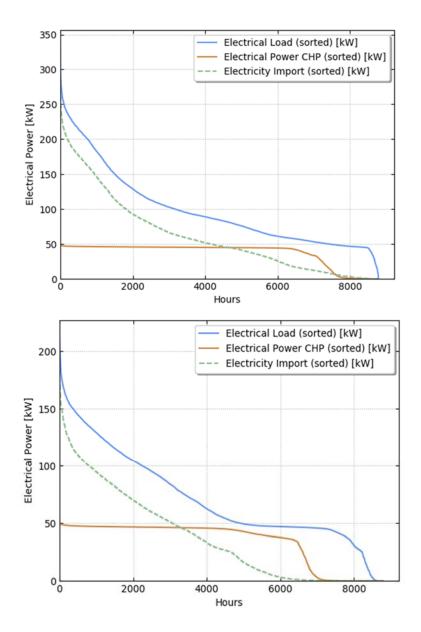


Abbildung 5: Näherung der Strom-Jahresdauerlinie des Jahres 2016 für das Klinikum Nord (oben), Klinikum Ost (unten), sowie der jeweiligen BHKW.

Es wird ersichtlich, dass sowohl der Stromnetzbezug, als auch der errechnete Strombedarf im Klinikum Nord über das gesamte Jahr hinweg signifikant höher ist als im Klinikum Ost.

Auch hier macht sich stellenweise ein ungewöhnlicher Verlauf der JDL bemerkbar, der auch hier vermutlich auf die fehlerbehaftete Annahme bezüglich des Eigenverbrauchs und stellenweise fehlende Werte zurückzuführen ist. Hier ist einerseits der fehlende Grundverbrauch in beiden Objekten, sowie beispielsweise der "Knick" der Dauerlinie für Klinikum Ost bei ca. 4500 h zu erwähnen.

Abschließend werden die jährlichen Verbräuche der Objekte vergleichen. Diese sind in *Abbildung 6* dargestellt.

Da für Klinikum Ost zusätzlich alle benötigten Daten für 2017 vorliegen, wurden diese hier ebenfalls angeführt. Es wird ersichtlich, dass sich die Jahre energiebedarfstechnisch über das gesamte Jahr nicht unterscheiden. Ferner sind Gas- und Wärmebedarf im Klinikum Nord deutlich niedriger als im Klinikum Ost, sowie der Strombedarf deutlich höher, wie bereits herausgestellt werden konnte.

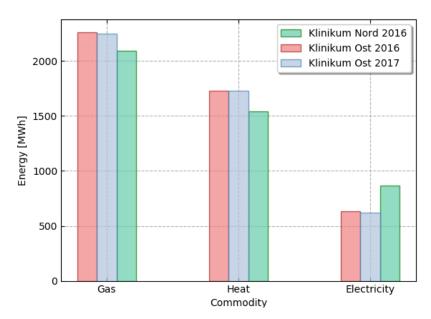


Abbildung 6: Jährliche Energiebedarfe der untersuchten Objekte Klinikum Nord (2016), sowie Klinikum Ost (2016 und 2017)

Die Jahresdauerlinien für den Wärme-, sowie den Strombedarf für Klinikum Ost und das Jahr 2017 unterscheiden sich, ebenso wie die jährlichen Verbräuche, nicht signifikant von den Jahresdauerlinien des Jahres 2016. Allerdings ist der leichte Leistungsabfall des BHKW ab ca. 4500 h im Jahr 2017 nicht zu beobachten.

# 3. Auswertung des BHKW-Betriebs

Im Folgenden wird anhand der vorhandenen Daten eine vergleichende, energietechnische Bewertung der BHKW-System in den jeweiligen Objekten vorgenommen.

## Betriebsverhalten und Nutzungsgrade

Auch die jährliche Energiebereitstellung durch die BHKWs ist in beiden Objekten mit einer Eigenbedarfsdeckung von 47%el und 34%th für Klinikum Ost bzw. 38%el und 43%th für Klinikum Nord verhältnismäßig hoch. *Abbildung 7* zeigt hierzu die Wärme- und Strombereitstellung bzw. den Gasverbrauch der jeweiligen BHKWs. Es zeigt sich, dass die bereitgestellten Energiemengen sehr ähnlich sind (Abweichung Nord/Ost, ca. 2,8%th und 2,5%el). Dies kann auf die nur geringfügig abweichenden Energieprofile der Objekte zurückgeführt werden. Die Abweichungen der monatlichen Bereitstellung bewegen sich allerdings im Bereich -29%th und 24%th und müssten in Zusammenhang mit der Auslastung der jeweiligen Einrichtung gesehen werden.

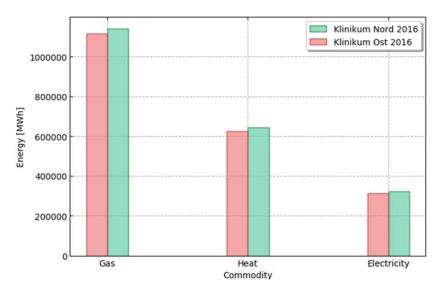


Abbildung 7: Jährlicher Gasverbrach und Wärme- bzw. Strombereitstellung durch BHKW im Klinikum Nord und Klinikum Ost 2016

Aufgrund des hohen Wärme- und Stromgrundbedarfs der Objekte ergibt sich eine sehr hohe jährliche Betriebslaufzeit der jeweiligen BHKW. *Abbildung 8* zeigt hierzu die monatlichen BHKW-Betriebsstunden des Jahres 2016 für Klinikum Nord und Klinikum Ost.

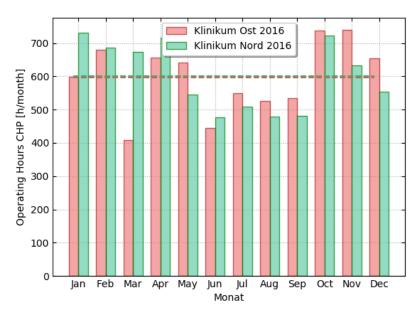


Abbildung 8: Monatliche BHKW- Betriebsstunden der BHKW am Klinikum Nord und Klinikum Ost für das Jahr 2016

Es wird ersichtlich, dass die Betriebsstunden in den Sommermonaten zurückgehen, da die Anlage aufgrund verringerter Wärmeabnahme verstärkt taktet. Durchschnittlich betragen die Betriebsstunden etwa 600 Stunden im Monat und sind für beide Standorte annähernd gleich. Die höchsten Werte sind für den Monat November (Klinikum Ost) mit 740 Stunden bzw. Januar (Klinikum Nord) mit 731 Stunden zu verzeichnen. Die verfügbaren Werte für das Jahr 2017 sind in *Abbildung A 2* zu finden.

Auffallend sind hier der Monat Januar und März am Klinikum Ost bzw. die Monate Mai und Dezember am Klinikum Nord, die auffallend niedrige Betriebsstunden aufweisen. Dies ist auf vermehrte Wartungsarbeiten in den jeweiligen Monaten zurückzuführen. *Abbildung 9* zeigt hierzu einen Ausschnitt aus dem Monat März der Anlage Klinikum Ost. Das Wartungsereignis dauerte etwa zwei Wochen. Während der Wartungsarbeiten wurden scheinbar diverse, erfolglose Startversuche vorgenommen. Erst am 14. März 2016 konnte ein stabiler Betriebspunkt erreicht werden.

Bei genauer Untersuchung der ¼-stündliche BHKW-Messdaten konnten für das Jahr 2016 am Klinikum Ost etwa 21 wartungsähnliche Ereignisse identifiziert werden. Die Ursache für diese ungewöhnlich hohe Anzahl der Wartungseinsätze konnte im Rahmen dieses Projekt nicht aufgedeckt werden. Weitere Wartungsfälle werden im *Abbildung A 4* aufgeführt.

