

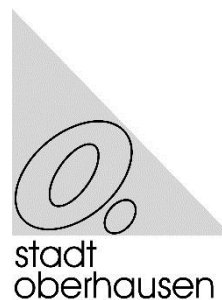
Simulation alternativer Energieversorgungsvarianten für das Schloss Oberhausen

Abschlussbericht

Dezember 2017



Auftraggeber



Auftragnehmer



Lehrstuhl
Energietechnik

Autoren

Universität Duisburg-Essen Lehrstuhl für Energietechnik (LET)

Prof. Dr. rer. nat. Angelika Heinzl
Dr.-Ing. Jürgen Roes
Dipl.-Phys. Ing. Othmar Verheyen
M.Sc. Nicolas Witte
M.Sc. Christian Thommessen

Duisburg, Dezember 2017

Inhaltsverzeichnis

1	MOTIVATION UND HINTERGRUND	2
2	DATENGRUNDLAGE UND SIMULATIONSPARAMETER.....	4
2.1	Bedarfsstrukturen	4
2.1.1	Wärmebedarf	4
2.1.2	Strombedarf	7
2.1.3	Kältebedarf	9
2.2	Eingangsparameter der Simulationen	11
2.2.1	Technische Eingangsparameter	11
2.2.2	Wirtschaftliche Eingangsparameter	12
2.3	Regulatorische Rahmenbedingungen.....	13
2.3.1	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz	13
2.3.2	Energiesteuergesetz	15
2.3.3	Stromsteuergesetz.....	15
2.3.4	Erneuerbare-Energien-Gesetz	15
2.4	Simulationsszenarien	15
2.4.1	Szenario 1: Kesselsanierung.....	16
2.4.2	Szenario 2: Verbrennungsmotorische BHKW	16
2.4.3	Szenario 3: Unterstützende Stromerzeugung durch Photovoltaik.....	18
2.4.4	Szenario 4: BHKW auf Basis erneuerbarer Energien	18
2.4.5	Szenario 5: BHKW mit AKM.....	19
3	ANALYSE UND BEWERTUNG DER SIMULATIONSERGEBNISSE.....	21
3.1	Auswertung der Betriebssimulation.....	21
3.1.1	Szenario 1: Kesselsanierung.....	21
3.1.2	Szenario 2: Verbrennungsmotorische BHKW	21
3.2	Wirtschaftliche Bewertung	23
3.3	Ökologische und energetische Bewertung.....	27
3.4	Sensitivitätsanalyse	28
3.5	Auswertung Szenario 3: Unterstützende Stromerzeugung durch Photovoltaik...	32
3.6	Auswertung Szenario 5: BHKW mit AKM	34
3.7	Vergleich und Bewertung der Ergebnisse.....	36
4	ZUSAMMENFASSUNG.....	39
5	VERZEICHNISSE	41
6	ANHANG	46

1 Motivation und Hintergrund

Nordrhein-Westfalen (NRW) ist das bevölkerungsreichste Bundesland Deutschlands. Der Ballungsraum Rhein-Ruhr in der Landesmitte ist einzigartig und stellt eine der größten Metropolregionen Europas dar. Auch aus ökonomischer Sicht ist die Region eines der wichtigsten Zentren weltweit. Das nordrhein-westfälische Bruttoinlandsprodukt (BIP) betrug im Jahr 2016 ca. 670 Milliarden Euro, was in etwa dem BIP der Türkei entspricht und im Vergleich der Bundesländer die höchste Wirtschaftsleistung¹ Deutschlands repräsentiert. Im Gegenzug werden in NRW aber auch mehr als ein Drittel aller deutschen Treibhausgase emittiert. Aufgrund dessen spielt das Bundesland eine entscheidende Rolle für die Erreichung der Klimaschutzziele, insbesondere weil derzeit Braun- und Steinkohle (noch) die dominierenden Energieträger sind. [1]

KWK-Technologien können grundsätzlich in vielen verschiedenen Bereichen zur Reduzierung von klimaschädlichem Kohlenstoffdioxid (CO₂) eingesetzt werden und sind eine hocheffiziente und umweltfreundliche Lösung beim Übergang von der auf fossilen Energieträgern beruhenden Energieerzeugung in die Energieerzeugung mittels erneuerbaren Energien. Darüber hinaus können sie in Kombination mit Speichern und Kältemaschinen nicht nur Strom- und Wärmebedarfe, sondern auch die Nachfrage nach Kälte flexibel abdecken (Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, KWKK).

Im Klimaschutzkonzept der Stadt Oberhausen aus dem Jahr 2012 wurden verschiedene Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emission und des Primärenergiebedarfes beschlossen. Vor diesem Hintergrund plant die Oberhausener Gebäudemanagement GmbH (OGM) die Umsetzung von Energiekonzepten zur Strom-, Wärme- und Kälteversorgung für verschiedene Objekte, die sie betreut. Ein Betreuungsobjekt ist die Oberhausener Schlossanlage, die heutzutage als Kunstmuseum („Ludwig Galerie“) für wechselnde Ausstellungen, Gedenkhalle für die Opfer des Nationalsozialismus (Dauerausstellung „Widerstand und Verfolgung 1933–1945 in Oberhausen“) sowie Tierpark mit Minigolfanlage und Kinderspielflächen („Kaisergarten“) genutzt wird. Das neu geplante KWKK-Konzept der OGM befasst sich konkret mit den Gebäuden der Schlossanlage.

Das im Jahr 1958 nach vollständiger Zerstörung wieder aufgebaute Schloss Oberhausen steht unter Denkmalschutz, was gewisse Herausforderungen in Bezug auf die Neuinstallation von Energieversorgungsanlagen mit sich bringt. Im laufenden Betrieb konnten durch die OGM verschiedene Ansatzpunkte zur Reduktion des Energiebedarfes identifiziert werden. So kann durch den Einsatz von hocheffizienten KWK-Anlagen möglicherweise auch in Kombination mit regenerativen Energieversorgungssystemen nicht nur der Primärenergiebedarf, sondern auch die jährliche CO₂-Emission stark reduziert werden. Insgesamt sollen verschiedene konventionelle und regenerative Strom- und Wärmeversorgungsvarianten und eine Kälteversorgung mittels Absorptionskältemaschine (AKM) auf einen sowohl ökonomisch als auch ökologisch effizienten Betrieb im Vergleich zur aktuellen Versorgungssituation bestehend aus

¹ NRW erreichte einen Anteil von rund 22 % am deutschen BIP.

Netzstrombezug, Wärmeerzeugung durch zwei Erdgaskessel und Kompressionskältemaschine (KKM) geprüft werden.

Das vorliegende Projekt umfasst die Untersuchung von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen), welche durch die gleichzeitige Strom- und Wärmeerzeugung einen hohen Brennstoffnutzungsgrad aufweisen. Zusätzlich ist die Stromerzeugung durch Photovoltaik-Anlagen zu betrachten. Der Lehrstuhl Energietechnik (LET) der Universität Duisburg-Essen ist seit vielen Jahren in der Brennstoffzellen- und Batterieforschung sowie in den Bereichen Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und Wärmenetzsimulation tätig. Es wurden diverse KWK-Projekte in der Industrie und im Gebäudebereich durchgeführt, wobei neben der Simulation des KWK-Anlagenbetriebs umfassende Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen u.a. mit (Batterie-) Speichern durchgeführt wurden. Für die folgenden Aufgaben steht eine komplexe, hochauflösend arbeitende Simulationssoftware zur Verfügung. Mit Hilfe dieser eigenen Software ist neben der detaillierten Simulation verschiedenster Erzeugungsanlagen ebenso eine umfassende Modellierung von Wärmespeichern möglich.

Aufbauend auf den gewonnenen Ergebnissen bezüglich des Einsatzes eines Blockheizkraftwerkes (BHKW) zur gleichzeitigen Strom- und Wärmeerzeugung in Kombination mit PV-Anlagen soll ebenfalls der potenzielle Einsatz einer Absorptionskältemaschine (AKM) anstelle der vorhandenen Kompressionskältemaschine geprüft werden. Hierzu sind AKM verschiedener Leistungen im Rahmen der lehrstuhleigenen Software zu modellieren. Die erzielten Ergebnisse werden abschließend in einer Entscheidungsmatrix unter Berücksichtigung der oben genannten Versorgungsvarianten für eine ökonomische und ökologische Bewertung zusammengefasst.

Für einen erfolgreichen Abschluss des Projekts mit dem skizzierten Ablauf ist die Bereitstellung diverser Daten und Informationen notwendig. Diese sind (möglichst für mehrere Jahre):

- Stromlastdaten bzw. Stromlastgänge,
- Gasbezugswerte bzw. Wärmelastgänge,
- Stromkosten des Betreibers (Abrechnungen) sowie
- Gaskosten des Betreibers (Abrechnungen).

2 Datengrundlage und Simulationsparameter

Für das Schloss Oberhausen sollen verschiedene Energieversorgungsvarianten im Rahmen dieses Projektes simuliert und auf einen wirtschaftlichen Betrieb hin bewertet werden. Neben der Versorgung mittels BHKW ist darüber hinaus der Ersatz der bestehenden Kesselanlage durch ein neues System zu bewerten, da die vorhandenen Kessel fast seit 30 Jahren in Betrieb sind und ersetzt werden sollen.

Im Folgenden werden zunächst Strom- und Wärmebedarf des Objektes basierend auf den vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Daten ermittelt und dargestellt. Anschließend werden die betrachteten Anlagen und die weiteren technischen und wirtschaftlichen Eingangsparameter der Simulationen sowie entsprechende regulatorische Rahmenbedingungen beschrieben.

2.1 Bedarfsstrukturen

Um die Energieversorgung des Schlosses Oberhausen mittels KWK-Anlage in Kombination mit den vorhandenen Erdgaskesseln zur Spitzenlastversorgung sowie mit einem Wärmespeicher simulieren zu können, ist eine umfangreiche Kenntnis bezüglich des aktuellen, jährlichen Energiebedarfes essentiell. Die Nutzung von stündlich aufgelösten Strom- und Wärmelastgängen stellt in diesem Fall eine hohe Genauigkeit der Simulationsergebnisse sicher. Die Stromleistungsmessung erfolgt in der Regel viertelstündlich und liegt den Kunden häufig vor. Anders stellt sich dies bei der Wärmeversorgung dar, welche durch eine hohe Abhängigkeit von individuellen Nutzerverhalten insbesondere bezüglich des Trinkwarmwasserbedarfes nur schwer zu pauschalisieren ist. Einen Ansatzpunkt stellen die jährlichen Gasabrechnungen dar, welche vom Versorger zur Verfügung gestellt werden. Hier kann durch die Nutzung von Referenzlastprofilen oder Standardlastgängen ein Wärmelastgang erzeugt werden, dessen Genauigkeit jedoch häufig nicht den Ansprüchen genügt. Für eine exakte Darstellung des Wärmebedarfes ist der Erdgasbezug durch Zähler zu messen. Im Folgenden wird die Verwendung der vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Daten zur Nutzung als Eingangsparameter in den Simulationen erläutert.

2.1.1 Wärmebedarf

Der Wärmeverbrauch des Objektes stellt für die Simulationen eine besonders wichtige Größe dar, da KWK-Anlagen in der Objektversorgung wärmegeführt betrieben werden. Diese Betriebsweise impliziert die Nutzung des BHKW nur dann, wenn die im KWK-Prozess erzeugte Wärme auch entweder direkt in dem Objekt genutzt oder im vorhandenen Wärmespeicher zwischengepuffert werden kann. In der Regel ist der Wärmebedarf bei Objekten ohne Prozesswärmenutzung nahezu linear von der Außentemperatur abhängig, wodurch sich leicht Zusammenhänge feststellen und auf weitere Betrachtungsjahre anwenden lassen. Für das Schloss Oberhausen lagen lediglich die Gasrechnungen der Jahre 2014 bis 2016 vor. Mit der

Messung des Gasbezuges wurde erst am 31.08.2017 begonnen. Nichtsdestotrotz konnte auf den stündlichen Gasbezug der Monate September bis November 2017 zurückgegriffen werden. Somit konnte der Gasbezug den in den Stunden auftretenden entsprechenden Temperaturen, wie in **Abbildung 1** dargestellt, zugeordnet werden.

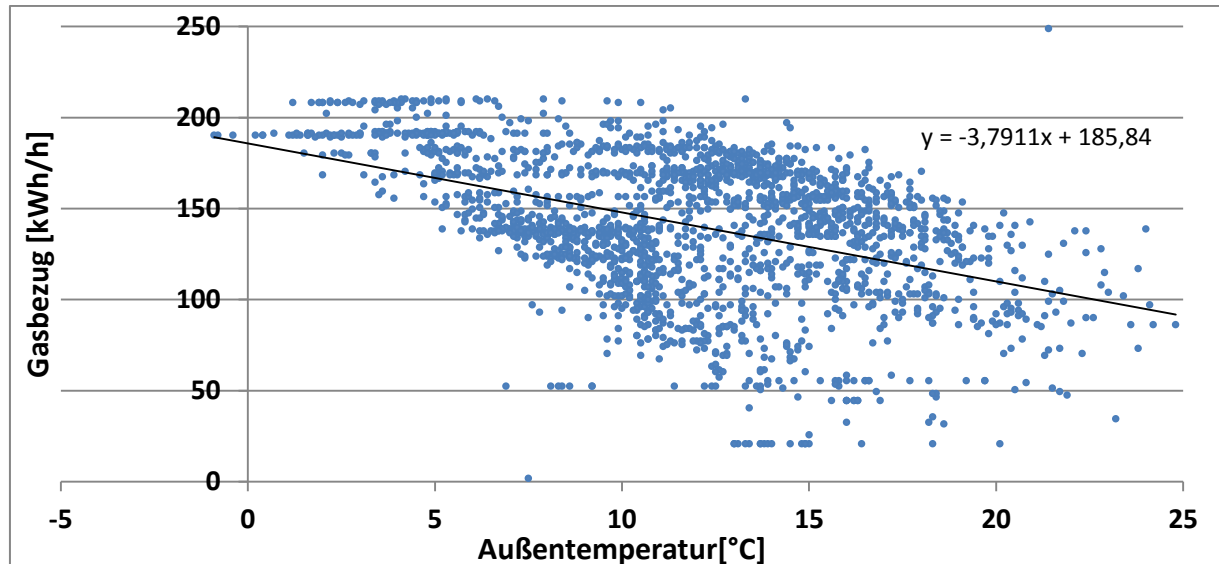


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Gasbezug und Außentemperatur (September - November 2017)

Es wird schnell deutlich, dass zwar eine gewisse Temperaturabhängigkeit vorliegt, diese jedoch nicht eindeutig ist. So treten bei gleicher Außentemperatur starke Schwankungen in den Gasbezugswerten auf. Genaue Messdaten können für alle Simulationen wesentlich genauere Ergebnisse sicherstellen, jedoch lagen diese nicht vor.

Um aus den vorliegenden Daten einen Lastgang zu erzeugen, soll eine lineare Regressionsgrade für die in **Abbildung 1** dargestellte Punktwolke verwendet werden. So kann für jede Außentemperatur ein entsprechender Gasbezug und unter Berücksichtigung des Kesselwirkungsgrades auch der Wärmebedarf ermittelt werden. Mit Hilfe der Funktionsvorschrift der Regressionsgrade und unter Berücksichtigung der Außentemperaturen für den Standort Oberhausen konnte für die vergangenen Jahre der Gasbezug ermittelt und mit den vorliegenden Abrechnungen des Versorgers verglichen werden. Um vom Gasbezug auf den Wärmebedarf schließen zu können, müssen der Kesselwirkungsgrad sowie die Umrechnung vom in Rechnung gestellten Brennwert zum genutzten Heizwert berücksichtigt werden. Der Wirkungsgrad der vorhandenen Kessel liegt nach Angaben des Auftraggebers bei 87 %. So konnte der charakteristische Verlauf des Wärmebedarfes in Abhängigkeit der Außentemperatur, wie in **Abbildung 2** dargestellt, als Eingangsgröße für die Simulationen verwendet werden. Ersichtlich ist, dass die (thermische) Grundlast im Bereich um 60 kW liegt, während die Spitzenlast 166 kW beträgt.

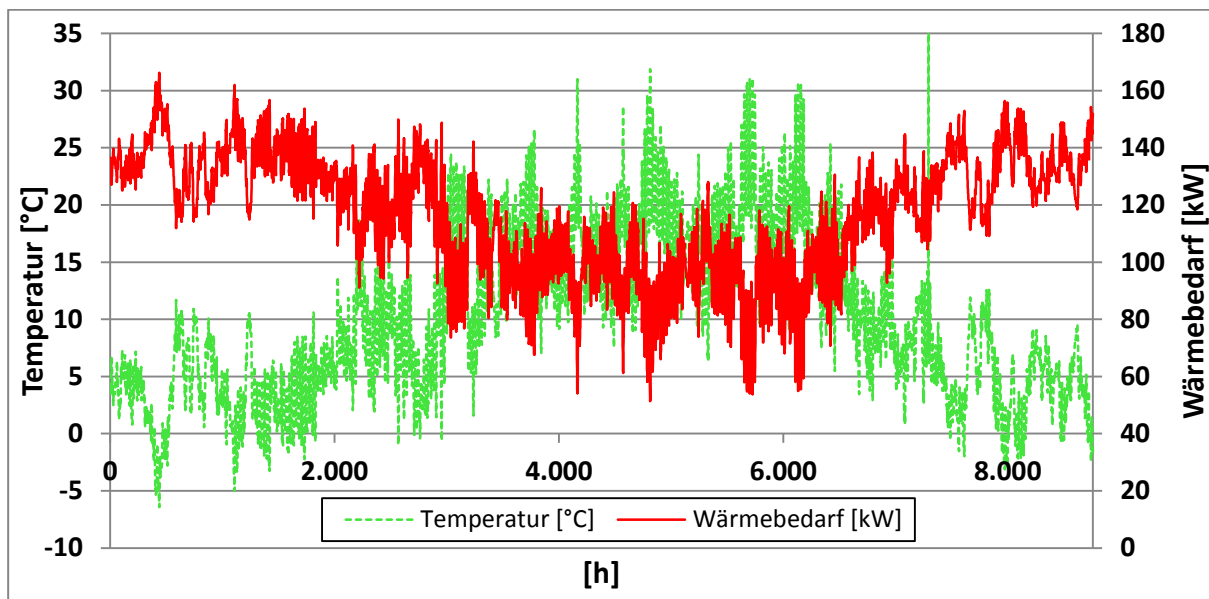


Abbildung 2: Gemessener Außentemperaturverlauf und ermittelter Wärmelastgang (2016)

Für die folgenden Simulationen wurde der Wärmebedarf des Referenzjahres 2016 als objektcharakteristischer Wärmebedarf verwendet. **Abbildung 3** zeigt den monatlichen Wärmebedarf sowie die in den einzelnen Monaten auftretenden Spitzenlasten für das Jahr 2016.