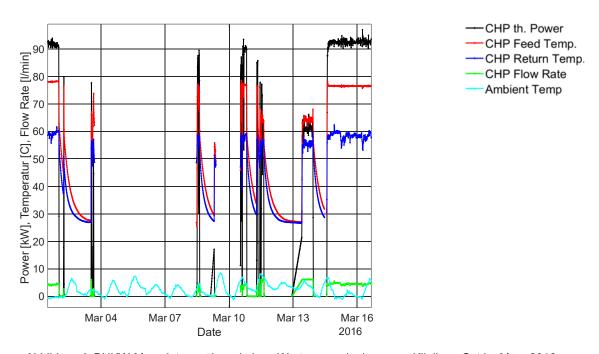


Abbildung 9: BHKW-Messdaten während eines Wartungsereignisses am Klinikum Ost im März 2016

Am Standort Klinikum Nord wurden mit neun Wartungseinsätzen 2017 deutliche weniger Wartungsfälle verzeichnet. Laut Betriebstechniker vor Ort waren jedoch auch hier deutlich mehr Wartungsfälle im Jahr 2016 zu verzeichnen, allerdings wurden Ende des Jahres Wartungsmaßnahmen an den Zylinderköpfen des BHKW vorgenommen, die dazu führten, dass die Wartungsanfälligkeit zurückging.

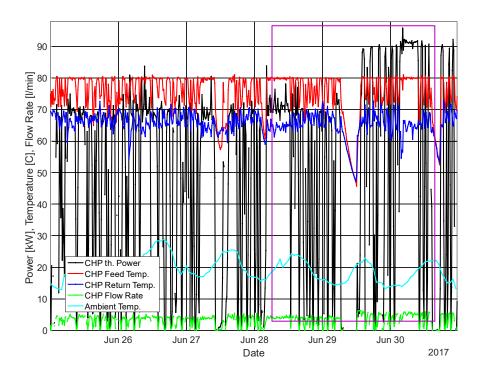


Abbildung 10: Betriebsdaten des BHKW am Klinikum Nord im Juni 2017, vor und nach der Auswechslung des Abgaswärmeübertragers der BHKW-Anlage

Eine wiederkehrende Wartungsmaßnahme an beiden Anlagen ist der Austausch des Abgaswärmeübertragers (AWT). Mit Hilfe der verzeichneten Service-Einsätze und den ¼-stündlichen BHKW-Daten konnten ferner die vermeintlichen Auswirkungen eines defekten AWT beobachtet werden. *Abbildung 10* zeigt hierzu die Betriebsdaten des BHKW im Klinikum Nord. Die Abschaltung und Reparatur
des BHKW fand am 29 Juni statt. Vor der Wartungsmaßnahme wird deutlich, dass die thermische
Leistung auf ca. 71 kW abgefallen war. Nach der Wartung hingegen, steigt die Leistung wieder auf
90 kW an. Dies ist vermutlich auf einen schlechteren Wärmeübergang vom Abgas zum Medium zurückzuführen. Die Pumpe regelt dadurch den Durchfluss herunter um eine gleichbleibende Vorlauftemperatur zu gewährleisten. Nach dem Austausch des Wärmeübertragers steigt der Durchfluss entsprechend wieder an.

Wie bereits hervorgehoben wurde, ist das BHKW der Firma 2G, das in beiden Objekten eingesetzt wird, auf bis zu 50% der Nennleistung modulationsfähig. Der Betrieb der Anlage findet jedoch über Fernsteuerung statt und wird nicht moduliert. Der Betreiber vor Ort hat also keine Eingriffsmöglichkeiten auf Regelparameter. Allerdings werden die Wartungsverträge der Anlage auch nach Betriebsstunden abgerechnet, d.h. die erzeugte Energiemenge würde bei Modulieren des BHKW teurer werden. Aufgrund dieser Tatsache ist in den Sommermonaten ein intensives Taktverhalten zu beobachten. Die Anlagenstarts für den jeweiligen Monat und am jeweiligen Standort werden als Balkendiagramm in Abbildung 11 dargestellt.

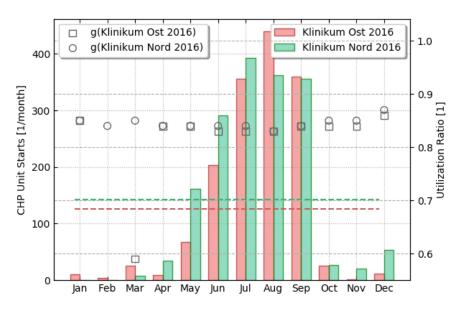


Abbildung 11: BHKW-Anlagenstarts für den jeweiligen Monat des Jahres 2016 für die Standorte Klinikum Nord und Klinikum Ost

In den Sommermonaten fängt das BHKW an zu takten, da der Wärmebedarf deutlich abnimmt und der Warmwasserspeicher nicht groß genug ist um die Wärme zwischen den Zeiten höheren Bedarfs zu puffern. Über das gesamte Jahr 2016 startet das BHKW 1513-mal (Klinikum Ost) bzw. 1750-mal (Klinikum Nord). Aus den ¼-stündlichen BHKW-Daten ergeben sich geringfügig niedrigere Werte. Es wird ersichtlich, dass das BHKW am Klinikum Ost weniger taktet als das BHKW am Klinikum Nord. Dies kann durch den deutlich niedrigeren Wärmebedarf am Klinikum Nord (ca. 10,9%) begründet werden. Die Anzahl der Starts bewegt sich zwischen einem und 440-mal pro Monat. Durchschnittlich ergeben sich 126 (Klinikum Ost) bzw. 147 (Klinikum Nord) pro Monat.

Auch die monatlichen Nutzungsgrade aus abgelesenen, monatlichen Zählerdaten sind für den jeweiligen Standort in *Abbildung 11* dargestellt. Es wird deutlich, dass der Nutzungsgrad über die Sommermonate geringfügig abnimmt. Dieser fällt um ca. 3,2% (Klinikum Ost) bzw. um 3,3% (Klinikum Nord) ab. Diese Beobachtung kann durch vergangene Untersuchungen am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik bestätigt werden [2]. Der Grund für dieses Verhalten sind die niedrigeren Wirkungsgrad der Anlage bei Anfahrvorgängen. Die Nutzungsgrade bewegen sich im Bereich 0,831 – 0,858 in Klinikum Ost und zwischen 0,837 – 0,867 im Klinikum Nord.

Allerdings ist hervorzuheben, dass die monatlichen Daten in einigen Fällen fehlerbehaftet sind, wie anhand der Werte für Klinikum Ost im Februar und März ersichtlich wird. Hier betragen die Nutzungsgrade 1,1 bzw. 0,59 und sind vermutlich auf Ablesefehler zurückzuführen.

Abbildung 12 zeigt ferner die BHKW-Starts und die Nutzungsgrade für das Jahr 2017.

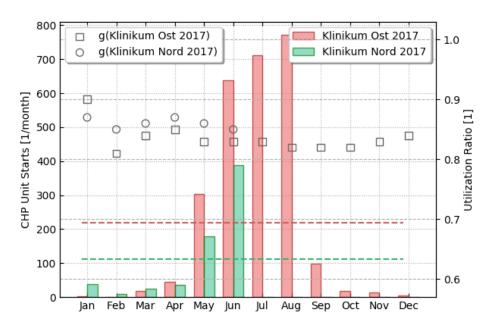


Abbildung 12: BHKW-Anlagenstarts für den jeweiligen Monat des Jahres 2016 für die Standorte Klinikum Nord und Klinikum Ost

Während sich hier die Daten für das Klinikum Nord gegenüber 2016 kaum unterscheiden, ist für das Klinikum Ost ein signifikanter Anstieg der Anlagenstarts zu verzeichnen. Auch die Nutzungsgrade sind zwischen Juli und Dezember um maximal 2,5% niedriger im Jahr 2017. Die Wärmelast des Gebäudes ist näherungsweise gleich und weicht laut monatlicher Zählerdaten gegenüber dem Vorjahr um 2,3% ab. Die einzelnen elektrischen und thermischen Nutzungsgrade für die jeweiligen Monate werden im *Abbildung 13* ausgewiesen. Es wird deutlich, dass sich auch hier kein saisonaler Trend der Nutzungsgrade bzw. eine deutliche Abhängigkeit vom Taktverhalten bestätigen lässt.

Bei näherer Betrachtung der ¼--stündlichen BHKW-Daten für das Jahr 2017 fällt auf, dass das Betriebsverhalten der Anlage Änderungen aufweist.

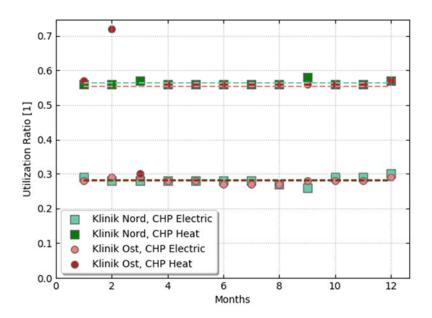


Abbildung 13: monatliche elektrische und thermische Nutzungsgrade der BHKWs an den Standorten Klinikum Nord und Ost für das Jahr 2016

Abbildung 14 zeigt hierzu die Betriebsparameter (thermische Leistung, Vorlauf-, Rücklauftemperatur, Pumpendurchfluss und Umgebungstemperatur) der BHKW-Anlage in ¼-stündlicher Auflösung.

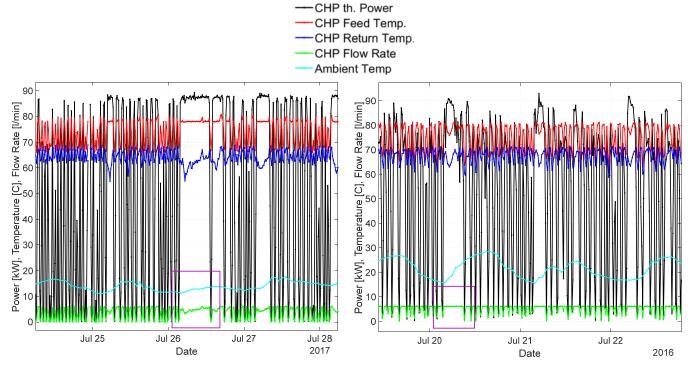


Abbildung 14: Ausschnitt der BHKW-Betriebsgrößen (inkl. Durchfluss Pumpe), der vierten Juli-Woche 2017 und der dritten Juli-Woche 2016

Es wird ersichtlich, dass das Pumpenverhalten sich merklich verändert hat. Zwischen dem 26. und 27. Juli 2017 regelt die Pumpe um die Vorlauftemperatur zu halten. Im darauffolgenden Jahr, zwischen dem 20. Und 21. Juli stellt die Pumpe den maximalen Durchfluss bereit und wird nicht geregelt.

Dies kann an Regelparametern, oder aber an der Änderung des Heizkreises liegen. Es scheint so, als wäre ein Teil des Heizkreises im Jahr 2017 nicht durch das BHKW versorgt worden, sodass die Druckverluste und damit die Pumpenleistung geringer ausfielen. Genauere Informationen sind zu diesem Sachverhalt nicht verfügbar. Die gesamte Wärmelast hat sich zwischen den Jahren nur marginal um -2,3% geändert.

#### Speicher

Wie bereits hervorgehoben ist im Klinikum Ost eine größere thermische Speicherkapazität gegeben, da hier ein um ca. 1.700 l größerer Warmwasserspeicher und außerdem eine hydraulische Weiche installiert sind. Ein größerer Speicher legt zunächst die Vermutung nahe, dass mehr BHKW-Wärme gepuffert werden kann und somit das Takten der Anlage geringere Ausmaße annimmt. Diese Vermutung kann weder durch die monatlichen Daten, noch durch die ¼-stündlichen BHKW-Daten eindeutig bestätigt werden. Die Anzahl der Starts ist näherungsweise gleich und im Jahr 2017 sogar deutlich höher (vgl. Abbildung 11 und Abbildung 12).

Zur Verdeutlichung der geringen Auswirkung des größeren Speichers wird in *Abbildung 15* am Klinikum Nord eine Woche im Übergangsmonat Mai dargestellt (oben), in der moderates Takten des BHKW beobachtet wird. Bei exemplarischer Berechnung der Flächen (unten) zwischen Gebäudegaslast (blau Linie) und der BHKW Gaslast (schwarze, gestrichelte Linie), sowie der Fläche zwischen der möglichen thermischen BHKW-Leistung (rote, gestrichelte Linie) und der tatsächlichen thermischen BHKW-Leistung (rote Linie) ergibt sich für die rote, gestreifte Fläche (A<sub>CHP</sub>) eine Fläche von 354,3 kWh, die durch vermiedenes Takten des BHKW theoretische zusätzlich bereitgestellt werden könnte. Für die blaue, gestreifte Fläche ergeben sich 504,1 kWh, die den Gasmehrverbrauch durch den Kessel darstellen. D.h. selbst, wenn das BHKW nicht takten würde, könnte die Zusatzheizung nicht vermieden werden in dieser Übergangswoche.

Ferner kann durch Annahme einer Temperaturspreizung von 20 K die Speicherkapazität vom Klinikum Nord näherungsweise zu ca. 65 kWh errechnen. Dies zeigt, dass mehr als fünf weitere Speicher dieser Größe vonnöten wären um das Takten in dieser Woche in großen Teilen zu vermeiden.

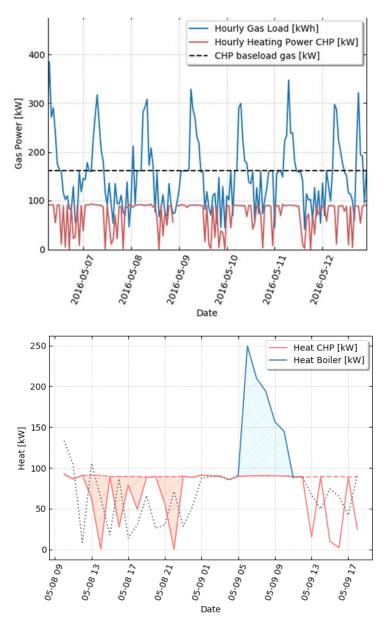


Abbildung 15: Thermische BHKW-Leistung und Gaslast des Gebäudes für eine Mai-Woche 2016 (oben), sowie vergleichende Darstellung der Flächen (Energie) des Gaskessels und der BHKW-Taktung (unten)

Abbildung 16 zeigt außerdem die mittlere, tägliche Wärmebereitstellung durch das BHKW am jeweiligen Ort, bezogen auf die tägliche, mittlere Außentemperatur. Üblicherweise ist der Wärmebedarf eines Objekts in guter Näherung durch eine Sigmoid-Kurve darstellbar. Hier sind jedoch, insbesondere in den höheren Temperaturbereichen deutliche Abweichungen festzustellen. Dies ist vermutlich auf die Speicherkapazität der Anlage zurückzuführen.

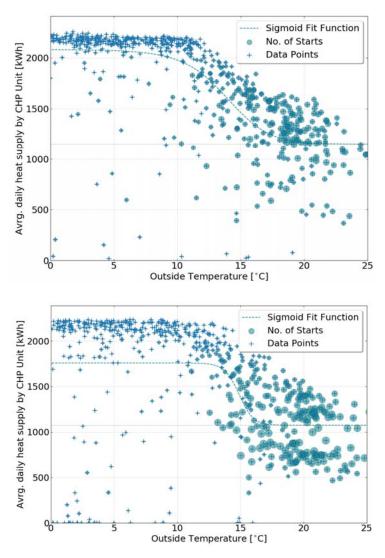


Abbildung 16: mittlere tägliche Wärmebereitstellung durch BHKW, aufgetragen auf mittlere tägliche Außentemperatur und einer Näherung durch Sigmoid-Kurve für Klinikum Nord (oben) und Klinikum Ost (unten)

Durch den Pufferspeicher ist es an wärmeren Tagen möglich, die Wärme zu späterem Zeitpunkt zu nutzen, sodass die Wärmebereitstellung durch das BHKW hier höher ist als eine Sigmoid-Kurve suggerieren würde. Die Abweichungen von dem Fit sind allerdings signifikant höher für das Klinikum Ost (unten). Dies könnte auf die erwähnte höhere Speicherkapazität der Anlage zurückzuführen sein.

Auch der Grundverbrauch des Gebäudes kann Anhand der Kurven in *Abbildung 16* mit etwa 1.100 kWh/d abgeschätzt werden.