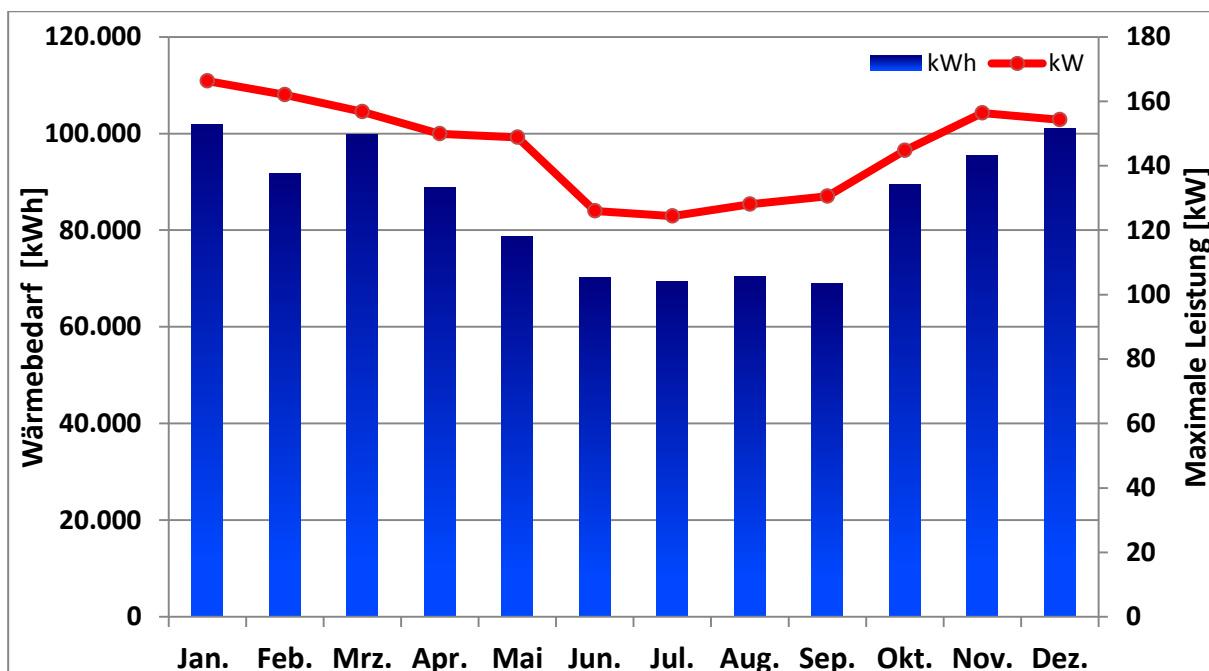


Abbildung 3: Übersicht monatlicher Gesamtwärmebedarf und monatliche Spitzenlast (2016)

Hier lässt sich deutlich der charakteristische Verlauf mit hohen Bedarfen in den Wintermonaten sowie einem geringeren Wärmebedarf bedingt durch höhere Außentemperaturen in den Sommermonaten erkennen. Die Jahresspitzenlast in Höhe von $166 \text{ kW}_{\text{th}}$, welche durch den Spitzenlastkessel (SLK) bedient werden muss, tritt im Januar auf. Zur Auslegung von (wärmegeführten) BHKW ist die geordnete Jahresdauerlinie des Wärmebedarfes in **Abbildung 4** zu betrachten. Sie gibt die Häufigkeit verschiedener Lasten über den Jahresverlauf an.

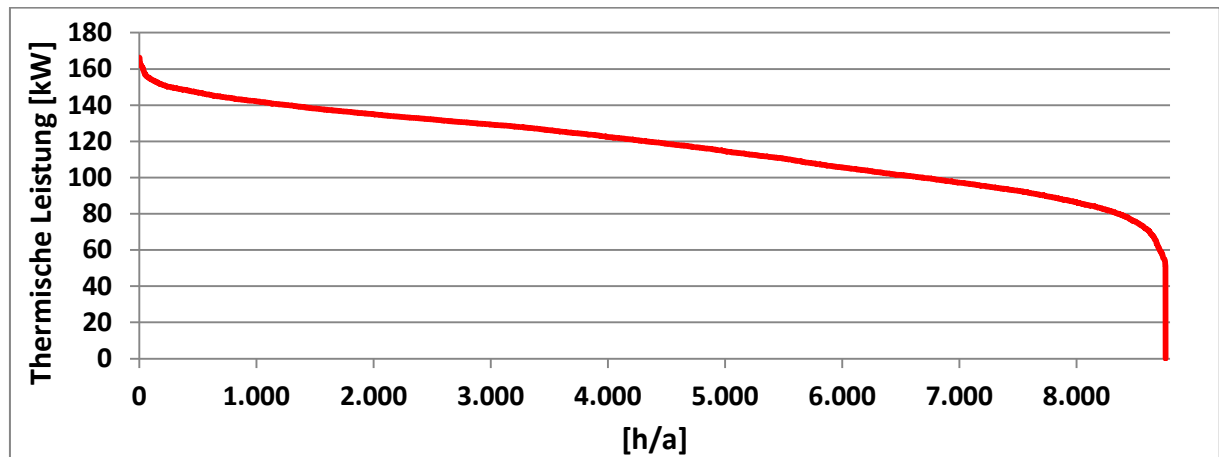


Abbildung 4: Geordnete Jahresdauerlinie des Wärmebedarfes (2016)

Anhand des flachen Verlaufes der Kurve wird bereits deutlich, dass auch BHKW mit einer hohen thermischen Leistung noch eine hohe Anzahl von Vollbenutzungsstunden durch den Teillastbetrieb und den Einsatz von Wärmespeichern zur Zwischenpufferung der Wärme aus dem KWK-Prozess erreichen können. Objekte mit solch einem Wärmebedarf eignen sich besonders für den Einsatz von KWK-Anlagen, da deren Wirtschaftlichkeit im Wesentlichen von der möglichen Laufzeit und dem Eigennutzungsanteil des erzeugten Stroms abhängen. In dem betrachteten Objekt kann beispielsweise ein BHKW mit einer thermischen Leistung von 100 kW noch knapp 6.000 Stunden pro Jahr in Volllast betrieben werden. Unter Berücksichtigung des Teillastverhaltens wäre vermutlich ein ganzjähriger Betrieb möglich. Eine Begrenzung würde in diesem Fall nur durch nötige Wartungsarbeiten, die mindestens einmal pro Jahr durchgeführt werden, anfallen.

2.1.2 Strombedarf

Zur Darstellung des jährlichen Strombedarfes konnte auf eine umfangreiche Datengrundlage zurückgegriffen werden. Neben den viertelstündlich aufgelösten Lastgängen der Jahre 2013 bis 2016 lagen darüber hinaus Messungen des Strombezuges für das erste Halbjahr des Jahres 2017 vor. Bei der Betrachtung der Jahressummen wird schnell deutlich, dass der Strombedarf in den vergangenen Jahren kontinuierlich gestiegen ist (vgl. **Abbildung 5**).

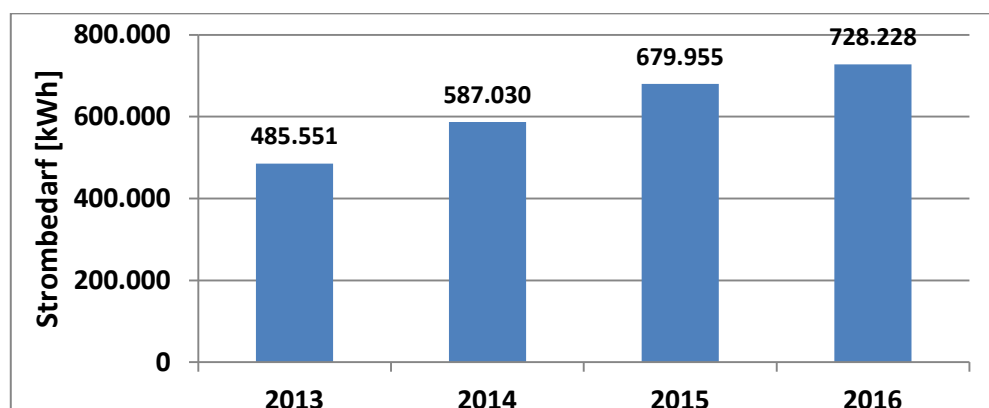


Abbildung 5: Gemessener Jahresstromverbrauch

Ansatzweise erklärt werden kann diese Tendenz durch die komplexe Einstellung des Raumklimas in den Ausstellungsräumen der Ludwigsgalerie. Hier ist ganzjährig eine Temperatur von 20 °C bei einer Luftfeuchtigkeit von 50 % zu gewährleisten. Die Einstellung dieser Werte wird durch die Nutzung der Belüftungsanlagen, der Raumheizung und der Kältebereitstellung erreicht. Probleme bei der Steuerung können zu einem erhöhten Strombedarf führen, wobei die Gründe für einen Anstieg des Strombezuges von 2013 bis 2017 um knapp 60 % noch in weiteren technischen Veränderungen an dem Objekt gesucht werden müssen². Begründet in dem hohen Anstieg des Strombezuges und der vollständig vorliegenden Daten wurde für die folgenden Simulationen das Referenzjahr 2016 gewählt, dessen Lastgang in **Abbildung 6** dargestellt ist. Im Mittel betrug die elektrische Leistung im Jahr 2016 82,8 kW bei einem Maximum von 147,3 kW.

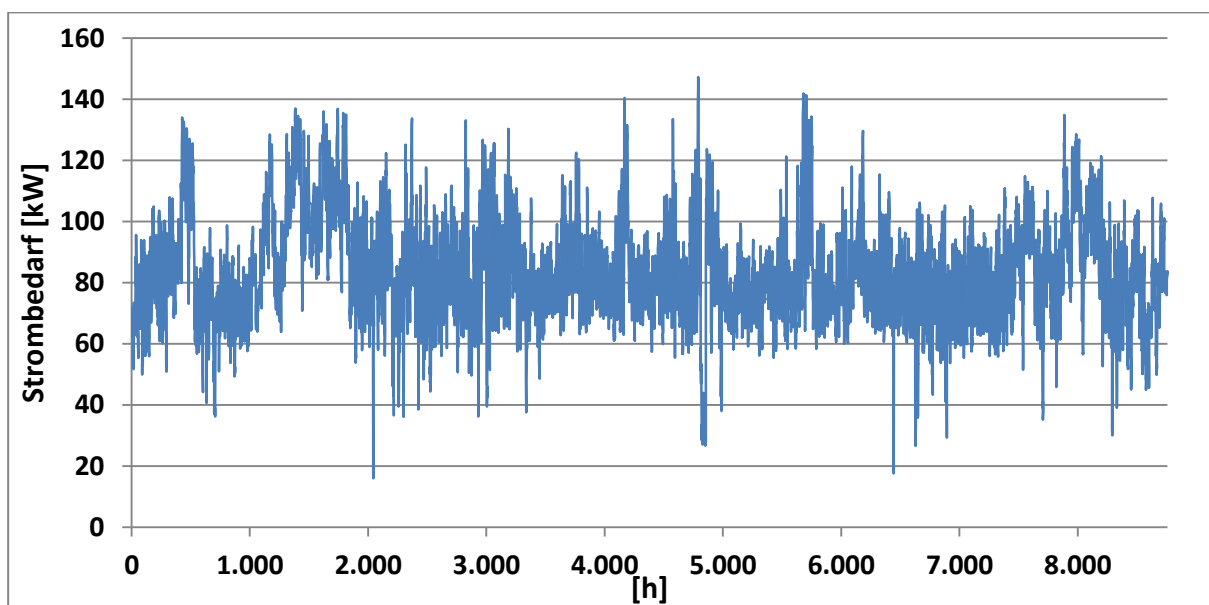


Abbildung 6: Gemessener Stromlastgang (2016)

Anhand von **Abbildung 6** ist zudem deutlich zu sehen, dass eine jährliche Grundlast von ca. 60 kW nur selten unterschritten wird. Weitere Abhängigkeiten oder Auffälligkeiten können für das Objekt Schloss Oberhausen nicht identifiziert werden. **Abbildung 7** zeigt die Monatssummen des Strombezuges sowie die entsprechende maximale Leistung. Auch hier müssen keine untypischen Auffälligkeiten berücksichtigt werden.

² der Bezug für das erste Halbjahr 2017 lag bereits bei 384.050 kWh

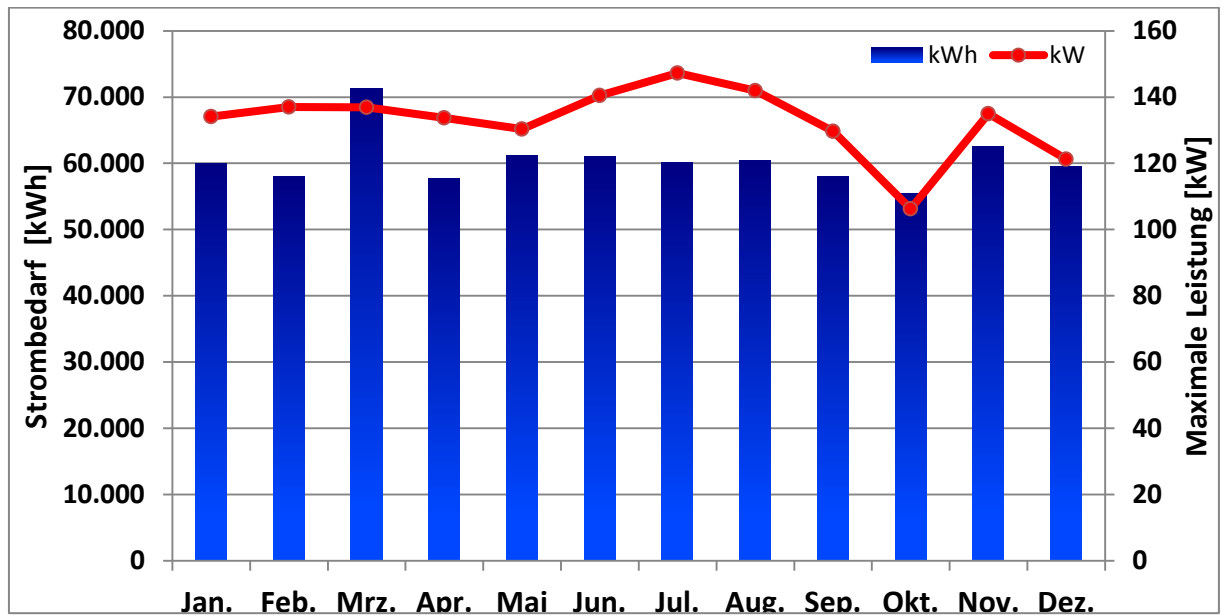


Abbildung 7: Übersicht monatlicher Gesamtstrombedarf und monatliche Spitzenlast (2016)

Durch die durchgehend hohe Stromgrundlast eignet sich das Schloss Oberhausen besonders gut für den Einsatz eines BHKW, da somit ein hoher Anteil des erzeugten Stromes im Objekt direkt genutzt werden kann und der Reststrombezug verringert wird.

2.1.3 Kältebedarf

Das Schloss Oberhausen hat einen ausgeprägten Bedarf an Kälte, da die im vorherigen Abschnitt skizzierten Anforderungen an das Raumklima der Ausstellungsräume ein häufiges Kühlen der Luft erfordern. Im Bestand wird dazu eine KKM des Herstellers DAIKIN vom Typ ERAD-E-SS betrieben. Sie besitzt eine Kälteleistung von 251 kW bei einer Energy Efficiency Ratio (EER) in Höhe von 3,26 im Vollastbetriebspunkt. Leider konnten keine (Mess-) Daten für den Kältebedarf bereitgestellt werden. Da auch für den Strombedarf der KKM keine Daten zur Verfügung gestellt wurden, aus denen der Kältebedarf abgeleitet werden kann, werden Annahmen über den Betrieb der KKM getroffen, um einen exemplarischen Kältebedarf herzuleiten. Dieses Vorgehen beruht daher auf konservativen Schätzungen und dementsprechend sind die Ergebnisse für alle Szenarioberechnungen mit Kältebedarf in Kapitel 3.6 zu hinterfragen und zu prüfen.

Zur Herleitung des Kältebedarfs bzw. der KKM-Betriebsweise werden die relative Luftfeuchtigkeit³ und die Außentemperatur herangezogen, die in **Abbildung 8** dargestellt sind. In Abhängigkeit dieser Parameter lässt sich z.B. anhand eines Mollier-h-x-Diagramms für feuchte Luft in jeder Stunde in einem Jahr identifizieren, ob die KKM laufen muss. Da die derzeit betriebene KKM eine stufenlose Leistungsregelung hat, deren detaillierte Betriebsweise un-

³ Die Daten für die relative Luftfeuchtigkeit entstammen einer Langzeitmessung des DWD am Standort Düsseldorf. Für das Jahr 2016 konnten keine Daten für den Standort Oberhausen unentgeltlich bezogen werden. Wegen der räumlichen Nähe eignen sich die vorliegenden Daten dennoch für die ohnehin stark konservativen Abschätzungen hinsichtlich des KKM-Betriebs.

bekannt ist, wird die Annahme⁴ getroffen, dass sie in den betreffenden Stunden im Jahr durchschnittlich im Teillastbereich bei 50 % betrieben wird. Unter Berücksichtigung des gesamten Strombedarfes⁵ sowie unter der Kenntnis, dass die KKM bei einer Temperatur über 20 °C wegen der Anforderungen an das Raumklima laufen muss, werden für die KKM 8.015 Betriebsstunden bei der angenommenen 50 % Teillast ermittelt. Aus der Verrechnung der Strombedarfe ergibt sich, dass die KKM etwa 42.5 % des gesamten Objekt-Strombedarfes ausmacht. Für das Schloss Oberhausen ist dies ein durchaus realistischer Wert.