#### Verluste

Am Klinikum Nord wurden vor Ort thermische Messung mit Hilfe einer Fluke Wärmebildkamera an der BHKW-Anlage durchgeführt. Anhand dieser Bilder wurden die jeweiligen Temperaturen und Wärmeverluste abgeschätzt. *Abbildung 17* zeigt hierzu ausgewählte Aufnahmen. Es hat sich gezeigt, dass die Seitenwände verhältnismäßig gut isoliert sind und sich in einem Temperaturbereich zwischen 25°C und 35°C bewegen. Die Vorlaufpumpe weist an der Anlage die höchsten Temperaturen auf mit etwa 80°C. Eine Isolierung der Pumpe hätte jedoch betriebstechnische Schwierigkeiten zur Folge, sodass diese nicht in Frage kommt. Für die Abschätzung der Wärmeverluste wurde für jede Seiten Wand, sowie für die Pumpe ein Strahlungs- und ein Konvektionsterm berücksichtigt. Für die Seitenwände errechnet sich somit eine Verlustleistung von etwa 2,8 kW. Für die Pumpe ergibt sich eine Verlustleistung von ca. 1,7 kW. Insgesamt ergeben sich somit für die Strahlungs- und Konvektionsverluste an der Anlage Verluste im Bereich von < 4%.

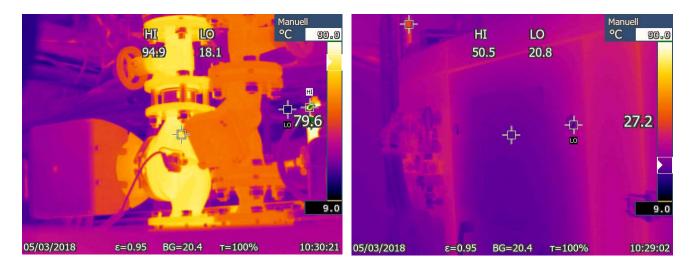


Abbildung 17: Wärmebildaufnahme der Vorlaufpumpe (links), und einer Seitenwand des 2G G-box 50 BHKWs im Klinikum Nord

# 4. Ökonomische Betrachtung

Zunächst wurden für eine ökonomische Evaluation eine Erweiterung des BHKW-Systems, sowie eine zusätzliche Wärmesenke in Betracht gezogen und anhand des Beispiels Klinikum Nord bzw. Klinikum Ost eine überschlägige Kostenbetrachtung angestellt. Anschließend wird mit Hilfe der generierten Lastdaten eine Energiesystemauslegung, sowie ein Vergleich der mit einer solaren Option im MILPtool ficus durchgeführt.

### Erweiterungsoptionen

Durch die Errechnung der Lastdaten der jeweiligen Objekte und die Betrachtung der BHKW-Laufzeiten wurde deutlich, dass die Betriebsstunden die üblicherweise angesetzten 5000 Stunden signifikant überschreiten. Daher wird die Erweiterung des vorhandenen Systems durch ein weiteres BHKW diskutiert. Abbildung 18 zeigt hierzu den Wärmelastgang für Klinikum Nord, die BHKW-Erzeugung, sowie eine idealisierte Darstellung eines zusätzlichen BHKW (2G G-Box20). Die thermische Leistung des 2G G-Box20 beträgt 44 kW und erreicht hier somit die Betriebsdauer von knapp 5000 Stunden. Es wird davon ausgegangen, dass die erzeugte elektrische Leistung vollständig durch das Objekt aufgenommen wird. Dies wird in Abbildung A3 dargestellt.

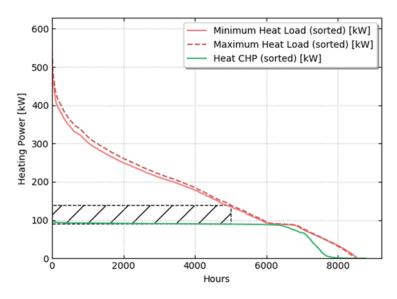


Abbildung 18: Jahresdauerlinie der Wärmelast am Standort Klinikum Nord mit BHKW-Erzeugung, sowie eine idealisierte Darstellung der Erzeugung eines zusätzlichen BHKW 2G G-Box 20

Durch die Installation des zweiten BHKW wird hier ein Strombezug von 102.720 kWh/a vermieden (ca. 16.440 €/a), bei einem Gasmehrverbrauch von ca. 84.480 kWh/a (ca. 3800 €/a). Die jährlichen Kapital- und Wartungskosten<sup>1</sup> belaufen sich bei einer Laufzeit von 12 Jahren und einem Zinssatz von 3,5% auf ca. 6.000 €/a. Ferner beträgt der KWK-Bonus für Eigennutzung etwa 4.000 €/a, womit sich

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Nach der Annuitätenmethode, dynamisch abgeschrieben

eine jährliche Gesamtersparnis von über 10.000 €/a und eine Amortisation von etwas über 5 Jahren ergibt.

Des Weiteren wurde eine ideale, zuschaltbare, zusätzliche Wärmesenke betrachtet. Diese wird in *Abbildung 19* dargestellt. Es wird hier anhand des Beispiels von Klinikum Ost angenommen, dass das BHKW durch die Wärmesenke 8.500 Stunden im Jahr in Betrieb ist.

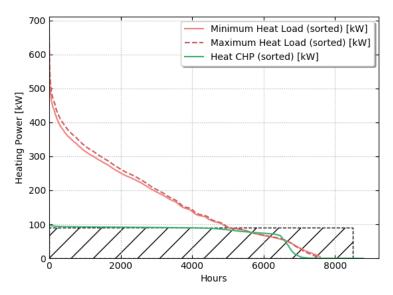


Abbildung 19: Jahresdauerlinie der Wärmelast am Standort Klinikum Ost mit BHKW-Erzeugung, sowie eine idealisierte Darstellung einer zusätzlichen, zuschaltbaren Wärmesenke

Hierdurch ergibt sich mit den gegebene Nutzungsgraden des BHKW eine zusätzliche Stromerzeugung von 96.544 kWh/a durch eine zusätzlich abgegebene Wärmemenge von 142.626 kWh/a. Abhängig davon, ob der Strom eingespeist oder selbst genutzt wird, kann diese technische Maßnahme ökonomisch sinnvoll sein. Ab einem Eigennutzungsanteil des Stroms von ca. 62% ist im Modell eine positive Ersparnis zu verzeichnen.

## Energieversorgungsmodell (ficus)

Für die Modellberechnungen wurden zunächst drei Fälle betrachtet. In folgender *Tabelle 3* werden die unterschiedlichen Berechnungen mit den jeweiligen Energiesystemoptionen aufgeführt.

Die hier aufgeführten Modellrechnungen wurden für Klinikum Nord angestellt. Für Klinikum Ost fehlen Photovoltaikdaten für diese Region und nach Prüfung der Sonnendauer (DWD) an den jeweiligen Orten, hat sich gezeigt, dass die Sonneneinstrahlung nur annähernd vergleichbar ist. Alle Rechnungen sehen zudem noch einen Netzanschluss an das Stromnetz vor, sowie eine Anbindung an das Gasnetz.

Die erste Auslegung (just PV) wurde nur mit einer Photovoltaik-Option durchgeführt. Die maximale Leistung von 80 kW wurde anhand der Dachflächen des Gebäudes (Klinikum Nord) auf Satellitenfo-

tos, sowie der Photovoltaikflächen auf dem Dach des Lehrstuhlgebäudes abgeschätzt. Der Heizkessel wurde als installiert angenommen mit 880 kW, da dieser für jedes System benötigt wird und so nicht in die Kostenrechnung einfließt.

Tabelle 3: Modellrechnungen und dem Modell jeweils zur Verfügung gestellte Anlagenoptionen

Auslegung	Anlagenoptionen
just PV	PV (bis 80kW), Heizkessel (installiert, 880 kW), Lithium-Ionen Batterie (bis 100 kWh)
just CHP 50	BHKW (50 kW), Heizkessel (installiert 880 kW), Wärmespeicher (bis 80 kWh)
CHP 50 & CHP 20	BHKW (50 kW & 20 kW), Heizkessel (installiert, 880 kW), Wärmespeicher (bis 80 kWh)
AII	BHKW (50 kW & 20 kW), PV (bis 80 kW), Heizkessel (installiert, 880 kW), Wärme- speicher (bis 80 kWh), Lithium-Ionen Batte- rie (bis 100 kWh)

Die zweite Auslegung (just CHP 50) wurde für eine Neuauslegung des IST-Zustands mit einem 50 kW BHKW und einem installierten Heizkessel berechnet. Bei der dritten Auslegung (CHP 50 & CHP 20) wurde noch die Option eines 20 kW-BHKW (siehe oben) zur Verfügung gestellt. Allerdings wird in der Rechnung auch die Modulationsfähigkeit der Anlagen ausgenutzt.

Die letzte Auslegung (All) stellt alle oben genannten Optionen für die Auslegung des Energiesystems zur Verfügung.

Ein Ausschnitt der Ausgabe des Programms ,ficus' für die letzte Rechnung wird bespielhaft in *Abbildung 20* dargestellt. In schwarz dargestellt, wird die hinterlegte Lastkurve des Objekts aufgezeigt. Die eingesetzten Anlagen – hier BHKW (20 kW und 50 kW), Heizkessel und Warmwasserspeicher – werden in unterschiedlichen Farben unter der Lastkurve ,gestapelt'. Die Ladung des Speichers wird zusätzlich in einem gesonderten Graphen aufgezeigt.

Die Daten die für die PV Stromerzeugung verwendet wurden sind empirische Daten vom Dach des Lehrstuhlgebäudes (Erzeugungsdaten von zwölf 250 W<sub>p</sub>-Modulen). Der erhebliche Teil der Daten stammt aus dem Jahr 2016. Einige kleine Lücken wurden durch Daten von 2017 in dem entsprechenden Zeitraum ergänzt. Diese Daten werden aufgrund der Nähe des Klinikums Nord zum Münchener Flughafen als übertragbar angesehen.

Die erste Rechnung ergab, dass die gesamte Photovoltaik Kapazität von 80 kW genutzt wird. Aufgrund der hohen Batteriepreise wird jedoch keine Batterie eingesetzt. Ein erheblicher Teil des Stroms wird durch die eigene Last genutzt. In diesem Modell wird etwa 2% des durch PV erzeugten Stroms in das Netz eingespeist. Dies macht den Einsatz eines Batteriespeichers, auch in Anbetracht fallender Preistendenzen unökonomisch.

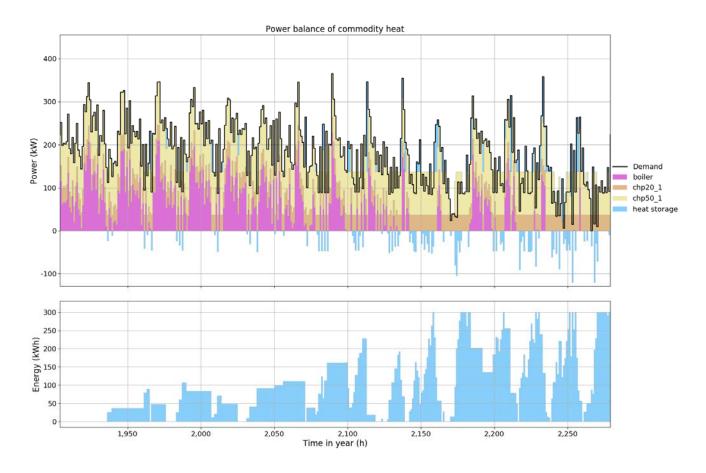


Abbildung 20: Beispielhafte Darstellung der Simulationsausgabe des MILP-Tools ,ficus': Wärmezeitreihen für den Brennwertkessel, die BHKWs und den Wärmespeicher.

Die BHKW Modellrechnung wurde zunächst für das bestehende System, d.h. für ein BHKW mit einer Leistung von 50 kW, sowie einem Heizkessel (880 kW) und einem 80 kWh Warmwasserspeicher (20 K Temperaturspreizung) in einer Neuauslegung durchgeführt. *Abbildung 21* zeigt hierzu die Jahresdauerlinie des 50 kW-BHKW in dem Modell, sowie aus realen Daten. Es wird ersichtlich, dass der Trend des BHKW-Betriebs gut abgebildet wird. Im Modell werden keine Wartungsereignisse berücksichtigt und die ideale Leistung (49,5 kW) bei Volllast angenommen. Allerdings sind auch fehlende Datenpunkte im Datensatz nicht abbildbar.

Bei diesen Modellrechnungen handelt es sich um eine Neuauslegung des gesamten Systems. Details zur Modellparametrisierung der Rechnungen sind in nachfolgender *Tabelle 4* zu finden. Die Abschreibungsdauer beträgt in den Modellen 10 Jahre für alle Anlagenkomponenten, außer Photovoltaik. Hier wurde aufgrund der Förderdauer mit einer Abschreibungsdauer von 20 Jahren gerechnet. Bei den Ausgewiesenen Kosten handelt es sich ferner um jährlich Gesamtkosten des Systems, die Investitionskosten, Kapitalkosten, Energiekosten (Gas und Strom), sowie alle ausgewiesenen Vergütungen durch BHKW und PV berücksichtigen.

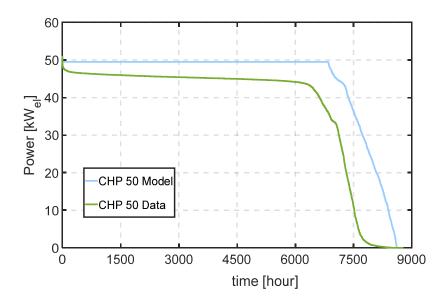


Abbildung 21: Jahresdauerlinie der BHKW (50 kW) Stromproduktion aus den realen Daten und aus der Modellrechnung

Tabelle 4: Modellparameter für die durchgeführten Modellrechnungen in 'ficus'

Strompreis (Leistungspreis/Arbeitspreis)	139.1 / 0.1605	[€/kW] / [€/kWh] [3] [4]		
Gaspreis (Leistungspreis/Arbeitspreis)	27.9 / 0.047	[€/(kW·a)] / [€/kWh] [5] [6]		
Vergütung				
BHKW (Einspeisung)	0.08	[€/kWh] [7]		
KWK-Index	0.029	[€/kWh] [8]		
BHKW (Eigenverbrauch)	0.04	[€/kWh] [7]		
PV (Einspeisung)	0.0851	[€/kWh] [9] [10]		
PV (Eigenverbrauch)	0	[€/kWh] [9]		
Investitionskosten				
BHKW (20 kW)	2755	[€/kW] [11]		
BHKW (50 kW)	1997.4	[€/kW] [11]		
PV	1200	[€/kW] [9]		
Batterie (Li-Ion)	500 / 800	[€/kW] / [€/kWh] [12]		
Variable Kosten				
BHKW (20 kW)	0.032	[€/kWh] [11]		
BHKW (50 kW)	0.025	[€/kWh] [11]		
PV	0.025	[€/kWh]		
Maximale Kapazität				
ВНКШ	70	[kW]		
$PV^2$	80	[kW]		
Batterie (Li-Ion)	300	[kWh]		

In *Abbildung 22* werden ferner die Kosten (oben) sowie die CO<sub>2</sub> Emissionen (unten) vergleichend dargestellt. Das teuerste System ist das reine PV-System, da hier eine sehr große Menge Strom aus

\_

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> PV- und Dachflächen wurden mit Hilfe von google maps vermessen. Dies ergab eine geschätzte maximale PV-Leistung von 80 kW für alle verfügbaren, näherungsweise nach Süden ausgerichteten Dachflächen.

dem Netz bezogen werden muss (ca. 91%). Auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen schneiden hier am schlechtesten ab, da die gesamte Wärme durch den Heizkessel bereitgestellt wurde. Der Einsatz einer Wärmepumpe wäre hier ebenfalls wenig sinnvoll, da der 'Überschussstrom' aus der PV-Erzeugung nur sehr klein ist (siehe oben), wodurch auch die Wärmepumpe zu einem erhöhten Stromverbrauch aus dem Netz mit einer durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emission von 0,565 kg/kWh (2016, [13]) führen würde. Durch die geringe Einspeisemenge ändert auch die Berücksichtigung von CO<sub>2</sub>-Gutschriften, d.h. die Vermiedene CO<sub>2</sub>-Menge (eingespeister Strom multipliziert mit Energiespezifischer CO<sub>2</sub>-Emission im Netz), das Ergebnis nicht signifikant. Dies verhält sich möglicherweise anders, wenn die maximale PV-Leistung größer ausgelegt werden könnte.