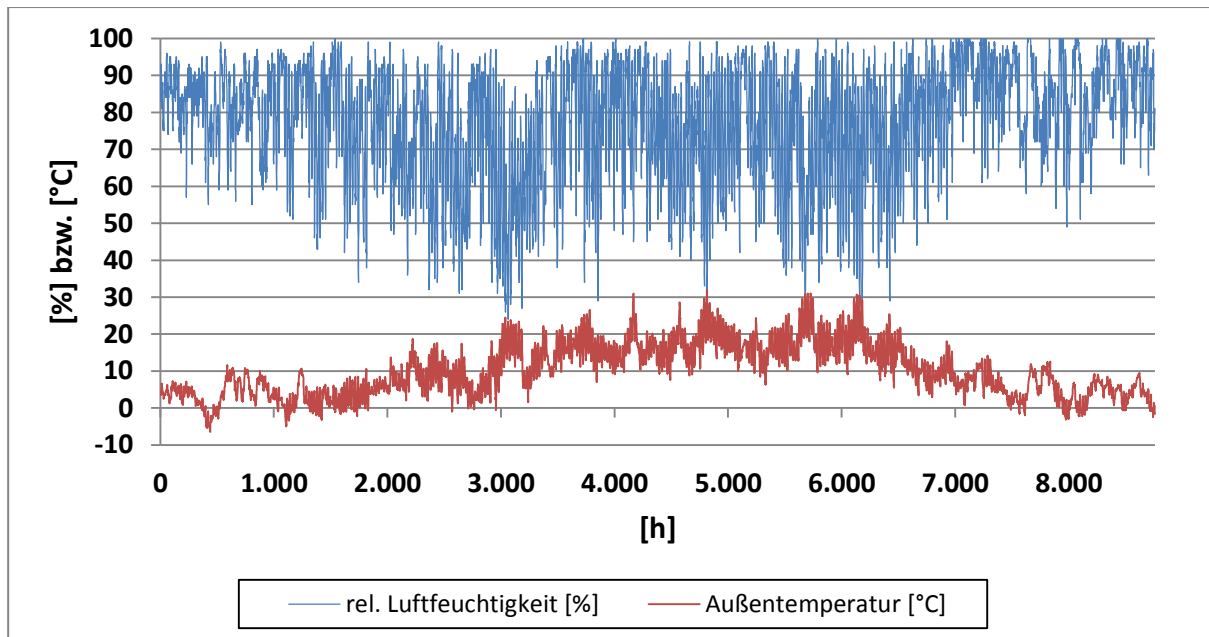


Abbildung 8: Relative Luftfeuchtigkeit und Außentemperatur (2016)

Aus der (so abgeschätzten) Betriebsweise der KKM lässt sich der Kältebedarf des Schlosses ableiten. Aufgrund der Datenlage und der vielen Annahmen kann nur ein synthetischer Lastgang für die Kälte angegeben werden. In **Abbildung 9** sind der synthetische Lastgang sowie die daraus resultierende Jahresdauerlinie für den Kältebedarf dargestellt. Insbesondere die Jahresdauerlinie ist nur als qualitative Darstellung zu verstehen, z.B. weil die Spitzenlast bzw. die maximale Kälteleistung der vorhandenen KKM bekanntlich größer ist. Der insgesamt abzudeckende Kältebedarf beträgt 1.006 MWh und ist auf die Annahmen des KKM-Betriebs zurückzuführen. Eine Messung des Strombezugs der KKM lässt durch Verrechnung mit der Leistungszahl auf den genauen Kältebedarf schließen. Für Folgeprojekte wird daher an dieser Stelle bereits festgehalten, dass solche Messungen lohnenswert sind, insbesondere weil die Messergebnisse die Auslegung diverser Anlagen maßgeblich bedingen.

⁴ Der Teillastbereich wurde ausgewählt, da die resultierenden Energiemengen für den Strombedarf und der (den Kältebedarf abdeckenden) Kälteerzeugung der KKM als repräsentativ eingestuft wurden. Dazu hielt der Auftragnehmer Rücksprache mit dem Auftraggeber.

⁵ Der mittels EER ermittelte Strombedarf der KKM ist stets kleiner als der gesamte Strombedarf des Schlosses.

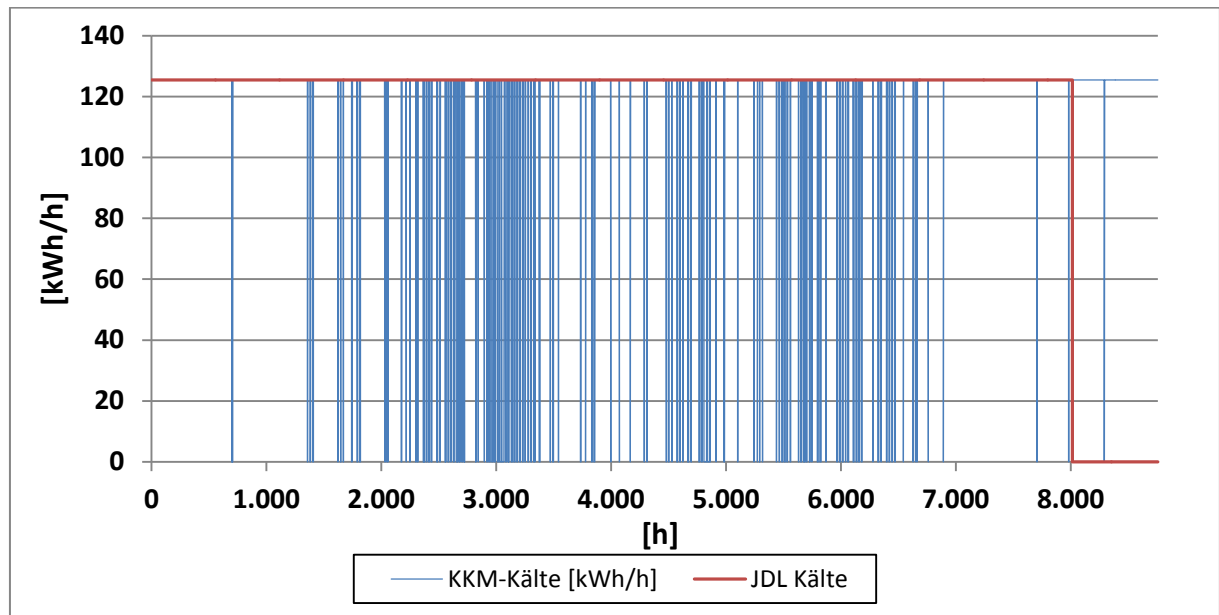


Abbildung 9: Hergeleiteter Kältelastgang und zugehörige Jahresdauerlinie

2.2 Eingangsparameter der Simulationen

Zur Nachvollziehbarkeit der ermittelten ökonomischen und ökologischen Ergebnisse ist die Darstellung diverser Eingangsparameter für die Simulation nötig. Hierzu soll im Folgenden zwischen technischen und wirtschaftlichen Daten unterschieden werden.

2.2.1 Technische Eingangsparameter

Neben den technischen BHKW-Daten wurden des Weiteren der zusätzliche Spitzenlastkessel sowie der Wärmespeicher berücksichtigt. Da die vorhandene Kesselanlage seit 29 Jahren in Betrieb ist, soll diese im Laufe der nächsten Jahre erneuert werden. Aus diesem Grund ergibt sich bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der BHKW sowohl für den Referenz- als auch für den **Spitzenlastkessel** derselbe Wirkungsgrad in Höhe von 90 %. Neben der Simulation verschiedener BHKW soll zudem nur die Sanierung der Kesselanlage durch neue Kessel untersucht werden. Hierzu stellt die aktuelle Situation (Kesselwirkungsgrad in Höhe von 87 %) die Referenz dar.

Bezüglich der Wärmespeicherauslegung können verschiedene Strategien verfolgt werden. Da in der Objektversorgung mittels steuerbarer Erzeugungsanlagen der **Wärmespeicher** lediglich zur Zwischenpufferung und kurzzeitlichen Entkopplung von Wärmebedarf und Wärmeerzeugung in den Sommermonaten genutzt wird, soll für alle betrachteten Motoren der Wärmespeicher die durch das BHKW erzeugte Wärme für einen Zeitraum von maximal vier Stunden puffern können. Des Weiteren wird für den thermischen Speicher ein Verlust in Höhe von 0,05 % der gespeicherten Wärme pro Stunde angenommen. Wie bereits erwähnt, wird das BHKW wärmegeführt betrieben, was eine überschüssige Wärmeproduktion verhindert. Der im KWK-Prozess erzeugte Strom wird möglichst im Objekt genutzt. Sollte die vollständige Nutzung durch Überschussproduktion bedingt durch hohen Wärmebedarf in Kombinati-

on mit geringem Strombedarf nicht möglich sein, so wird der Überschussstrom in das Netz der allgemeinen Versorgung gespeist. Ein Stromspeicher wird in den Simulationen nicht berücksichtigt.

Zur ökologischen Bewertung sind des Weiteren die gewählten CO₂-Emissionsfaktoren bezüglich des Brennstoffes und des Strommixes zu nennen. Laut Angaben des EVU beträgt der Emissionsfaktor für Erdgas (Endenergieeinsatz in Heizungsanlagen) 228 g/kWh (H_i). Da die energetischen Vorketten für Förderung und Transport mitbilanziert werden, ist dieser Faktor gut 10% höher als der z.B. vom Umweltbundesamt oder auch der im Rahmen des TEHG verwendete CO₂-Faktor für das reine Brennstoff-CO₂ von 202 g/kWh (H_i)⁶. Wenn also die Bilanz eines Jahres erstellt werden soll, so ist der gesamte Gasbezug aus der Jahresabrechnung durch das Verhältnis H_s zu H_i von 1,108 zu dividieren, um die Energie auf den Heizwert (H_i) umzurechnen. Für den Strommix im Versorgungsgebiet der Energieversorgung Oberhausen (EVO) GmbH, welche aktuell der Gas- und Stromversorger des Schlosses Oberhausen darstellt, wird seitens der Auftraggeber basierend auf Werten der EVO ein CO₂-Emissionsfaktor in Höhe von lediglich 245 g/kWh_{el} angegeben. Dieser geringe Wert ist insbesondere auf den Betrieb der Müllverbrennungsanlage⁷ GMVA-Oberhausen, der Einbindung von industrieller Abwärme der OXEA Group (Werk Ruhrchemie) und den Betrieb eines Biomasse-Heizkraftwerkes zurückzuführen. Da die Einspeisung von Strom aus kleinen KWK-Anlagen jedoch weder anderen KWK-Strom noch Strom aus regenerativen Erzeugungsanlagen verdrängt, kann hier auch mit dem NRW-Mix in Höhe von 820,2 g/kWh_{el} bzw. dem deutschlandweiten Strommix in Höhe von 471 g/kWh_{el} gerechnet werden. Hierzu werden in Kapitel 3.3 die entsprechenden Ergebnisse dargestellt und verglichen. Zur Darstellung des Primärenergieverbrauches der einzelnen Varianten wird mit einem deutschlandweiten Kraftwerkswirkungsgrades in Höhe von 41,67 % gerechnet. [3], [4], [5]

2.2.2 Wirtschaftliche Eingangsparameter

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen BHKW ist eine Vielzahl von weiteren, monetären Eingangsparametern zu berücksichtigen. Die Investitionskosten für die KWK-Anlagen ergeben sich aus den ASUE-BHKW-Kenndaten 2014/2015, welche Ausgleichskurven zur Bestimmung der Modulkosten in Abhängigkeit der elektrischen Leistung für verbrennungsmotorische BHKW zur Verfügung stellen. Des Weiteren werden hier Zusatzkosten für Transport bis Abnahme sowie für die Einbindung in Abhängigkeit der zuvor ermittelten Modulkosten angegeben. Neben der einmaligen Investition in die Anlagen selbst ist die Wartung der Anlagen ein weiterer Kostenpunkt. In Abhängigkeit der Leistungsgröße können auch hier Wartungskosten aus [6] genutzt werden. Zudem fallen in allen Szenarien weitere Investitionskosten für einen Wärmespeicher an. Diese können mit Hilfe von [7] ermittelt werden. Finanzhilfen aus öffentlichen Förderungen werden automatisch in den Berechnungen berücksichtigt

⁶ E-Mail vom 27.12.2017 von der Abteilung Marketing und Vertrieb der Energieversorgung Oberhausen AG an den Auftraggeber.

⁷ Bei der Stromerzeugung durch die Verbrennung von Müll wird kein Emissionsfaktor angesetzt. Der Strommix der EVO ist daher gegenüber anderen Strommixen (z.B. NRW-Strommix) verhältnismäßig gut. Der zugrundeliegende Ansatz wird jedoch regelmäßig öffentlich diskutiert. Vgl. dazu z.B. [2].

(siehe unten). Die Investition in die neue Kesselanlage wird neben den Kosten für den Kessel selbst, welche sich nach [5] in Abhängigkeit der thermischen Leistung ergeben, zusätzlich mit 5.000 € für die Einbindung beaufschlagt.

In der Regel kann solch eine Investition nicht durch eine (vollständige) Eigenfinanzierung geleistet werden. Aus diesem Grund wird in den Simulationen die vollständige Finanzierung anhand eines Annuitätendarlehens bei einem Zinssatz in Höhe von 3,5 % und einem Kreditzeitraum in Höhe von zehn Jahren vorausgesetzt. Der Vorteil des Annuitätendarlehens ist eine erhöhte Planungssicherheit, da die jährlichen Zahlungen (Annuität) bestehend aus Zinsen und Tilgung über den gesamten Zeitraum gleich bleiben. Es verschiebt sich lediglich das Verhältnis von Zinsen und Tilgung.

Den größten Einfluss auf den wirtschaftlichen Betrieb eines BHKW hat die Differenz von Strom- zu Gaspreis. Ist der Strom bedingt durch gut ausgehandelte Verträge sowie hohe Abnahmemengen günstig zu beziehen, so verschlechtert dies den wirtschaftlichen Betrieb von KWK-Anlagen, da der Vorteil in der Substitution des Strombezuges durch (günstigere) Eigenenerzeugung liegt. Ein hoher Gasbezugspreis wirkt sich ebenfalls schlecht auf den wirtschaftlichen Betrieb solcher Anlagen aus. In der Regel ist jedoch der Spread zwischen Erdgaspreis und dem Preis für den Strombezug besonders in der Objektversorgung sehr hoch und für den wirtschaftlichen Betrieb von BHKW besonders wichtig. Gleiches gilt für das betrachtete Objekt. Der Bezugspreis für Erdgas liegt bei 5,59 ct/kWh brutto bezogen auf den Brennwert. Hier muss wieder eine Umrechnung erfolgen, um den Erdgaspreis auf den Heizwert beziehen zu können. Es ergibt sich somit ein Erdgaspreis in Höhe von 6,149 ct/kWh bei einem Strombezugspreis von 18,32 ct/kWh brutto. An dieser Stelle sei anzumerken, dass der Strompreis sehr gering ist, was Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der BHKW haben könnte. Im Rahmen der Sensitivitätsanalysen in Kapitel 3.4 sind diese Eingangsparameter zu variieren. Bei allen betrachteten Kosten und Preisen handelt es sich um Brutto-Werte.

2.3 Regulatorische Rahmenbedingungen

Die zuvor beschriebenen Eingangswerte und Simulationsparameter können in der Realität je nach Projekt stark variieren, was im Wesentlichen vom Verhandlungsgeschick der Betreiber abhängig ist. Zusätzlich sind bei KWK-Anlagen diverse regulatorische Rahmenbedingungen zu berücksichtigen, welche weitere fixe Vorgaben geben. Hierzu zählen

- das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG),
- das Energiesteuergesetz (EnergieStG),
- das Stromsteuergesetz (StromStG) sowie
- das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG).

2.3.1 Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz

Das “Gesetz zur Erhaltung, Modernisierung und Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung“ (KWKG) regelt die Förderung von KWK-Anlagen sowie die Bezuschussung von notwendigen weiteren Anlagen wie Wärme- und Kältespeicher sowie Wärme- und Kältenetze. Insbe-

sondere die Förderung in Abhängigkeit des in KWK-Anlagen erzeugten Stroms ist für die Wirtschaftlichkeit vieler Projekte essentiell. So werden sowohl die Einspeisung des KWK-Stroms in das Netz der allgemeinen Versorgung als auch die Eigenerzeugung für gewisse Leistungsklassen gefördert. Eine Übersicht ist in **Tabelle 1** zu finden, welche auf § 7 KWKG zurückzuführen ist.

Einspeisung	$\leq 50 \text{ kW}_{el}$	$> 50-100 \text{ kW}_{el}$	$> 100-250 \text{ kW}_{el}$	$> 250-1.000 \text{ kW}_{el}$
bis 1 MW_{el}	8,0 ct/kWh	6,0 ct/kWh	5,0 ct/kWh	4,4 ct/kWh
Eigennutzung	$\leq 50 \text{ kW}_{el}$	$> 50-100 \text{ kW}_{el}$	$> 100-250 \text{ kW}_{el}$	$> 250-1.000 \text{ kW}_{el}$
bis 100 kW_{el}	4,0 ct/kWh	3,0 ct/kWh	-	-
Dauer	60.000 Vbh	30.000 Vbh		

Tabelle 1: Förderung für KWK-Strom nach dem KWKG

BHKW, deren elektrische Leistung 1 MW überschreiten, müssen an der Ausschreibung zur KWK-Förderung teilnehmen. Bei der Betrachtung der Fördersätze wird schnell deutlich, dass die Einspeisevergütungen deutlich höher sind, als die Förderung des KWK-Stroms für die Eigenversorgung. Des Weiteren wird die Eigenversorgung nur für Anlagen mit einer elektrischen Leistung von bis zu einschließlich 100 kW gefördert. Da es für das betrachtete Objekt das Ziel ist, den Eigenstromanteil bei einem wärmegeführten Betrieb so hoch wie möglich zu halten, werden bis auf eine Ausnahme nur Aggregate mit einer elektrischen Leistung von maximal 100 kW betrachtet. Weitere Unterschiede liegen in der Förderdauer. Anlagen mit einer elektrischen Leistung von bis zu einschließlich 50 kW werden über einen Zeitraum von 60.000 Vollbenutzungsstunden gefördert. Wird solch eine Anlage beispielsweise mit 5.000 Vollbenutzungsstunden pro Jahr betrieben, so ergibt sich eine Förderdauer in Höhe von zwölf Jahren. Neben der Förderung wird des Weiteren die Aufnahme des KWK-Stroms in das Netz der öffentlichen Versorgung im KWKG geregelt. Für Anlagen mit einer elektrischen Leistung von bis zu einschließlich 100 kW muss der eingespeiste Strom nach § 4 Abs. 2-3 KWKG vom Verteilnetzbetreiber gegen ein gewisses Entgelt aufgenommen werden. Kommt mit dem Verteilnetzbetreiber keine Einigung bezüglich des Preises zu Stande, so gilt der sogenannte "Übliche Preis". Der übliche Preis entspricht dem Durchschnittsbörsenstrompreis aus dem vorangegangenen Quartal. Für die folgenden Simulationen wird der übliche Preis in Höhe von 3,272 ct/kWh entsprechend des Preises aus dem dritten Quartal 2017 angesetzt. Zudem ist ein Entgelt für die vermiedene Netznutzung an den Anlagenbetreiber zu zahlen, da durch die verbrauchsnahe Stromerzeugung weitere übergeordnete Netze entlastet werden können. In den Simulationen wird ein Entgelt in Höhe von 0,7 ct/kWh angenommen. Neben der KWK-anlagenspezifischen Förderung wird der Bau von Wärmespeichern nach § 23 KWKG mit 250 €/m³ Wasseräquivalent bezuschusst, solange das Gesamtvolumen 50 m³ nicht überschreitet. Ist dies der Fall, so ist die Förderung auf maximal 30 % der Gesamtinvestitionskosten bzw. 10 Mio. € je Projekt beschränkt. [5], [8]

2.3.2 Energiesteuergesetz

Zusätzlich zu den Förderungen nach dem KWKG ist eine Erstattung der gezahlten Energiesteuer auf Erdgas für Betreiber von KWK-Anlagen unter gewissen Auflagen möglich. So kann nach § 53a EnergieStG die vollständige Erdgassteuer in Höhe von bis zu 0,55 ct/kWh_{Brennstoff} für das im KWK-Prozess verwendete Erdgas erstattet werden. Voraussetzung dafür ist, dass die KWK-Anlage hocheffizient ist, einen Monats- oder Jahresnutzungsgrad von mindestens 70 % erreicht und noch nicht vollständig abgeschrieben ist. Anlagen weisen einen hocheffizienten Betrieb auf, wenn eine von der elektrischen Leistung abhängige Primärenergieeinsparung erreicht wird. Wie auch ein Jahresnutzungsgrad in Höhe von 70 % wird ebenfalls das Hocheffizienzkriterium von allen betrachteten Anlagen erfüllt. [9]

2.3.3 Stromsteuergesetz

Einen wesentlichen Kostentreiber kann die Zahlung der Stromsteuer in Höhe von 2,05 ct/kWh für den erzeugten Strom darstellen und die Wirtschaftlichkeit potenzieller Projekt deutlich schmälern. Pauschal von dieser Stromsteuer ist nach § 9 Abs. 1 Satz 3 StromStG Strom befreit, welcher in Anlagen mit einer elektrischen Leistung von bis zu zwei Megawatt erzeugt wird. Aus diesem Grund muss für das vorliegende Projekt die Stromsteuer nicht weiter betrachtet werden. [10]

2.3.4 Erneuerbare-Energien-Gesetz

Das Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (EEG) soll dazu beitragen, die Klimaschutzziele der Bundesregierung Deutschlands zu erreichen, indem die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien gesteigert wird. Zur Finanzierung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wird von allen Stromkunden die EEG-Umlage im Rahmen des Strombezuges erhoben. Bis zum Jahr 2014 war der Strom aus KWK-Anlagen, welcher zur Eigenversorgung genutzt wird, von dieser Umlage nicht betroffen. Im Rahmen mehrerer Novellierungen des EEG ist seit dem Jahr 2017 nach § 61b EEG auf den eigenverbrauchten KWK-Strom eine reduzierte EEG-Umlage in Höhe von 40 % zu zahlen.