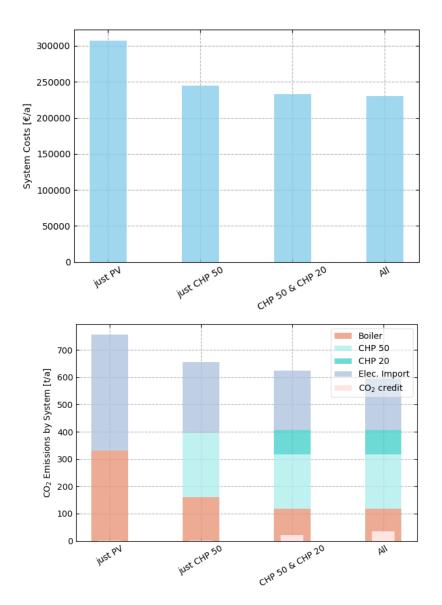


Abbildung 22: Systemkosten (oben), sowie CO<sub>2</sub> Emissionen (unten) des jeweiligen Energiesystems.

Der Einsatz eines BHKW (50 kW) führt zu einer deutlichen Reduktion der jährlichen Kosten (ca. 20%). Auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen sinken deutlich um ca. 13%. Die Erweiterung der BHKW Anlage um ein 20 kW-BHKW führt erneut zu einer Reduktion der jährlichen Kosten (ca. 5%) und einer geringeren CO<sub>2</sub> Emission (ca. 5%). Der Unterschied fällt jedoch verhältnismäßig klein aus.

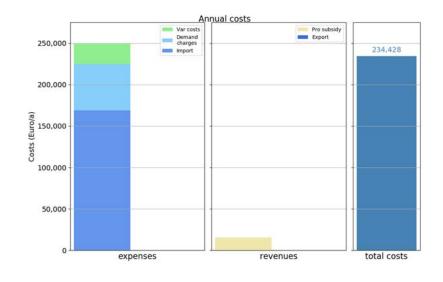
Auf Basis der durchgeführten Modellierungen ergibt sich als bestes System im Hinblick auf Kosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen jedoch eine Kombination aus allen drei Systemkomponenten (BHKW 50 kW, BHKW 20 kW und PV). Die Auswirkung einer PV-Anlage fallen kostentechnisch zwar gering aus (1% Kostensenkung), allerdings bewirkt diese eine verhältnismäßig hohe Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen (> 4%), besonders unter Berücksichtigung einer CO<sub>2</sub>-Gutschrift bei Einspeisung des Stroms.

Unter der Annahme, dass das BHKW, sowie der Warnwasserspeicher in der aktuellen Auslegung (50 kW-BHKW, 80 kWh) abgeschrieben sind, wird ferner die Ergänzung einer Photovoltaik-Anlage für Klinikum Nord und Klinikum Ost gerechnet. Hier ist allerdings erneut zu betonen, dass die PV-Erzeugungsdaten den Standort München abbilden und daher nur bedingt und fehlerbehaftet auf Klinikum Ost übertragbar sind. Aufgrund einer größeren verfügbaren PV-Fläche am Standort Ost wird hier eine maximale PV-Leistung von 100 kW<sub>p</sub> zur Verfügung gestellt. Auch der Warmwasserspeicher wird hier, wie in der Realität größer dimensioniert (ca. 100 kWh). Die übrigen Modellparameter entsprechen der *Tabelle 4*.

Laut Modell belaufen sich die jährlichen Gesamtkosten für das betrachtete System, d.h. Gas- und Strombezug (mit Leistungs- und Arbeitspreis), Investitions- und Kapitalkosten, sowie Wartungskosten am Standort Nord auf ca. 234 T€, wobei die Investitions- und Kapitalkosten im IST-Zustand hier auf 0 € gesetzt werden.

Die Ergänzung einer PV-Anlage in diesem Fall führt im Modell, wie in *Abbildung 23* verdeutlicht wird, zu einer jährlichen Ersparnis von etwa 1000 €. Durch den Kauf einer PV-Anlage entstehen zwar Investitions-, Kapitalkosten, sowie zusätzliche variable Kosten, jedoch wird durch die Vermeidung von Strombezug eine Ersparnis generiert, die die Mehrkosten überwiegt. Der erhebliche Anteil der Gesamtjahreskosten ist jedoch weiterhin durch den Strom- und Gasverbrauch des Systems gegeben, sodass die Einsparungen nur marginal sind, da auch, wie bereits erwähnt, die PV-Kapazitäten limitiert sind. Jedoch wird das PV-System selbst bei beliebiger Größe (bis zu 300 kW<sub>p</sub>) auf ca. 87 kW<sub>p</sub> kostentechnisch optimal ausgelegt, da eine reine Einspeisung des PV-Stroms die Mehrkosten nicht aufwiegen kann. Ein Batteriespeicher wird weiterhin, aufgrund der hohen Investitionskosten nicht berücksichtigt.

Auch für den Standort Ost wurde eine PV-Anlage im Modell ergänzt, wobei eine bereits vorhandene BHKW-Anlage (50 kW) mit Speicher (100 kWh) und Spitzenlastkessen (880 kW) angenommen wurde. Allerdings ist auch hier zu betonen, dass keinerlei Informationen zu Grundstücksflächen, technisch oder regulatorisch verfügbaren Dachflächen oder anderweitige Informationen zur genaueren Beurteilung des PV-Flächenpotenzials zur Verfügung stehen. Es wurde daher eine maximale PV-Leistung von 100 kW<sub>p</sub> angenommen, da bei einer Anlagengröße >100 kW keine feste Einspeisevergütung mehr vorgesehen ist [10].



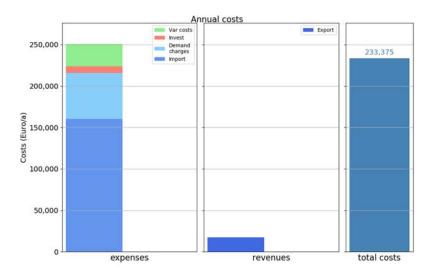
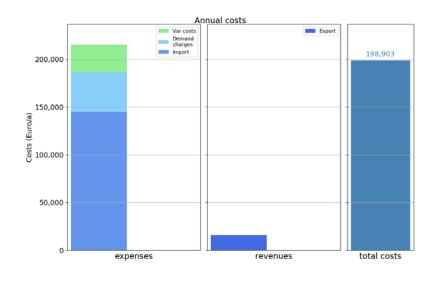


Abbildung 23: Darstellung der Systemkosten für das bestehende System mit BHKW (50 kW), Warmwasserspeicher (80 kWh), Gaskessel (880 kW) (oben), sowie der Kostenaufstellung mit einer ergänzten PV-Dachanlage (80 kWp) am Klinikum Nord (unten).

Wie in *Abbildung 24* verdeutlicht wird bringt die PV-Option am Standort Ost nur eine sehr geringe Ersparnis von weniger als 100 € pro Jahr. Dies liegt daran, dass der Strombedarf im Sommer am Standort Ost, verglichen mit dem Strombedarf am Klinikum Nord deutlich niedriger ist (siehe *Abbildung A 5*) und die Ersparnis zu einem erheblichen Teil durch die Vermeidung des Netzbezugs entsteht. Für die kostenoptimale Auslegung des Systems im Modell werden nur knapp 23 kW der zur Verfügung gestellten 100 kW tatsächlich wahrgenommen. Ein Batteriespeicher wird demnach auch nicht eingesetzt.



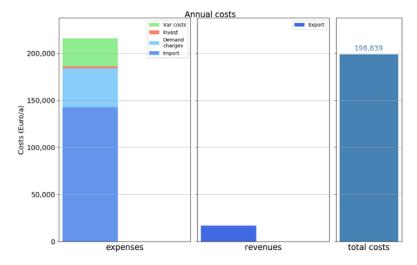


Abbildung 24: Darstellung der Systemkosten für das bestehende System mit BHKW (50 kW), Warmwasserspeicher (80 kWh), Gaskessel (880 kW) (oben), sowie der Kostenaufstellung mit einer ergänzten PV-Dachanlage (23 kW<sub>p</sub>) am Klinikum Ost (unten).

## 5. Ergebnisse und Ausblick

Für zwei Objekte in Bayern, Klinikum Nord und Klinikum Ost, wurden die verfügbaren energietechnischen Daten gesichtet und ausgewertet. Zunächst wurden die Energieverbräuche für Gas, Strom und Wärme ausgewiesen. Anschließend wurden anhand von stündlichen Gasdaten des jeweiligen Gebäudes, sowie von ¼-stündlichen Wärmedaten des Blockheizkraftwerks die Strom- und Wärmelastgänge der Objekte bestimmt.

Die Auswertung der Betriebsweise des BHKW hat gezeigt, dass das BHKW bis zu 700-mal im Monat an- und abfährt. Diese extreme Taktverhalten scheint jedoch nur sehr geringen Einfluss auf den (monatlichen) Nutzungsgrad der Anlage zu haben. Ein Einfluss auf die Lebensdauer oder Wartungsanfälligkeit, lässt sich anhand der vorliegenden Daten nicht ableiten. Aufgrund des stetigen Energieverbrauchs der Kliniken erreicht das BHKW mit weit über 7.000 Stunden und durchschnittlich 600 Stunden pro Monat sehr hohe Betriebszeiten. Dem gegenüber stehen jedoch vermehrte Wartungsfälle (bis zu 20 pro Jahr), die ungewöhnlich häufig zu verzeichnen sind. Ein häufiges Ereignis ist der Austausch des Abgaswärmeübertragers des BHKW. Dieser führt nach längerem Gebrauch zu erhöhten Druckverlusten und zum Abfall der thermischen Leistung des BHKW. Nach dem Austausch konnte der direkte Wiederanstieg der Wärmeleistung beobachtet werden.

Ferner wurde festgestellt, dass der größer ausgelegte Speicher keine deutlich sichtbaren Einflüsse auf die produzierte oder verbrauchte Energiemenge des BHKWs hat. Eine überschlägige Rechnung hat gezeigt, dass der Warmwasserspeicher versiebenfacht werden müsste, um beispielsweise den Einsatz des Kessels in Übergangstagen, in gewissen Zeitabschnitten zu kompensieren. Aus räumlichen Gründen ist jedoch selbst die Verdoppelung des Speichers nicht denkbar.

In einer Modellrechnung mit dem am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik entwickelten MILP-Tool ,ficus' wurden Neuauslegungen des Energiesystems anhand der errechneten Gebäudelastgänge durchgeführt, um einen Kosten- und Emissionsvergleich zwischen einem PV-basierten und einem BHKW-basierten System anzustellen. Es hat sich gezeigt, dass ein reines PV-System zu den höchsten Kosten und den höchsten CO<sub>2</sub> Emissionen führt. Dies ist auf die geringe Flächenverfügbarkeit und die dadurch gegebene maximale PV-Kapazität von schätzungsweise 80 Kilowatt gegeben. Dies führt zu einem hohen Strombezug aus dem Netz mit einer verhältnismäßig hohen CO2 Emission. Jedoch ist laut Modellrechnung auch der Zubau einer größeren PV-Leistung nur bis zu knapp 90 kW ökonomisch. Ferner wird die Wärme in diesem System ausschließlich aus einem Gaskessel gewonnen. Der Einsatz einer Wärmepumpe wäre hier aufgrund der limitierten PV-Fläche nicht sinnhaft, da der eingespeiste Strom der PV Anlage lediglich ca. 1,9% des insgesamt erzeugten Stroms beträgt. Somit würde auch die Wärmepumpe durch das Stromnetz betrieben werden. Bei einer größeren PV-Verfügbarkeit, wie bspw. am Standort Klinikum Ost, wäre auch eine Betrachtung von Wärmepumpen durchaus sinnvoll, da sich hier gezeigt hat, dass die Nutzung der gesamten PV--Kapazität nur zur Bereitstellung von Strom nicht ökonomisch ist. Es hat sich weiterhin ergeben, dass der Einsatz eines weiteren 20 kW BHKWs ökonomisch und ökologisch sinnvoll ist. Die niedrigsten Kosten und CO<sub>2</sub> Emissionen erzielt jedoch die Kombination aus allen Anlagen (BHKW 50 kW, BHKW 20 kW, PV).

Abschließend hat sich herausgestellt, dass die BHKW-Anlage in den Kliniken nur stellenweise überwacht wird. Es fehlen die hochaufgelöste Messung der zugeführten Gasleistung, sowie die Ausspeisung und Produktion von BHKW Strom. Diese Informationen würden einen deutlich detaillierteren Blick in Wartungsereignisse und Betriebsverhalten (bspw. durch stündliche Nutzungsgrade) der Anlage ermöglichen. Auch die Speichertemperaturen werden zwar an vier Punkten des Speichers gemessen, jedoch nicht aufgezeichnet. Auch hier könnte durch die hochaufgelöste Messung und Aufzeichnung die Speicherausnutzung und Ansteuerung näher untersucht werden, da diese Faktoren eine signifikante Rolle auch im BHKW-Betrieb spielen [2]. Auch ein Vergleich im Verscheiß- und Wartungsverhalten zwischen einem modulierenden und einem taktenden BHKW wäre in diesem Zusammenhang aufschlussreich. Diese Betrachtungen könnten Teil einer weiteren Studie sein, in der über einen längeren Zeitraum Messdaten dieser Art aufgezeichnet werden.

# Anhang

Tabelle A 1: BHKW Wartungseinsätze Klinikum Nord

Datum	Serviceeinsatz	Erläuterungen, Maßnahmen	größere Austauschteile
19.12.2016	Fehlersuche	-	-
18.01.2017	Ölwechsel, Fehlersuche Abgastemperatur	-	AWT
02.03.2017	Fehlersuche Leistungsabsen- kung	Verschmutzung Motor- und Heizkreis, Austausch	Plattenwärmetauscher
09.03.2017	Wartung M1 und Ölwechsel	Austausch, Abgasmessung (zu hoch), Einstellung	MAG
27.06.2017	Wartung und Ölwechsel, Fehlersuche Abgastempera- tur	Abgasmessung	-
29.06.2017		-	AWT, KAT
04.07.2017	Fehlersuche	Austausch, Reperatur	MAG
21.09.2017	Ölwechsel	-	-
15.11.2017	Wartung M1 und Ölwechsel, Fehlersuche Abgastempera- tur	-	Zündkerzen, AWT
22.11.2017	Wartung M1 (Fertigstellung)	-	-
09.01.2018	Ölwechsel	-	-

Tabelle A 2: BHKW Wartungseinsätze Klinikum Ost

Datum	Serviceeinsatz	Erläuterungen, Maßnahmen	größere Austauschteile
18.01.2016	Ölwechsel, Filterwechsel	-	
21.01.2016	Fehlersuche	hohe Temperatur KAT-Austritt	Zündkerzen
03.02.2016	Fehlersuche mit Ölwechsel	-	
08.03.2016	k.A.	Dichtungen überprüft und erneuert	Plattenwärmetauscher
10.03.2016	k.A.	-	
14.03.2016	Fehlersuche	-	Motorkreispumpe
07.04.2016	Wartung mit Ölwechsel	-	
27.04.2016	Ölwechsel	AWT muss erneuert werden	
31.05.2016	Ölwechsel, Filterwechsel	-	
08.06.2016	Wartung	Minderleistung, Zylinder 2 schlechte Kompression, schlechte Abgaswerte, Ventilspiel einstellen	AWT, KAT
09.08.2016	Wartung mit Ölwechsel	Minderleistung, hohe Morwas- seraustrittstemperatur	
25.08.2016	Ölwechsel	-	
07.10.2016	k.A.	hohe Temperatur KAT-Austritt	Zündkerzen
12.10.2016	Wartung mit Ölwechsel	-	
17.10.2016	Wartung	-	
08.03.2017	Fehlersuche	schlechte Kompression	
22.03.2017	Wartung mit Ölwechsel	schlechte Kompression	Zylinderköpfe
24.08.2017	Wartung mit Ölwechsel	-	
27.10.2017	Ölwechsel	AWT muss erneuert werden	

Tabelle A 3: Stromproduktion, -ausspeisung, sowie Stromverbrauch am Standort Klinikum Ost für das Jahr 2016