Da sich die europäische Kommission zum Ende des Jahres 2017 weigert, eine entsprechende auslaufende beihilferechtliche Genehmigung zu verlängern, ist die Zahlung der vollständigen EEG-Umlage ab dem 01.01.2018 möglich. Die Auswirkungen auf die folgenden Simulationen werden im Rahmen der Sensitivitätsanalyse in Kapitel 3.4 näher betrachtet. Die EEG-Umlage für das Jahr 2018 wird von den Übertragungsnetzbetreibern auf 6,792 ct/kWh beziffert. [11]

2.4 Simulationsszenarien

Eine CO₂-arme und ressourcensparende Energieversorgung des Schlosses Oberhausen kann mit Hilfe verschiedener Energieerzeugungstechnologien realisiert werden. Hierbei handelt es sich neben der Betrachtung einer erdgasbetriebenen BHKW-Lösung des Weiteren um die Möglichkeit der Kesselsanierung. Zudem können weitere Reduktionen der CO₂-Emissionen durch die Einbindung erneuerbarer Energien erreicht werden. Im Folgenden sollen deshalb

vier resultierende Szenarien und die entsprechenden Eingangsparameter für die Simulationen beschrieben werden.

2.4.1 Szenario 1: Kesselsanierung

Die Kesselanlage, welche aktuell den Wärmebedarf deckt, wurde im Jahr 1988 installiert und ist somit seit knapp 30 Jahren in Betrieb. Aus diesem Grund ist eine Sanierung der Kesselanlage geplant und stellt das erste Szenario in den folgenden Simulationen dar. Der Strombezug erfolgt in diesem Fall weiterhin aus dem Netz der allgemeinen Versorgung. Die aktuelle Kesselanlage weist einen Wirkungsgrad von ca. 87 % auf. Im Rahmen der Sanierung soll eine Wirkungsgradsteigerung erreicht werden. Als neuer Wirkungsgrad wird folglich für die Simulationen ein Wert in Höhe von 90 % angenommen. Dieser Wert eignet sich für Heizkessel, die nicht als Brennwertanlage betrieben werden können und wird häufig in dieser Größenordnung angesetzt. Die Kosten für Erdgaskessel können aus [5] entnommen werden und richten sich nach der thermischen Leistung der Anlage. Um die Spitzenlast des Objektes bedienen zu können, wird für die neue Kesselanlage eine thermische Leistung von 170 kW angenommen, woraus sich Investitionskosten für das Aggregat in Höhe von 12.462 € ergeben. Des Weiteren wird zur Einbindung der neuen Kesselanlage in den Heizkreislauf des Objektes ein Betrag von 5.000 € angenommen. Da es sich hierbei um Netto-Werte handelt, müssen diese mit der Mehrwertsteuer in Höhe von 19 % verrechnet werden. Es ergeben sich folglich Investitionskosten zur Sanierung der Kesselanlage in Höhe von 20.780 € (brutto).

2.4.2 Szenario 2: Verbrennungsmotorische BHKW

Der Fokus der folgenden Untersuchungen liegt in der Einbindung eines BHKW zur hocheffizienten, gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung durch Anwendung des KWK-Prozesses. Als Antriebstechnik werden für das vorliegende Objekt ausschließlich Verbrennungsmotoren betrachtet. Im Folgenden sollen verschiedene potenzielle BHKW zur Strom- und Wärmeversorgung des Schlosses Oberhausen mit Hilfe der Jahresdauerlinie ausgewählt und betrachtet werden. Zur Auswahl stehen die in **Tabelle 2** dargestellten Aggregate, da sie bezüglich der Nennleistung und des Teillastverhaltens eine gute Eignung aufweisen.

Hersteller	Bezeichnung	Abkürzung	P_{el} [kW]	P_{th} [kW]	η_{el} [%]	η_{th} [%]
f.u.n.k.e. senergie	G 4.12 S	f.u.n.k.e. 50 kW _{el}	50	78	34	53
Sokratherm	GG 70 S	Sokratherm 71 kW _{el}	71	114	35	56
2G	Agenitor 404 b	2G 100 kW _{el}	100	112	38,4	42,9
Kuntschar & Schlüter	GTK 100 M	K&S 100 kW _{el}	100	148	35	51
f.u.n.k.e. senergie	G 934 TI	f.u.n.k.e. 105 kW _{el}	105	123	39	46

Sokratherm	GG 201 S	Sokratherm 205 kW _{el}	205	331	35	56
EAW Anlagenbau	EW M 238 S	EAW 238 kW _{el}	238	363	36	54

Tabelle 2: Ausgewählte BHKW Szenario 2

Die Aggregate mit einer elektrischen Leistung von mehr als 200 kW werden für die Simulationen im fünften Szenario herangezogen. In der Regel ist bei verbrennungsmotorischen BHKW ein Teillastbetrieb bis zu einem Lastpunkt in Höhe von 50 % der elektrischen Nennleistung möglich. Von den Herstellern werden für die Lastpunkte 100 %, 75 % und 50 % der elektrischen Leistung die entsprechenden Wirkungsgrade und Stromkennzahlen angegeben. Im Simulationsmodell sind diese Lastpunkte hinterlegt. Ergibt sich durch den Wärmebedarf und die mögliche freie Kapazität im Wärmespeicher ein Lastpunkt zwischen diesen Werten, so können die entsprechenden Parameter durch lineare Interpolation ermittelt werden. **Abbildung 10** gibt einen Überblick über die potenziellen Laufzeiten der ausgewählten erdgasbetriebenen BHKW ohne Berücksichtigung der Speichermöglichkeit, die zu einer weiteren Laufzeitverlängerung der Anlagen führen würde.

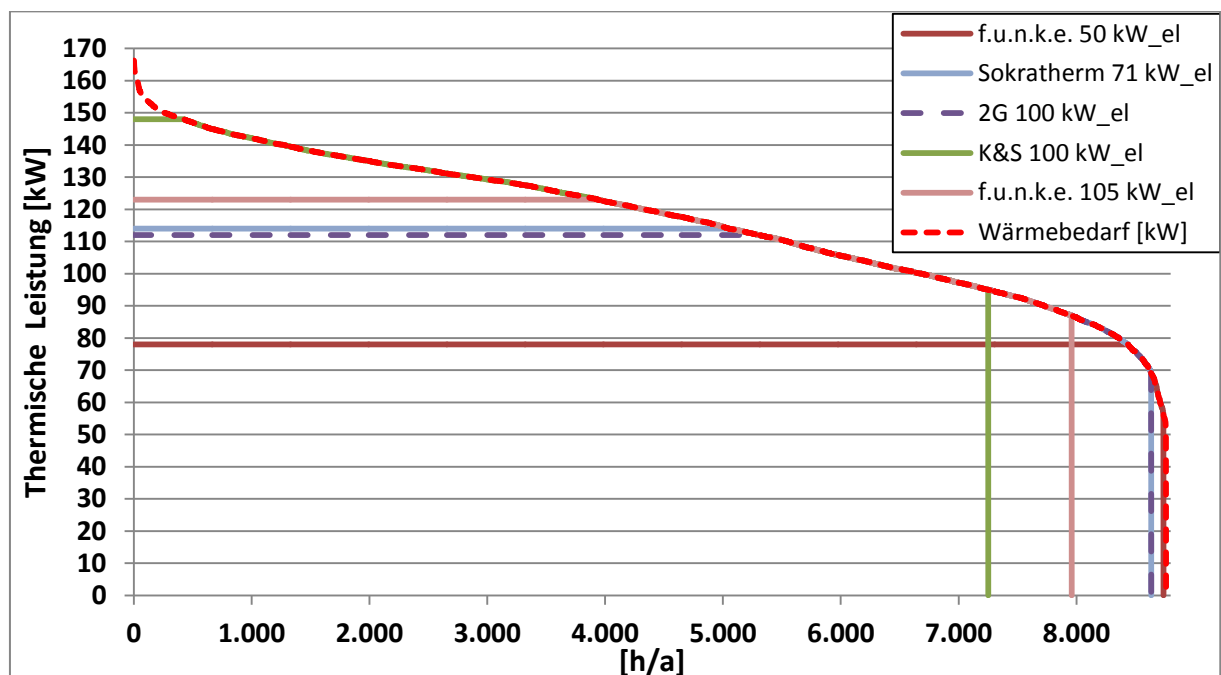


Abbildung 10: Betrachtung verschiedener Motoren in der geordneten Jahresdauerlinie (Wärme)

Alle BHKW weisen durch den flachen Verlauf der Jahresdauerlinie hohe potenzielle Betriebszeiten auf. Durch die Berücksichtigung des Teillastverhaltens ist ein Großteil der nötigen Wärmeerzeugung mittels BHKW möglich, was sich nicht nur positiv auf die Wirtschaftlichkeit, sondern auch auf die Reduktion der CO₂-Emission und des Primärenergiebedarfes auswirkt. Die ausgewählten Motoren sollen wärmegeführt betrieben werden. Aus diesem Grund findet in der Simulation in jeder Stunde eine Überprüfung statt, wie groß die verfügbare Wärmesenke im Objekt ist. Diese ergibt sich aus dem thermischen Energiebedarf und der

freien Kapazität im Wärmespeicher. Anhand des ermittelten Wertes wird anschließend der entsprechende Lastpunkt im BHKW bestimmt, falls der Speicherfüllstand zur Versorgung nicht ausreichend ist. In Zeiten, in denen der thermische Bedarf den minimal möglichen Lastpunkt des BHKW (50 % der elektrischen Leistung) unterschreitet und der Speicherfüllstand zur Wärmeversorgung nicht ausreicht, muss auf den Kessel zurückgegriffen werden. Die angesetzten Investitionskosten sowie die Wartungskosten nach [6] finden sich im Anhang in **Tabelle 8** und **Tabelle 9**.

2.4.3 Szenario 3: Unterstützende Stromerzeugung durch Photovoltaik

In der Regel kann das BHKW den Strombedarf durch die wärmegeführte Betriebsweise nicht vollständig decken, wodurch ein vergleichsweise teurer Reststrombezug nötig wird. Um diese Zusatzkosten zu reduzieren und gleichzeitig eine weitere Verringerung der objektspezifischen CO₂-Emission zu erreichen, soll für die wirtschaftlichste BHKW-Variante der Einsatz von PV-Anlagen zur zusätzlichen Stromerzeugung geprüft werden. Da das Schloss Oberhausen unter Denkmalschutz steht, ist lediglich das Dach des Glasanbaus mit einer Fläche von 129,2 m² verfügbar. Betrachtet werden PV-Anlagen mit einer Modulfläche von 1,6368 m², die sich aus einer Breite von 0,992 m und einer Länge von 1,65 m ergibt. Insgesamt können 75 PV-Module mit einer Gesamtfläche von 122,76 m² installiert werden, was zu einer Leistung von 20,25 kWp führt. Um den Nutzen für den Betreiber zu maximieren, soll das BHKW unabhängig von der PV-Anlage betrieben werden. Die PV-Anlage wird primär zur Deckung des Reststrombedarfes, welcher die Erzeugung des BHKW überschreitet, genutzt. Kann das BHKW den Strombedarf des Objektes vollständig decken und findet gleichzeitig Stromerzeugung in der PV-Anlage statt, so wird dieser PV-Strom zu einer festgelegten Vergütung in das Netz der öffentlichen Versorgung eingespeist. Da das BHKW insbesondere in den Sommermonaten durch den geringeren Wärmebedarf in Teillast oder gar nicht betrieben wird, kann diese Strategie durch den primären Betrieb der PV-Anlage in den Sommermonaten zu einer Reduktion des Strombezuges und somit zu weiteren Einsparungen führen. Die angesetzten Gesamtkosten der Anlage inklusive Wartung⁸ betragen 22.680 € bei 1.120 €/kWp. Die Zusammensetzung der spezifischen Investitionskosten für die gesamte Anlage findet sich im Anhang in **Tabelle 12**. Die Vergütung für den eingespeisten Strom aus PV-Anlagen mit einer elektrischen Leistung von mehr als 10 kWp beträgt 11,87 ct/kWh_{el} (2017). Die Eigenstromproduktion wird wie auch bei den BHKW-Lösungen mit 18,32 ct/kWh_{el} Strombezugspreis bewertet.

2.4.4 Szenario 4: BHKW auf Basis erneuerbarer Energien

Im Rahmen des Projektes sollte zur weiteren CO₂-Emissionsminderung die Energieerzeugung im KWK-Prozess mit erneuerbarem Brennstoff geprüft werden. Ansätze hierzu waren die

⁸ Die angegebenen Gesamtkosten für die PV-Anlage sind exklusive Kosten für Versicherungen. Die Kosten für eine Versicherung hängen individuell von der jeweiligen Anlage ab. Entsprechende Angebote kann man sich z.B. bei der Mannheimer Versicherungs AG einholen. Exemplarisch sei an dieser Stelle deren Versicherungsschutzpaket „Lumit Home“ genannt. Eine Empfehlung für eine bestimmte Versicherung soll jedoch nicht gegeben werden. Aufgrund dessen sind Versicherungskosten nicht in den Gesamtkosten enthalten.

Betrachtung von Biomethan als Brennstoff oder die Vergasung von Holzpellets zum Antrieb der BHKW. Beide Alternativen haben sich als nicht realisierbar erwiesen, wobei die Biomethannutzung keinen wirtschaftlichen Betrieb im Vergleich zu den konventionellen Varianten aufweist und der Holzpellet-Ansatz technisch derzeit noch nicht zuverlässig realisierbar ist bzw. die angestrebte hohe Anlagenverfügbarkeit nicht dargestellt werden kann.

Zunächst erscheint die Nutzung von Biomethan eine sehr gute Lösung zu sein, um die CO₂-Emissionen deutlich zu reduzieren. Im Jahr 2016 haben 196 Anlagen mit einer Kapazität von 880 Mio. Nm³/a eine Menge von 9,4 Terawattstunden Biomethan in das Erdgasnetz eingespeist. Dieses Biomethan kann überall in Deutschland bilanziell bezogen und genutzt werden. Wird ein BHKW mit Biomethan betrieben, so gilt es nicht mehr als KWK-Anlage sondern als EEG-Anlage. Die verbundenen CO₂-Emissionen werden mit dem Wert Null bewertet. Da der Strom zur Objektversorgung weiter vollständig bezogen werden muss, kann diese Variante nur dann wirtschaftlich sein, wenn die Einspeisevergütung für den Strom deutlich höher als der Biomethanpreis ist (Beispiel: Biomethan ca. 6 ct/kWh, dann muss der Stromerlös bei einem BHKW mit 40 % elektr. Wirkungsgrad bei mindestens 15 ct/kWh liegen). Biomethan wird mit einem Herkunftsnachweis vertrieben, so dass jede BHKW-Anlage entsprechend eine Einspeisevergütung bekommt, abhängig z. B. davon, ob die in der Biogasanlage eingesetzten Substrate nachwachsend sind oder als Abfall deklariert waren und ob die Inbetriebnahme im EEG 2009 oder im EEG 2012 erfolgte. Zusätzlich gibt es ein umfangreiches Bonus-System. Aktuell wird Strom aus Biomasse mit 14,88 ct/kWh vergütet (§ 43, EEG 2017) - allerdings nur bis zu einer Bemessungsleistung von 500 kW und bei einer Degression in Höhe von 1 % p.a.. Die Bemessungsleistung ergibt sich als Quotient aus erzeugter Arbeit und Jahresstunden. Bei Biogasanlagen sind nur 50 % der Bemessungsleistung förderfähig (ca. 4.300 h/a, um die Flexibilität des Systems zu steigern). Biomethan wird zurzeit für 6 bis 9 ct/kWh angeboten, d.h. der Stromerlös müsste zwischen 15 und 22 ct/kWh liegen. Da dies nicht der Fall ist und ein komplexer, unsicherer Rechtsrahmen zu beachten ist, ist diese Variante nicht empfehlenswert. [12]

Die Vergasung von Holz als CO₂-freier Brennstoff für BHKW wäre ebenfalls eine interessante Option. Die langjährigen Erfahrungen des LET zeigen jedoch, dass alle bisher im Markt angebotenen Anlagen deutliche Schwächen aufweisen, da sie bisher nicht über ein Pilotstadium herausgekommen und zudem sehr störanfällig sind. Für ein Objekt wie das Schloss Oberhausen ist eine solche Lösung nicht zu empfehlen.

2.4.5 Szenario 5: BHKW mit AKM

Die Kombination von BHKW mit AKM ist eine Möglichkeit zur Steigerung der Energieeffizienz, wenn bestimmte Kriterien erfüllt werden. Grundsätzlich wird bei dieser Kombination die vom BHKW produzierte Wärme auch zur Deckung des Kältebedarfs genutzt. Da das Schloss Oberhausen einen ausgeprägten Kältebedarf aufweist, ist die Installation einer geeigneten AKM ggf. technisch und wirtschaftlich sinnvoll. Im Rahmen des fünften Szenarios ist dies unter den getroffenen Annahmen (vgl. Kapitel 3.6) zu prüfen. Aufgrund der ohnehin un-

zureichenden Datengrundlage hinsichtlich der Abdeckung des Kältebedarfs wird nur eine AKM untersucht, deren wesentlichen Daten in **Tabelle 3** dargestellt sind.

<i>Hersteller</i>	<i>Bezeichnung</i>	P_{el} [kW]	P_{th} [kW]	$P_{Kälte}$ [kW]	$P_{rück}$ [kW]	<i>Wärmeverhältnis [%]</i>
ago	congelò 250	11	544	250	794	46

Tabelle 3: Ausgewählte AKM-Daten

Im Rahmen dieser Szenarioberechnung wird nur diese AKM für das in den vorherigen Szenarien ermittelte effizienteste BHKW bei den Simulationen betrachtet. Um die ermittelten Ergebnisse wirtschaftlich bewerten zu können, werden für die Investitions- und Betriebskosten Parameter gemäß folgender **Tabelle 4** angenommen.

<i>Kostenbestandteil</i>	<i>Betrag</i>	<i>Einheit</i>
Investition AKM-Modul	380	€/kW _{Kälte}
Investition Rückkühler	60	€/kW _{rück}
Planung & Installation	13.000	€
Wartung & Instandhaltung	1.800	€/a
Zusätzliche Wasserkühlung	500	€/a

Tabelle 4: Investitions- und Betriebskosten der AKM

Um die substituierten Kosten gegenüber der vorhandenen KKM in den Simulationsrechnungen berücksichtigen zu können, werden für die Wartung und Instandhaltung der KKM 1.500 €/a angesetzt. Unter diesen Annahmen müssen für die AKM im Betrieb entsprechend 800 €/a Mehrkosten in die Berechnung einfließen, welche sich aus zusätzlichen 300 € für die Wartung und Instandhaltung der AKM sowie 500 € zur Wasserkühlung der AKM ergeben. Abschließend ist in diesem Szenario zu überprüfen, ob sich aufgrund des veränderten Wärmebedarfes, der sich durch den Einsatz einer AKM einstellt, ein BHKW mit größerer thermischer Leistung wirtschaftlich besser eignet.

3 Analyse und Bewertung der Simulationsergebnisse

Neben den Simulationsergebnissen sind die daraus resultierenden finanziellen Ergebnisse, die bei einer Investitionsentscheidung zur Hilfe genommen werden, von besonderer Bedeutung. Des Weiteren spielen insbesondere bei öffentlichen Gebäuden, die als Multiplikator fungieren können, die ökologischen Ergebnisse bezüglich Primärenergieeinsparung und Reduktion der CO₂-Emission eine übergeordnete Rolle und können möglicherweise noch höher als die monetären Einsparungen gewichtet werden. Im folgenden Kapitel werden die wichtigsten Simulationsergebnisse dargestellt und die ökonomisch und ökologisch effizienteste Alternative identifiziert. Anschließend wird für diese eine Unterstützung der Stromerzeugung durch PV-Anlagen sowie eine potenzielle Nutzung erneuerbarer Brennstoff für BHKW geprüft.

3.1 Auswertung der Betriebssimulation

Die Simulationsergebnisse lassen sich anhand verschiedener Betriebsparameter auswerten. Im Folgenden findet diese Auswertung zunächst für die Szenarien 1 und 2 statt, da aufbauend auf den Simulationsergebnissen aus Szenario 2 für die technisch und wirtschaftlich beste Lösung weitere Erzeugungsmaßnahmen bzw. Modifikationen vorgenommen werden sollen.

3.1.1 Szenario 1: Kesselsanierung

Die Ergebnisse für die neue Kesselanlage unterscheiden sich nur zum Referenzszenario in Bezug auf den zur Wärmeversorgung nötigen Erdgaseinsatz. Da in jeder Stunde Wärme zur Herstellung des vorgeschriebenen Raumklimas benötigt wird, weist der Kessel jährliche Betriebsstunden in Höhe von 8.760 bei 6.032 Vollbenutzungsstunden auf. Durch die Wirkungsgradsteigerung von 87 % auf 90 % kann der Erdgasbezug von 1.056.748 kWh/a auf 1.021.523 kWh/a reduziert werden. Die Stromversorgung wird unverändert durch einen Strombezug in Höhe von 100 % des jährlichen Strombedarfes sichergestellt. So ergeben sich jährliche mittlere Einsparungen in Höhe von 1.942 € alleine durch den verringerten Erdgasbezug, denen allerdings die Finanzierungskosten gegenüberstehen. Insofern ist eine kurzfristige Wirtschaftlichkeit nicht gegeben.

3.1.2 Szenario 2: Verbrennungsmotorische BHKW

Abbildung 11 zeigt die jährlichen Betriebs- sowie Vollbenutzungsstunden der einzelnen BHKW-Varianten sowie des Kessels für das zuvor ausgewertete Szenario 1. Hier sei anzumerken, dass für jedes BHKW ein zweiwöchiges Wartungsintervall im Juli berücksichtigt wird, in dem lediglich der Spitzenlastkessel den Wärmebedarf deckt.

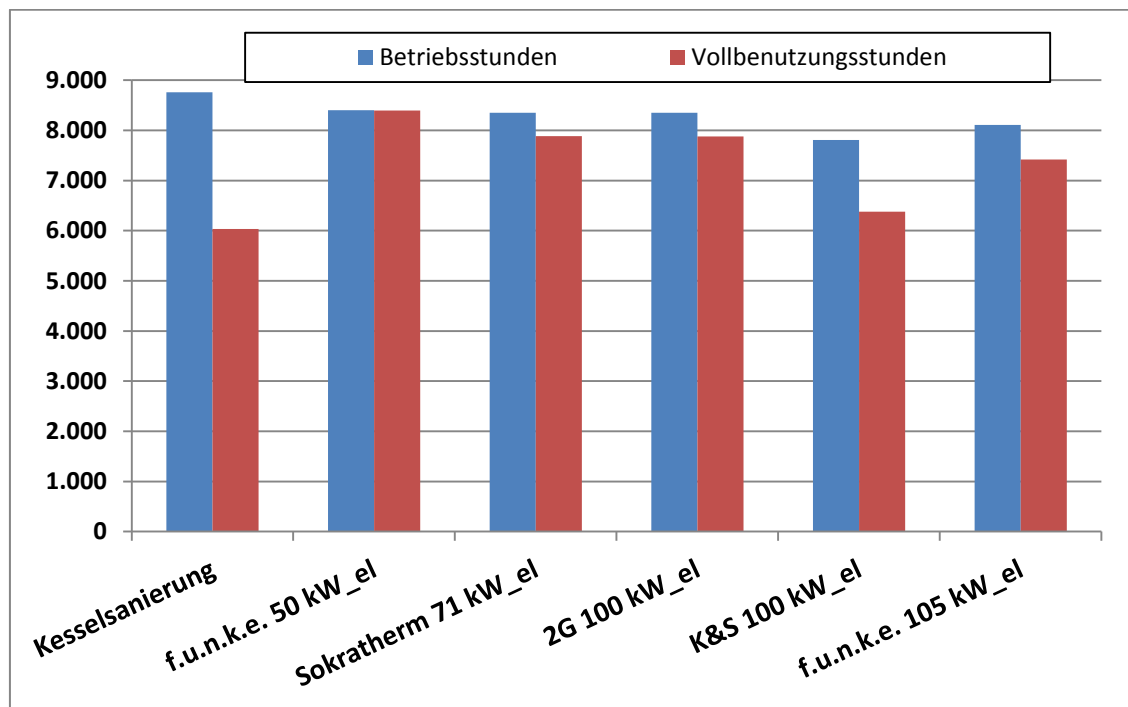


Abbildung 11: Benutzungsstunden der Erzeugungsanlagen in den Szenarien 1 und 2

Alle Anlagen weisen eine sehr hohe jährliche Nutzungsdauer auf, was auf den Wärmebedarf (flacher Verlauf der geordneten Jahresdauerlinie) zurückzuführen ist. Mit steigender elektrischer Leistung nehmen die jährlichen Betriebsstunden ab, da ebenso die thermische Leistung steigt und die Anlagen wärmegeführt betrieben werden. Des Weiteren werden die Unterschiede zwischen Betriebs- und Vollbenutzungsstunden größer. Die kürzeste jährliche Betriebsdauer weist das BHKW K&S 100 kW_{el} mit einer elektrischen Leistung von 100 kW auf. Grund hierfür ist der hohe thermische Wirkungsgrad (51 %), welcher die höchste thermische Leistung aller betrachteten Aggregate (148 kW) impliziert. Die Kombination mit einem Wärmespeicher nach der zuvor beschriebenen Auslegungsstrategie führt trotz geringster Betriebsstunden dazu, dass die benötigte Wärme fast vollständig dem KWK-Prozess entnommen werden kann.

Deutlich wird dies anhand der folgenden **Abbildung 12**, welche die Aufteilung des Erdgasbedarfes bezüglich BHKW und Spitzenlastkessel zeigt.

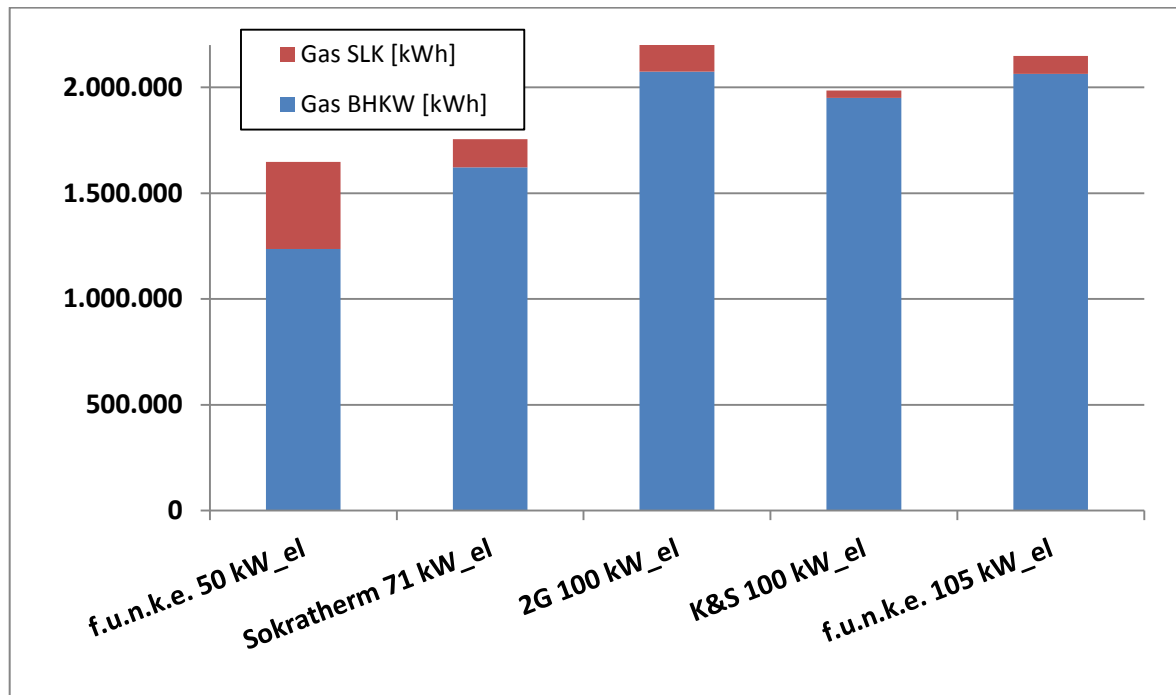


Abbildung 12: Aufteilung des Gasverbrauches für BHKW und Spitzenlastkessel inkl. Wärmespeicher

Auffällig ist der besonders hohe Erdgasbezug für das BHKW 2G 100 kW_{el}, was auf den geringen thermischen Wirkungsgrad zurückzuführen ist. Der geringste Erdgasbezug des Gesamtsystems ergibt sich für das leistungsschwächste BHKW f.u.n.k.e. 50 kW_{el}, da in diesem Fall ein großer Teil des Wärmebedarfes durch den Spitzenlastkessel gedeckt werden muss, welcher einen hohen thermischen Wirkungsgrad aufweist.

3.2 Wirtschaftliche Bewertung

Die Bewertung einer Investition kann anhand verschiedener Größen erfolgen. In der Praxis handelt es sich hierbei in der Regel um den Kapitalwert sowie die dynamische Amortisationszeit.

Im Rahmen der Kapitalwertberechnung werden alle Ein- und Auszahlungen, die mit der betrachteten Investition verbunden sind, auf einen bestimmten Zeitpunkt mit dem zuvor gewählten Kalkulationszinssatz abgezinst. Unter Berücksichtigung der Anfangsinvestition ergibt sich nach Summierung der Ein- und Auszahlungen über den zuvor definierten Betrachtungszeitraum (in diesem Falle zehn Jahre) ein positiver oder negativer Kapitalwert. Ist der Kapitalwert positiv, so ist die betrachtete Investition vorteilhaft, bei einem negativen Kapitalwert hingegen nicht. Werden mehrere Investitionsalternativen anhand des Kapitalwertes verglichen, so ist die Variante mit dem höchsten Kapitalwert die wirtschaftlichste Lösung. Entspricht der Kapitalwert dem Wert Null, so ist die Investition weder vor- noch nachteilig.

Die dynamische Amortisationszeit gibt an, nach welchem Zeitraum das eingesetzte Kapital durch den mit der Investition verbundenen Gewinn wieder erwirtschaftet wird. Nach diesem Zeitpunkt kann folglich mit einem reinen Gewinn gerechnet werden. Je kürzer die Amortisa-

tionszeit einer Investition ist, desto wirtschaftlicher ist das Vorhaben. Im Gegensatz zur statischen Amortisationszeit werden bei der dynamischen Amortisationszeit wie auch bei dem Kapitalwert die abgezinste Einnahmen und Ausgaben betrachtet. Die einzuhaltende dynamische Amortisationszeit einer Investition ist je nach Unternehmen und Branche verschieden. Als Richtwert soll häufig die Vorgabe von vier Jahren eingehalten werden.

Im Folgenden werden für die beschriebenen Versorgungsvarianten die ermittelten Kapitalwerte und dynamischen Amortisationszeiten anhand von **Abbildung 13** dargestellt. Der Betrachtungszeitraum beträgt zehn Jahre bei einem Kalkulationszinssatz in Höhe von 10 %.

Die Sanierung der Kessel weist durch die geringe Wirkungsgradsteigerung im gewählten Betrachtungszeitraum von zehn Jahren und die daraus resultierenden geringen jährlichen Einsparungen einen negativen Kapitalwert in Höhe von -12.622 € und damit keinen Amortisationszeitpunkt nach zehn Jahren auf. Das beste finanzielle Ergebnis weist das BHKW Sokratherm 71 kW_{el} auf. Der Kapitalwert für den definierten Betrachtungszeitraum liegt bei 129.948 € und übertrifft damit alle anderen Alternativen. Des Weiteren hat sich die Investition in das BHKW nach 3,65 Jahren am schnellsten amortisiert.

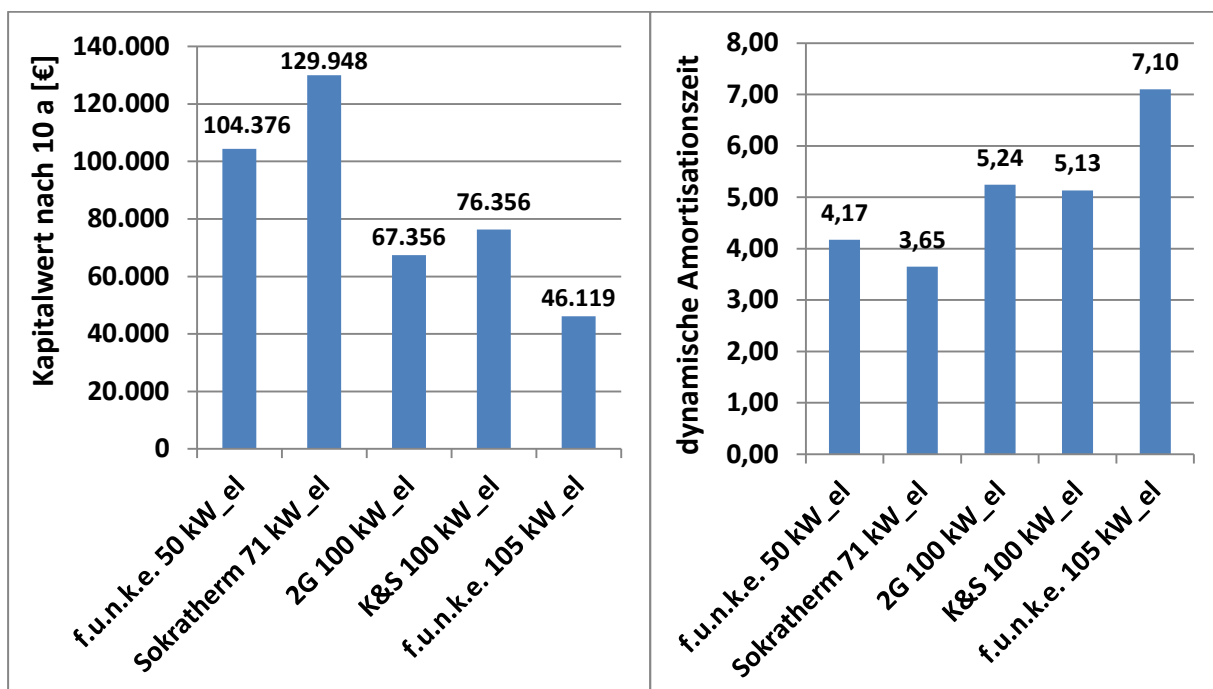


Abbildung 13: Wirtschaftliche Simulationsergebnisse Szenario 2

Bei der Betrachtung der ermittelten Kapitalwerte würde man zunächst einen Anstieg der Kapitalwerte bis zu einer elektrischen Leistung von 100 kW erwarten, da in diesen Fällen sowohl für die Eigenerzeugung als auch für die Einspeisung des im KWK-Prozess erzeugten Stroms eine Vergütung gezahlt wird. Die Ergebnisdarstellung in **Abbildung 13** widerlegt diese Vermutung. Zwar weist das BHKW f.u.n.k.e. 105 kW_{el} mit der höchsten elektrischen Leistung (105 kW, damit entfällt die Förderung für die Eigenstromversorgung vollständig) den geringsten Kapitalwert auf, jedoch sind auch die Ergebnisse der Aggregate mit einer elektrischen Leistung von 100 kW bereits schlechter, als die der Anlagen mit einer geringeren

elektrischen Leistung. Diese Ergebnisse resultieren aus einer Vielzahl von Einflussparametern wie beispielsweise den Wirkungsgraden in allen betrachteten Lastpunkten, der Gleichzeitigkeit von Strom- und Wärmebedarf und der resultierenden Höhe des substituierten Strombezugs und weiteren Aspekten und zu tätigen Annahmen. Die stündliche Auflösung der Simulationen trägt in diesem Fall jedoch zu einer deutlichen Steigerung der Genauigkeit der erzielten Ergebnisse bei. Des Weiteren wurden die betrachteten Szenarien mit einer kommerziellen Software, deren Logik der des lehrstuhleigenen Tools ähnelt, nachgerechnet und validiert.