#### 2016

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	_	
Stromproduktion	25,173.00	32,107.00	18,995.00	30,178.00	26,977.00	17,368.00		
Stromverbrauch	52,294.96	49,968.94	52,742.98	48,489.92	48,972.98	51,607.00		
Stromausspei- sung	2,321.04	3,636.06	2,445.02	4,220.08	3,282.02	1,191.00		
	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Gesamt	-
	20,019.00	22,064.00	22,932.00	33,543.00	33,929.00	29,974.00	313,259.00	kWh
	54,848.98	52,081.98	51,568.99	52,390.88	52,848.92	55,227.94	623,044.47	kWh
	1,129.02	1,582.02	2,036.01	4,271.12	4,071.08	3,856.06	34,040.53	kWh

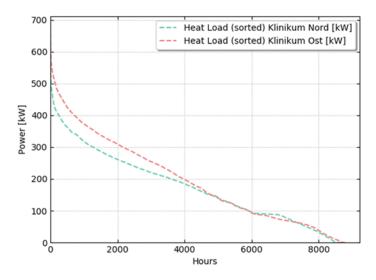


Abbildung A 1: Geordnete Dauerlinien der Wärmelast an den Standorten Klinikum Nord und Ost für das Jahr 2017

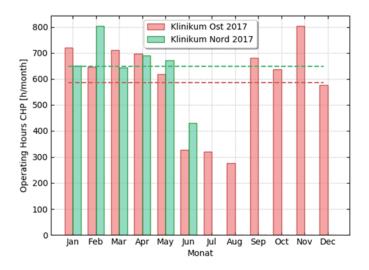


Abbildung A 2: Monatliche Betriebsstunden des BHKW an den Standorten Klinikum Nord und Ost für das Jahr 2017

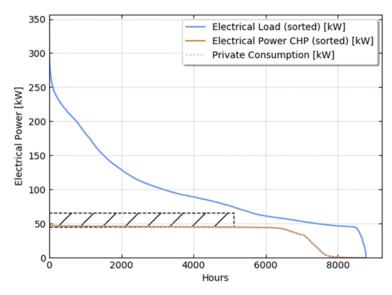


Abbildung A 3: Geordnete Dauerlinien der elektrischen Last und Deckung durch vorhandenes und zusätzliches 20 kW
BHKW im Klinikum Nord für das Jahr 2017

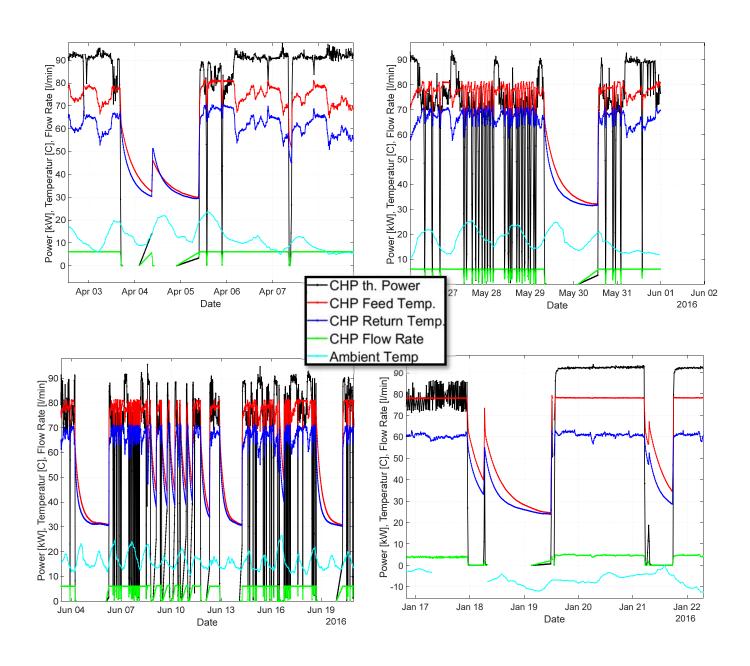


Abbildung A 4: Thermische Daten während der Wartungsfälle des BHKW am Standort Klinikum Ost in den Monaten Januar, April, Mai und Juni in ¼-stündlicher Auflösung

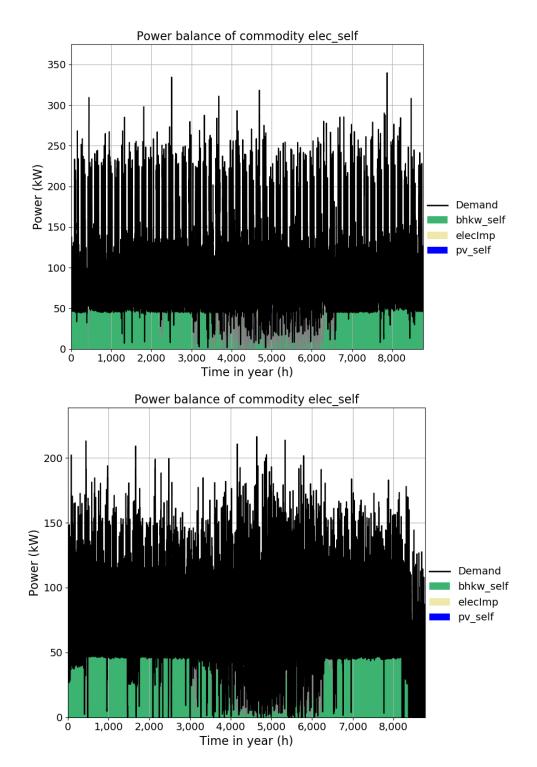


Abbildung A 5: Vergleichende Darstellung der Stromlast am Klinikum Nord (oben) und am Klinikum Ost (unten) über das Jahr 2016.

## Quellen

- [1] Viessmann Werke GmbH & Co. KG, Vitoplex 200 Niedertemperatur Öl-/Gas-Heizkessel, Datenblatt, Allendorf, 2016.
- [2] J. P. Lipp, *Flexible Stromerzeugung mit Mikro-KWK-Anlagen,* München, Bayern: Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, 2015.
- [3] Bayernwerk Netz GmbH, Preisblatt Netzentgelte Strom, Taufkirchen, 2017.
- [4] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., *BDEW-Strompreisanalyse Januar 2018*, Berlin: BDEW, 2018.
- [5] Bayernwerk Netz GmbH, Preisblatt Netzentgelte Gas, Taufkirchen, 2017.
- [6] Statista GmbH, "https://de.statista.com," 2017. [Online]. Available: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/168528/umfrage/gaspreise-fuer-gewerbe--und-industriekunden-seit-2006/. [Zugriff am 21 6 2018].
- [7] ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., KWKG 2017 in Zahlen, Berlin: wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 2017.
- [8] E. E. E. (EEX), "https://www.eex.com," 2016. [Online]. Available: https://www.eex.com/de/marktdaten/strom/spotmarkt/kwk-index. [Zugriff am 07 08 2018].
- [9] D. H. Wirth, "Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland," Fraunhofer-Institute für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, 2018.
- [10] Solarenergie-Förderverein Deutschland e.V., "www.sfv.de," 01 05 2018. [Online]. Available: http://www.sfv.de/artikel/eeg\_2017\_einspeiseverguetung\_fuer\_anlagen\_bis\_100\_kw.htm. [Zugriff am 25 07 2018].
- [11] C. Klein, K. Rozanski, M. Gailfuß, J. Kukuk und T. Beck, *ASUE BHKW-Kenndaten 2014/2015*, Berlin: energieDRUCK Verlag für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch, 2014.
- [12] M. Sieg und M. Fuhs, "PV-Magazine, https://www.pv-magazine.de," [Online]. Available: https://www.pv-magazine.de/marktuebersichten/grosse-batteriespeicher/. [Zugriff am 27 2 2017].
- [13] P. Icha und G. Kuhs, "Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den jahren 1990-2017," Umweltbundesamt, Berlin, 2018.
- [14] GeoBasis-DE/BKG, "maps.google.de," Alphabet Inc., 2018. [Online]. Available: -. [Zugriff am 25 07 2018].

#### Kontakt:

Yasin Incedag Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik Arcisstraße 21, 80333 München E-Mail: yasin.incedag@tum.de Tel.: 089 289 23938

Peter Tzscheutschler Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik Arcisstraße 21, 80333 München E-Mail: ptzscheu@tum.de Tel.: 089 289 28304