Somit kann unter rein finanziellen Aspekten eine Empfehlung für das BHKW Sokratherm 71 kW_{el} mit einer elektrischen Leistung von ausgesprochen werden.

Für die jährliche Wärmeerzeugung ergibt sich das in **Abbildung 14** dargestellte Verhältnis. Ein Großteil der jährlichen Wärmeerzeugung findet im Rahmen des hocheffizienten KWK-Prozesses bei folglich hohem Brennstoffausnutzungsgrad statt. Der Spitzenlastkessel wird lediglich in den Wintermonaten genutzt, da durch die Teillastfähigkeit in Kombination mit der Wärmespeichernutzung die Deckung des Wärmebedarfes in den Sommermonaten ausschließlich durch das BHKW erfolgt. Des Weiteren ist das angesprochene, zweiwöchige Wartungsintervall im Sommer zu erkennen.

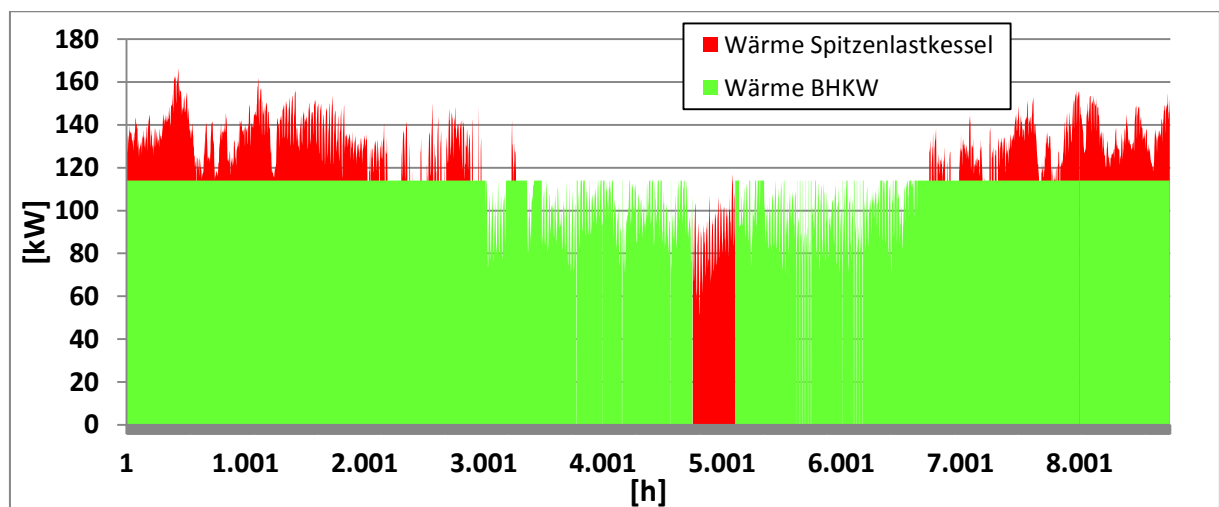


Abbildung 14: Wärmeerzeugung BHKW/SLK im Jahresverlauf

Eine detaillierte Darstellung der jährlichen Einnahmen und Ausgaben, die unmittelbar mit dem Betrieb des BHKW verbunden sind, ist in **Abbildung 15** zu finden⁹.

⁹ Eine übersichtliche Darstellung im Querformat findet sich im Anhang.

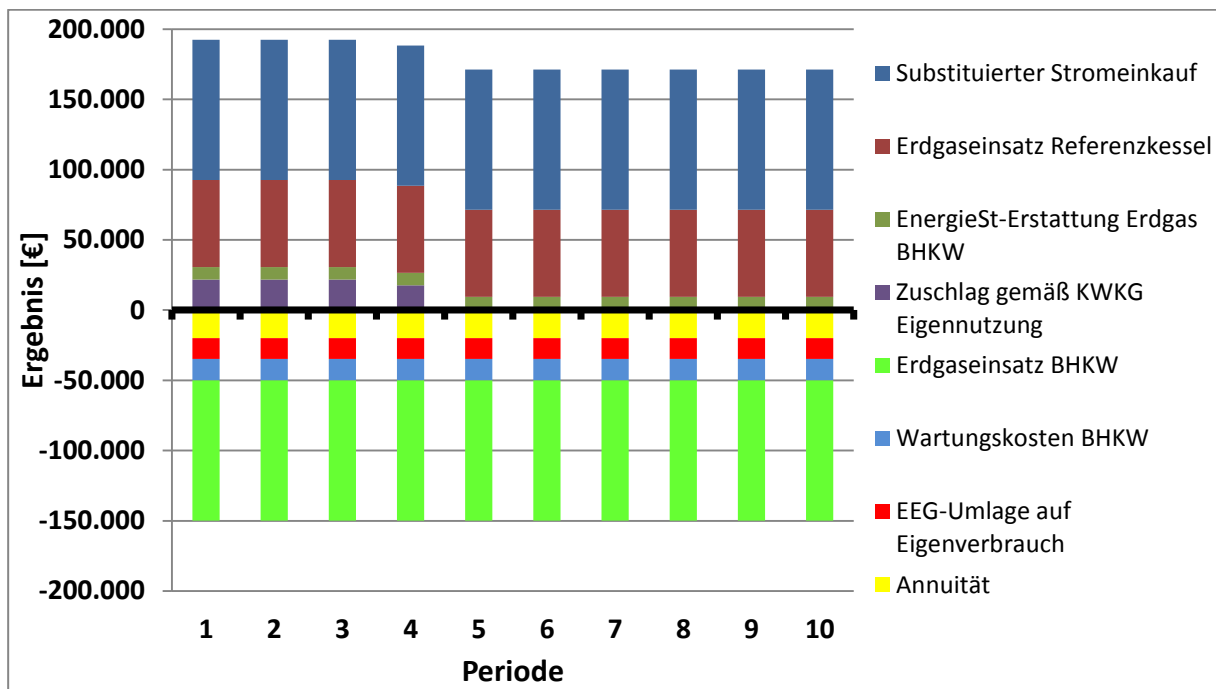


Abbildung 15: Betriebsergebnisse BHKW Sokratherm 71 kW_{el}

In **Abbildung 16** sind sowohl die statische als auch die dynamische Amortisationszeit der Investition in das BHKW dargestellt. Hier ist neben den unterschiedlichen Amortisationszeitpunkten je nach Betrachtung des Weiteren ein Knick in beiden Kurven zu erkennen, der durch das Auslaufen der Förderung nach dem KWKG nach 30.000 Vollbenutzungsstunden zu erklären ist.

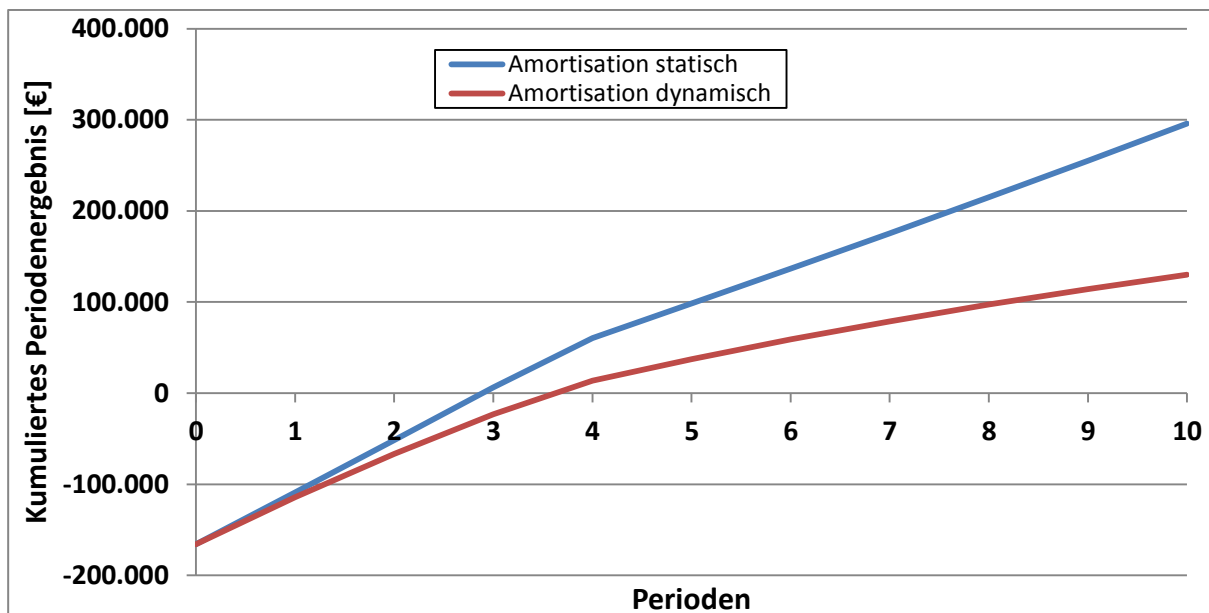


Abbildung 16: Amortisationszeiten BHKW Sokratherm 71 kW_{el}

Im Rahmen einer Feinkalkulation sind in diesem konkreten Leistungsbereich sowie in der Spanne von 71 kW_{el} bis 100 kW_{el} weitere Module unter Berücksichtigung des Teillastverhaltens auf eine potenziell höhere Wirtschaftlichkeit zu prüfen. Da in der Regel das finanzielle

Ergebnisse höher als die mögliche CO₂-Emissionsminderung sowie die Primärenergieeinsparung für eine Entscheidungsfindung höher gewichtet wird, soll das genannte BHKW in Szenario 3 mit unterstützenden Stromerzeugung aus PV-Anlagen betrachtet werden.

3.3 Ökologische und energetische Bewertung

Energetisch betrachtet wird mit jeder BHKW-Lösung Primärenergie eingespart, da ein Großteil des verbrauchten Stroms im gekoppelten KWK-Prozess erzeugt wird. Die Werte der Einsparung welche mit den verschiedenen BHKW erzielt werden können, variieren in Abhängigkeit von Wirkungsgrad und leistungsabhängiger Nutzungsdauer (**Abbildung 17**).

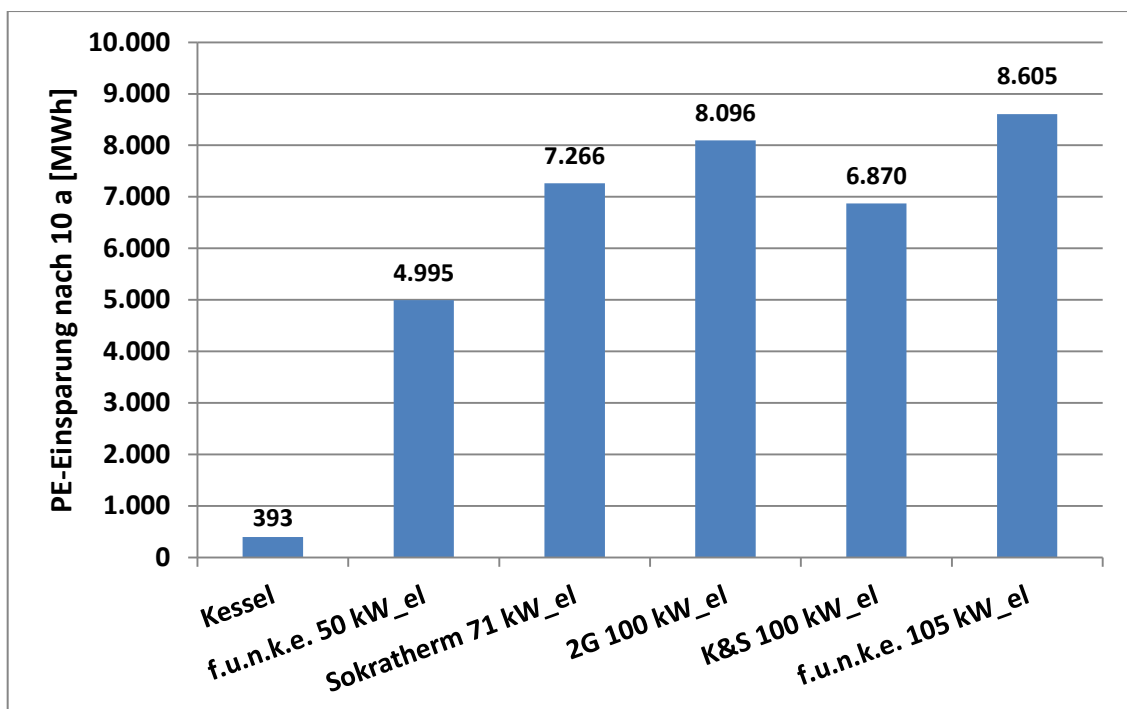


Abbildung 17: Primärenergieeinsparungen nach zehn Jahren für die Szenarien 1 und 2

Die Ergebnisübersicht in **Abbildung 17** macht jedoch schnell deutlich, dass ein BHKW unter primärenergetischen Aspekten in allen Fällen von Vorteil ist. Für das zuvor empfohlene BHKW Sokratherm 71 kW_{el} beträgt die Einsparung nach zehn Jahren 7.266 MWh. Die Primärenergieeinsparungen in Höhe von 393 MWh nach zehn Jahren durch die Kesselsanierung ergeben sich durch den höheren Wirkungsgrad der neuen Kesselanlage.

Bezüglich der CO₂-Einsparung, welche in den Szenarien 1 und 2 erzielt werden können, ist eine weitere Differenzierung der stromspezifischen CO₂-Emissionsfaktoren nötig. Der aktuelle Energieversorger des betrachteten Objektes (EVO) gibt für seinen Strommix einen äußerst geringen CO₂-Emissionsfaktor an (0,245 kg/kWh_{el}, vgl. Kapitel 2.2.1). Wird der Emissionsfaktor der EVO zum Vergleich angesetzt, so ist nur in einem Fall (Sokratherm 71 kW_{el}) eine Einsparung der CO₂-Emissionen durch die Nutzung eines verbrennungsmotorischen BHKW möglich (vgl. **Abbildung 18**, 107 t nach zehn Jahren). Hier gilt es jedoch zu beachten, dass durch die Nutzung einer KWK-Anlage weder der Strom aus erneuerbaren Energien (14,3 MW-Feuerungswärmeleistung Biomasse-KWK in Oberhausen-Sterkrade) noch der

Strom aus der Müllverbrennungsanlage GMVA-Oberhausen verdrängt wird. Diese Erzeugungsanlagen bleiben vom Betrieb des BHKW vollständig unberührt. Aus diesem Grund kann für einen Vergleich entweder der CO₂-Emissionsfaktor des gesamtdeutschen Strommix in Höhe von 0,471 kg/kWh_{el} oder unter Berücksichtigung der Kohlestromerzeugung der deutlich höhere CO₂-Emissionsfaktor für das Bundesland Nordrhein-Westfalen in Höhe von 0,8202 kg/kWh_{el} angesetzt werden. Wie in **Abbildung 18** dargestellt kann durch den Betrieb von KWK-Anlagen die CO₂-Emission folglich deutlich reduziert werden. Für das empfohlene BHKW Sokratherm 71 kW_{el} liegt die Reduktion bei Verwendung des BRD-Strommixemissionsfaktors bei 1.371 t nach zehn Jahren. Wird der NRW-Strommixemissionsfaktor angesetzt, so kann die Einsparung bis zu 3.325 t nach zehn Jahren entsprechen. Der Betrieb des BHKW ist somit sowohl unter ökonomischen als auch unter ökologischen Gesichtspunkten zu empfehlen.

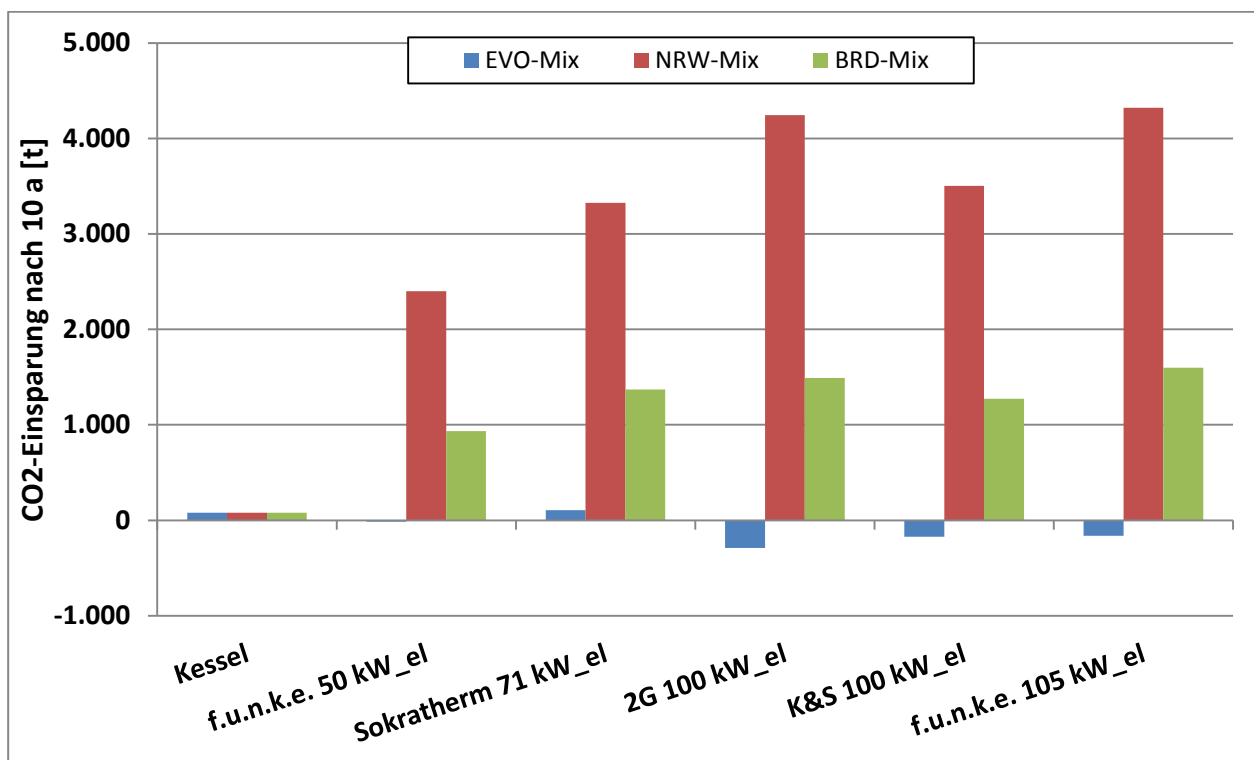


Abbildung 18: CO₂-Einsparung bei verschiedenen Emissionsfaktoren der Szenarien 1 und 2

3.4 Sensitivitätsanalyse

Um die Auswirkung verschiedener Simulationsparameter auf die dargestellten Ergebnisse abschätzen zu können, sind die wichtigsten Eingangsgrößen in einem bestimmten Maß zu variieren und die entsprechenden Auswirkungen auf die Ergebnisse zu analysieren. Diese Analyse wird für das BHKW Sokratherm 71 kW_{el} bezogen auf den Kapitalwert nach zehn Jahren und die dynamische Amortisationszeit¹⁰ dargestellt. Hierzu werden neben dem Strom- und dem Erdgaspreis des Weiteren auch der Strom- und Wärmebedarf variiert. In der Regel

¹⁰ Die Ergebnisse bezüglich der dynamischen Amortisationszeit finden sich im Anhang.

sollten sich Strom- und Wärmebedarfe stark ändern, da etwaige Energieeinsparmaßnahmen vor der Auslegung eines BHKW erfolgen sollten. Da es sich hier jedoch um eine Grobabschätzung der Wirtschaftlichkeit eines BHKW ohne konkrete Umsetzungspläne handelt, können erfolgte Einsparmaßnahmen noch nicht berücksichtigt werden. Aus diesem Grund werden neben der Variation der Energiepreise in einer Spanne von - 30 % bis + 30 % der ursprünglichen Preise die Energiebedarfe in einer Spanne von - 50 % bis + 30 % variiert.

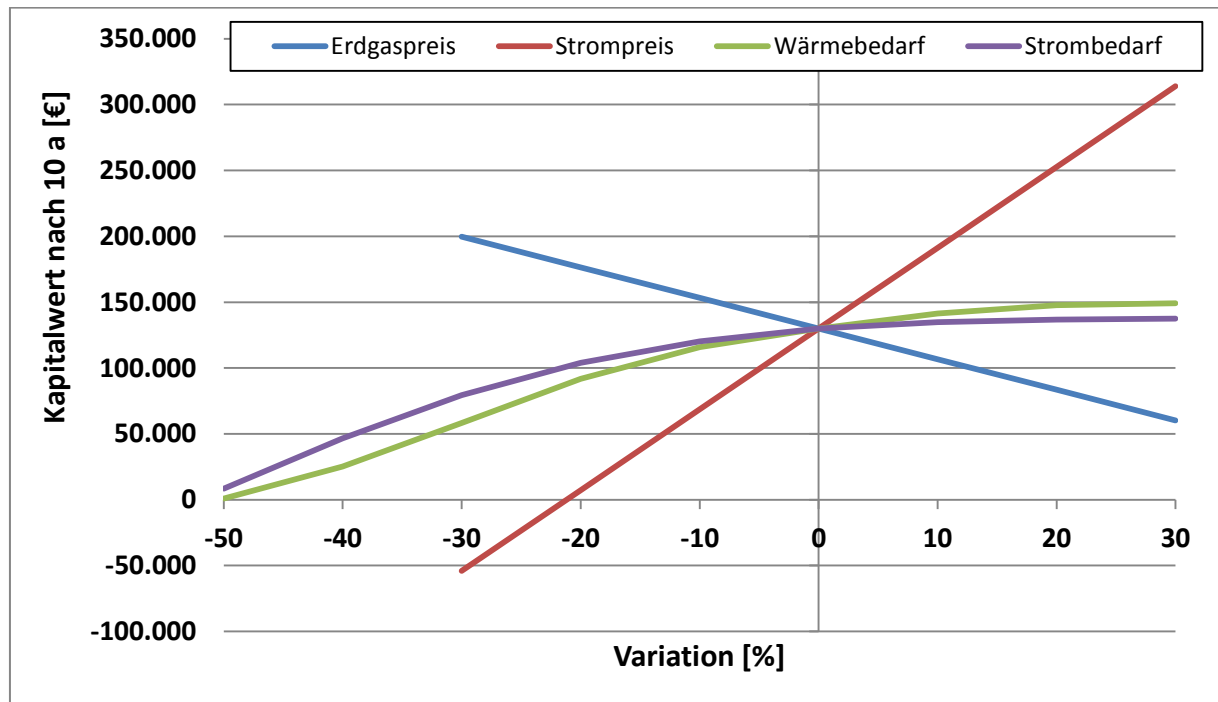


Abbildung 19: Kapitalwertveränderung bei Sensitivierung verschiedener Eingangsparameter

Anhand von **Abbildung 19** wird deutlich, dass der Strompreis für den Fremdbezug von Strom den größten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des betrachteten BHKW hat. Schon eine Reduktion des Strombezugspreises um 10 % bewirkt fast eine Halbierung des Kapitalwertes nach zehn Jahren. Ebenso ist der Erdgaspreis von hoher Bedeutung. Allerdings ist der Einfluss hier umgekehrt und weniger stark. Eine Reduktion des Erdgaspreises wirkt sich positiv auf das Ergebnis aus. Gegenüber Veränderungen im Energiebedarf ist das erzielte Ergebnis sehr robust. **Abbildung 20** zeigt die entsprechenden Auswirkungen auf die dynamische Amortisationszeit, welche sich entgegengesetzt zum Kapitalwert verhält.

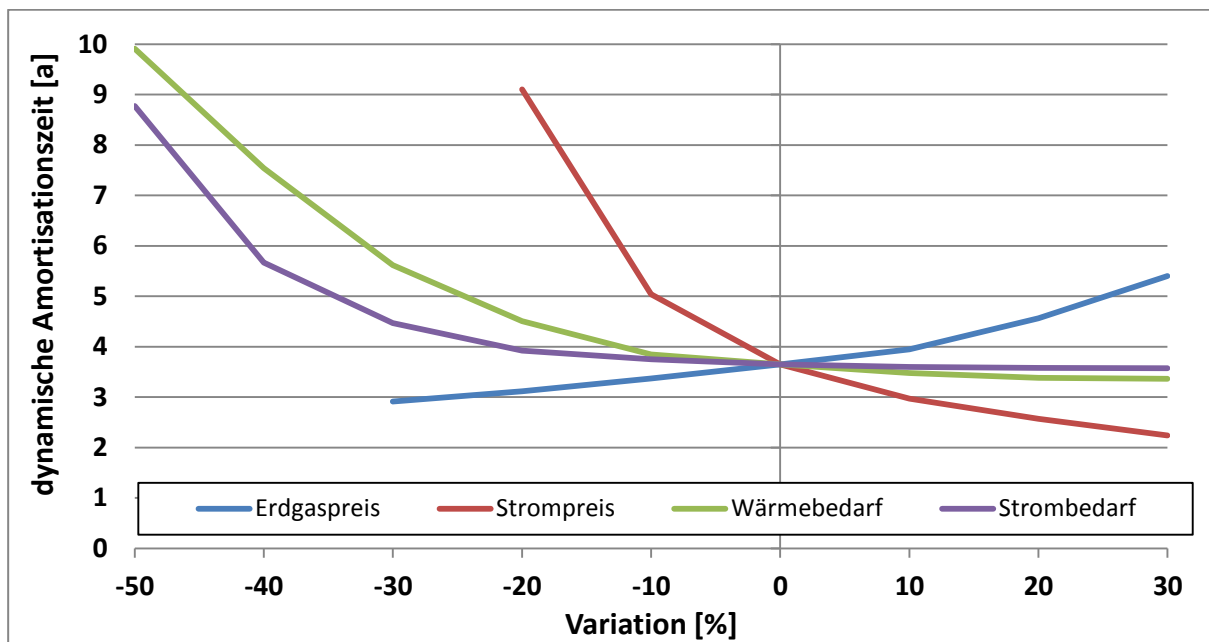


Abbildung 20: Dynamische Amortisationszeit bei Sensitivierung verschiedener Eingangsparameter (Szenario 2)

Durch die geplanten Einsparmaßnahmen ist eine deutliche Reduktion des Strom- **und** Wärmebedarfes insbesondere durch die Sanierung der Raumlüftungstechnik-Anlage (RLT) sehr wahrscheinlich. Der Betrieb der Anlage ist folglich im Rahmen einer Feinanalyse unter Berücksichtigung aller neuen Rahmenbedingungen erneut zu simulieren. Hier könnte sich eine kleinere Leistungsklasse als wirtschaftlicher erweisen.

Wie in Kapitel 2.3.4 angesprochen steht zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Berichtes die Teilbefreiung der EEG-Umlage für den eigenverbrauchten Strom aus KWK-Anlagen zur Diskussion. Im ungünstigsten Fall entfällt diese Befreiung, sodass ab dem 01.01.2018 die vollständige EEG-Umlage auf eigenverbrauchten Strom entrichtet werden muss. In **Abbildung 21** sind die Kapitalwerte nach zehn Jahren für die aktuelle sowie für die potenzielle Umlageregelung dargestellt.

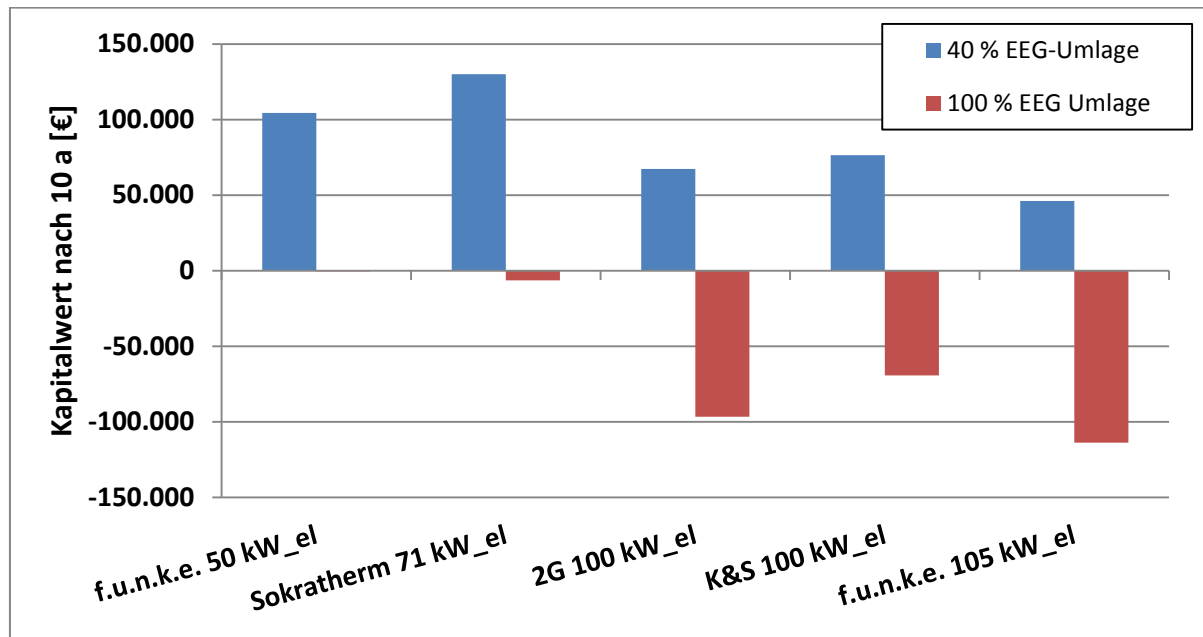


Abbildung 21: Kapitalwert nach zehn Jahren mit verschiedener EEG-Umlageregulierung

Es ist deutlich zu erkennen, dass eine Neuregelung der Umlagepflicht die Wirtschaftlichkeit der betrachteten (und vieler weiterer) Projekte stark beeinflusst. Ein Vergleich der durchschnittlichen jährlichen Einsparungen bei einem Betrachtungszeitraum in Höhe von zehn Jahren bei den zwei möglichen EEG-Umlagenregelungen ist in **Abbildung 22** dargestellt.

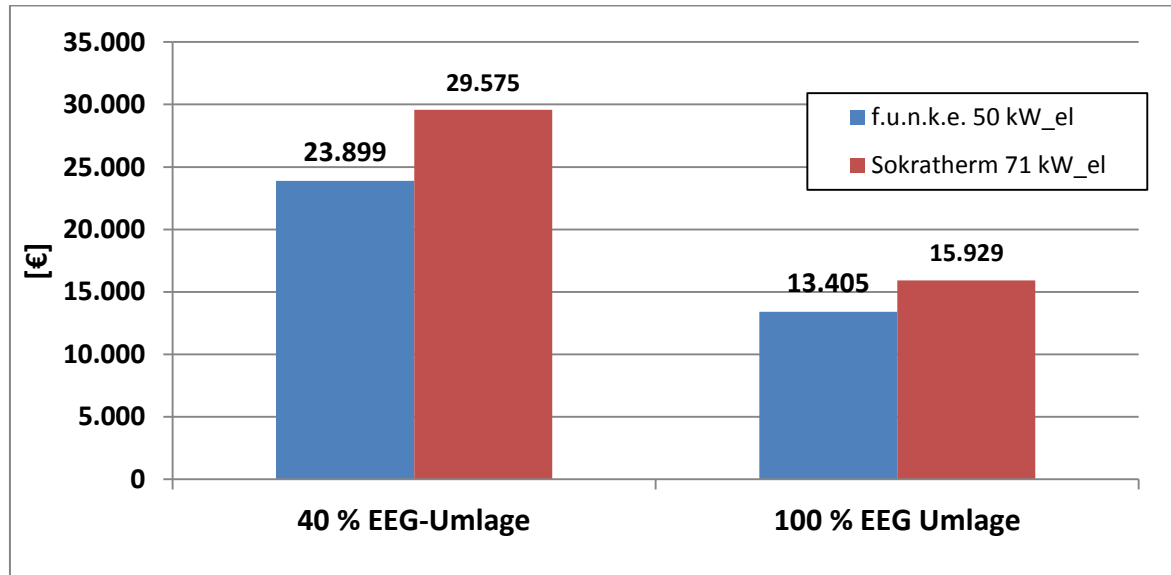


Abbildung 22: Jährliche Einsparungen bei verschiedenen EEG-Umlageregulierungen

Ein wirtschaftlicher Betrieb der betrachteten Anlagen kann kaum noch realisiert werden. Laut einer Pressemitteilung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) finden zwischen der Bundesregierung und der Europäischen Kommission "konstruktive Gespräche" statt, wonach es im Jahr 2018 zu einer neuen Regelung bezüglich der EEG-Umlage auf den Eigenstromverbrauch für neue KWK-Eigenversorgungsanlagen kommen soll. [13]

3.5 Auswertung Szenario 3: Unterstützende Stromerzeugung durch Photovoltaik

Im folgenden Kapitel soll für die zuvor identifizierte wirtschaftlichste Variante die zusätzliche Stromerzeugung durch erneuerbare Energien in Form von PV-Anlagen simuliert und bewertet werden. Die jährliche Stromerzeugung unter Berücksichtigung der solaren Strahlungsdaten, welcher einer kommerziellen Simulationssoftware entnommen werden konnten, ist in **Abbildung 23** dargestellt. Wie für PV-Anlagen üblich stellen die Sommermonate nicht die ertragreichsten Monate dar, was auf die hohen Zelltemperaturen und den damit sinkenden Wirkungsgrad bei hohen Außentemperaturen zurückzuführen ist. Wie auch für die Versorgungsvarianten der Szenarien 1 und 2 wurden die Ergebnisse mit Hilfe einer kommerziellen Software validiert.

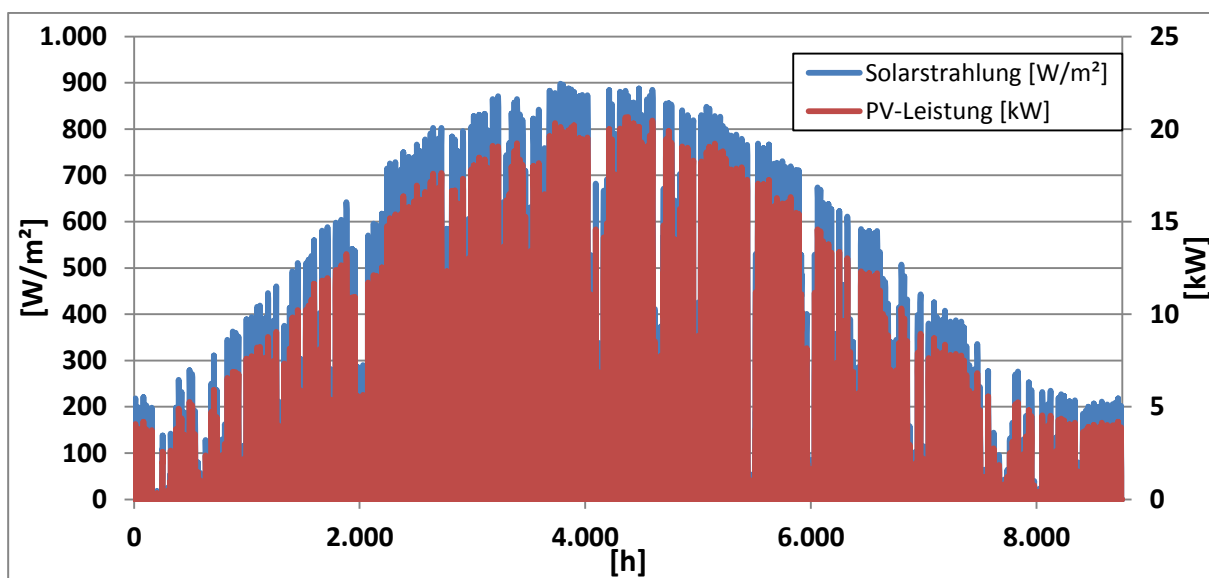


Abbildung 23: Stromezeugung durch PV-Anlage (2016)

Die Stromerzeugung durch die PV-Anlage liegt bei 24.025 kWh im betrachteten Jahr. Davon werden 22.887 kWh im Objekt genutzt, was einer Eigennutzungsquote von ca. 95 % entspricht. Somit kann der Reststrombezug von 180 MWh auf 157 MWh reduziert werden. Unter ökologischen Gesichtspunkten ist alleine durch die Verringerung des Reststrombezuges und die brennstofffreie, regenerative Erzeugung eine Einsparung in den CO₂-Emissionen und in dem Primärenergieverbrauch zu verzeichnen. Hinzu kommt der CO₂-frei erzeugte Strom, welcher in das Netz der öffentlichen Versorgung eingespeist wird. **Abbildung 24** zeigt die möglichen CO₂-Emissionsminderungen je nach betrachtetem CO₂-Emissionsfaktor unter Berücksichtigung des gleichzeitigen Betriebes des BHKW Sokratherm 71 kW_{el}.

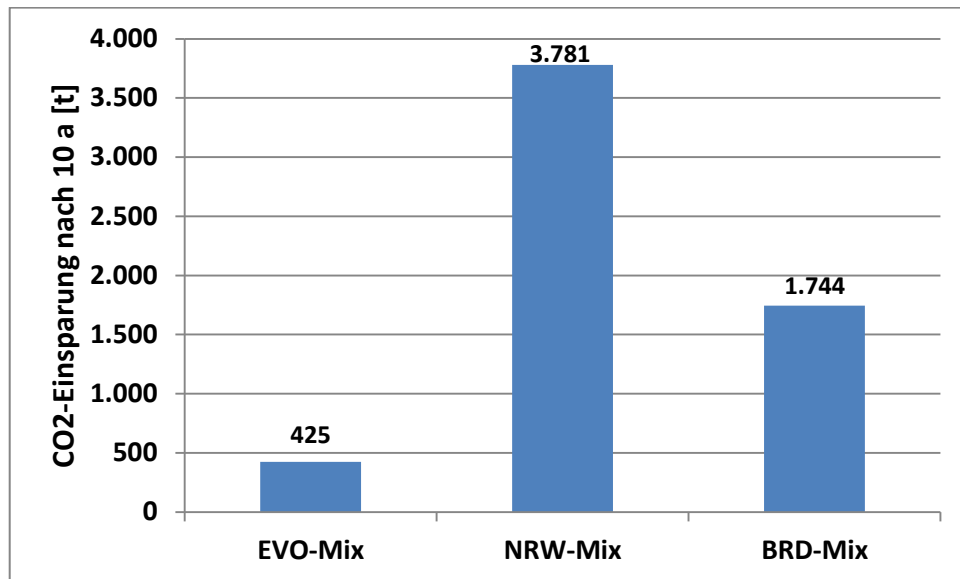


Abbildung 24: CO₂-Emissionsminderung nach zehn Jahren (Szenarien 2 und 3)

Bei jedem angesetzten Faktor können die CO₂-Emissionen durch die Nutzung der PV-Anlage reduziert werden. Sogar bei dem von der EVO kommunizierten Faktor in Höhe von 245 g/kWh_{el} ist mit Hilfe der unterstützenden PV-Stromerzeugung eine Einsparung möglich. Durch den Einsatz der PV-Anlage kann der Primärenergiebedarf im Vergleich zur BHKW-Lösung ohne regenerative Erzeugung zudem um 2 MWh/a gesenkt werden. Im Vergleich zur getrennten Strom- und Wärmeversorgung (Szenario 1) ergibt sich folglich eine zusätzliche Einsparung an Primärenergie.

In **Abbildung 25** sind die einzelnen Periodenergebnisse dargestellt. Der Betrachtungszeitraum wurde in diesem Szenario auf 15 Jahre verlängert.

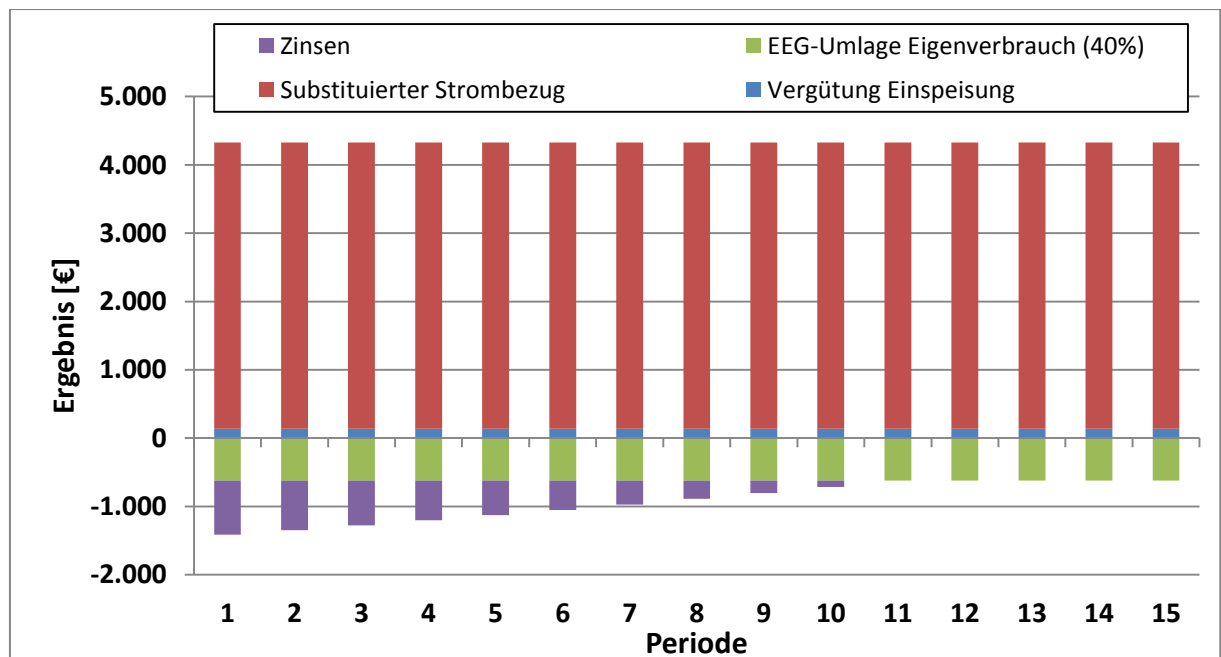


Abbildung 25: Betriebsergebnisse BHKW Sokratherm 71 kW_{el} mit PV-Anlage

Der mit dem Strombezugspreis bewerteter substituierter Stromeinkauf macht den Großteil der Einnahmen aus. Der Kapitalwert nach 15 Jahren beträgt 2.320 €. Da es sich bei einer PV-Anlage um eine Investition mit geringem Aufwand handelt, kann diese trotz geringem Kapitalwert besonders anhand der ökologischen Ergebnisse empfohlen werden.

3.6 Auswertung Szenario 5: BHKW mit AKM

Mit Hilfe einer AKM wird die benötigte Kälte durch Wärme bereitgestellt. Aus diesem Grund steigt der Wärmebedarf des Objektes stark an. Unter Berücksichtigung des Wärmeverhältnisses der ausgewählten AKM in Höhe von 0,46 ergibt sich eine Kälteleistung von 250 kW bei 544 kW thermischer Leistung. Folglich kann aus einer Kilowattstunde Wärme 0,46 kWh Kälte generiert werden. Für das betrachtete Objekt bedeutet dies eine Verdreifachung des Wärmebedarfes auf 3.214.252 kWh/a, was im Wesentlichen mit dem EER der gewählten AKM zu begründen ist. Es ergibt sich folglich eine neue geordnete Jahresdauerlinie des Wärmebedarfes. **Abbildung 26** zeigt den Vergleich der geordneten Jahresdauerlinien mit und ohne zusätzlichen Wärmebedarf zur Kälteerzeugung durch AKM. Die Fläche zwischen den beiden Kurven repräsentiert den zusätzlichen Wärmebedarf. Der steile Anstieg der Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs mit AKM um Stunde 8.000 ist auf die in der Herleitung des Kältebedarfs ermittelte Betriebsstundenzahl zurückzuführen, die wegen den dort getroffenen Annahmen für die AKM übernommen wurde.

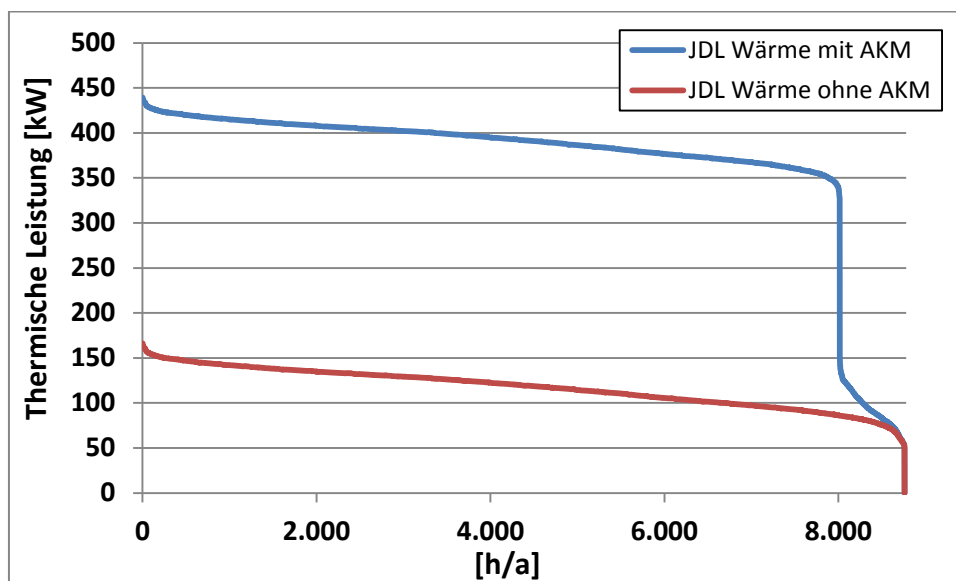


Abbildung 26: Geordnete Jahresdauerlinie Wärmebedarf mit und ohne AKM (2016)

Hier wird deutlich, dass das zuvor ausgewählte BHKW Sokratherm 71 kW_{el} nicht mehr ausreichend sein kann, da der Wärmebedarf enorm steigt. Bis auf das feste Wartungsintervall im Sommer läuft das BHKW das gesamte Jahr über in Volllast. Die jährliche Wärmeerzeugung durch das BHKW beträgt 957.308 kWh bei zusätzlicher Wärmeerzeugung im Spitzenlastkessel in Höhe von 2.256.807 kWh/a. Anhand von **Abbildung 27** wird erneut deutlich, dass das BHKW für das betrachtete Szenario deutlich unterdimensioniert ist, da die jährliche Grundlast knapp 350 kW beträgt. Es sei an dieser Stelle nochmal auf die korrekte Reihenfolge bei der

Auslegung von Energieerzeugungsanlagen hingewiesen. In einem ersten Schritt sind alle möglichen Strom-, Wärme- und Kälteeinsparmaßnahmen durchzuführen. Anschließend muss parallel der Betrieb eines BHKW sowie die Kombination aus BHKW und AKM simuliert werden, um eine fundierte Investitionsentscheidung treffen zu können, da der Betrieb der AKM die Dimensionierung des BHKW stark beeinflusst.

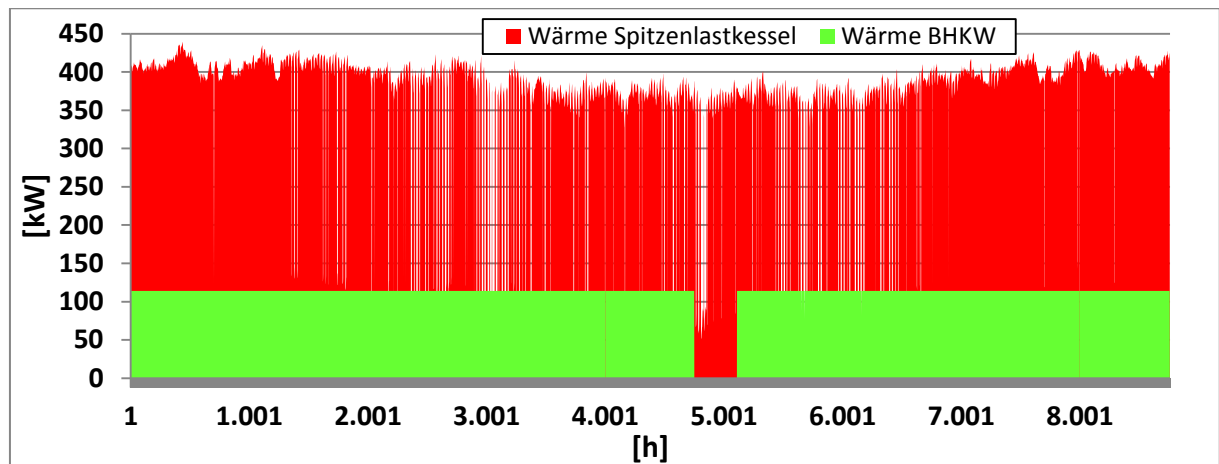


Abbildung 27: Wärmeenerzeugung BHKW (Sokratherm 71 kW_{el})/SLK im Jahresverlauf (Szenario 5)

Die Investition in BHKW (Sokratherm 71 kW_{el}) und AKM weist folglich nach zehn Jahren einen negativen Kapitalwert in Höhe von -166.730 € auf, was neben dem hohen zusätzlichen Erdgasbedarf durch die geringe Wärmezahl der AKM auch auf die zusätzlichen Investitionskosten zurückzuführen ist.

Abschließend soll ein neues BHKW mit passenden Leistungsdaten ausgewählt und simuliert werden. Unter Berücksichtigung der geordneten Jahresdauerlinie aus **Abbildung 26** ergibt sich eine thermische Leistung in Höhe von 350 kW. Aus diesem Grund wurden zwei verschiedene BHKW mit den **Tabelle 5** in dargestellten Kenndaten ausgewählt.

Hersteller	Bezeichnung	P_{el} [kW]	P_{th} [kW]	η_{el} [%]	η_{th} [%]
Sokratherm	GG 201 S	205	331	35	56
EAW Energieanlagenbau	EW M 238 S	238	363	36	54

Tabelle 5: Ausgewählte neue BHKW Szenario 5

Für das Modul Sokratherm 201 kW_{el} ergeben sich Investitionskosten in Höhe von 289.460 € (brutto) bei Bruttowartungskosten in Höhe von 1,65 Ct/kWh_{el}. Die Kosten für den entsprechenden Wärmespeicher betragen 7.300 € (brutto). Das BHKW EAW 238 kW_{el} weist Investitionskosten in Höhe von 317.647 € (brutto) bei 1,59 Ct/kWh_{el} Bruttowartungskosten und 7.509 € Speicherkosten auf. Bezüglich der Wärmespeichergröße sind zuvor die verfügbare Fläche und die mögliche, hindernisfreie Umsetzung (Türen- und Treppenbreite etc.) zu prüfen.

Auch hier kann in beiden Fällen kein positiver Kapitalwert und damit ein wirtschaftlicher Betrieb der Kombination aus BHKW und AKM erreicht werden. Die Kombination aus AKM

und BHKW Sokratherm 201 kW_{el} weist einen Kapitalwert in Höhe von -321.227 € auf. Wird das oben beschriebene BHKW EAW 238 kW_{el} verwendet, so beträgt der Kapitalwert -385.594 €. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass die Substitution der KKM durch die AKM den Strombedarf deutlich reduziert. BHKW in der Objektversorgung weisen aber im Wesentlichen nur durch die Eigenstromproduktion und damit die Verringerung des Netzstrombezuges einen wirtschaftlichen Betrieb auf. Durch die Verringerung der Stromkennzahl des Objektes wird die Grundlage der Wirtschaftlichkeit genommen. Hinzu kommt, dass die Eigenstromproduktion durch die hohe Leistung der Anlagen nicht gefördert wird. Möglicherweise könnten Stirlingmotoren besser für das betrachtete Objekt geeignet sein, da sie eine geringe Stromkennzahl aufweisen. Ökologisch gesehen ist die Umstellung von KKM auf AKM von Vorteil, da der Strombezug reduziert wird, was sich positiv auf die CO₂-Emissionen und den Primärenergieverbrauch auswirkt. Hier werden die Werte des Szenarios 2 bezüglich CO₂-Emissionsminderung und Primärenergieeinsparung teilweise deutlich unterschritten.

Abschließend sei erneut angemerkt, dass die Ermittlung des Kältebedarfes auf äußerst konservativen Schätzungen basiert, da keine entsprechenden Daten vorhanden waren. Mit Hilfe einer Messung des Strombedarfes der KKM kann die realitätsnahe Erstellung eines Kältelastgangs sichergestellt werden. Mit diesen Daten sollten die Simulationen erneut durchgeführt werden, um den wirtschaftlichen Betrieb verschieden angetriebener BHKW zu prüfen. AKM weisen zudem in der Regel dann einen wirtschaftlichen Betrieb auf, wenn die benötigte Wärme entweder kostenfrei als Abwärme zur Verfügung steht, oder wenn der Kältebedarf nur in den Sommermonaten vorhanden ist und nicht einen Großteil des Strombedarfes durch die Nutzung einer KKM ausmacht. Im letzteren Fall kann durch den Kältebedarf in den Sommermonaten die Laufzeit des BHKW verlängert und ein weiterer Strombezug aus dem Netz vermieden werden. Im vorliegenden Fall scheint die Nutzung einer AKM durch den ganzjährigen Kältebedarf zur Herstellung des benötigten Raumklimas nicht von Vorteil zu sein.

3.7 Vergleich und Bewertung der Ergebnisse

Anhand der berechneten Kapitalwerte und dynamischen Amortisationszeiten, welche auf detaillierten Simulationen der einzelnen Szenarien basieren, soll im Folgenden eine vergleichende Bewertung mit anschließender Handlungsempfehlung erfolgen. Hierbei muss die wirtschaftlichste Variante nicht zwingend auch die ökologischste Lösung sein.

Die ermittelten Kapitalwerte und dynamischen Amortisationszeiten sind zum Vergleich in **Tabelle 6** dargestellt. Der Übersichtlichkeit halber werden die gewählten Kombinationen der einzelnen Szenarien nochmal dargestellt (KS = Kesselsanierung, WS = Wärmespeicher). Hier wird deutlich, dass der Verlauf dieser beiden Kennzahlen gegenläufig ist.

Szenario	Aggregat(e)	Kapitalwert nach 10 a [€]	Dyn. Amortisationszeit [a]
KS	Erdgaskessel	-11.860	> 10
BHKW & KS & WS	f.u.n.k.e. 50 kW _{el}	104.376	4,17
BHKW & KS & WS	Sokratherm 71 kW _{el}	129.948	3,65
BHKW & KS & WS	2G 100 kW _{el}	67.356	5,24
BHKW & KS & WS	K&S 100 kW _{el}	76.356	5,13
BHKW & KS & WS	f.u.n.k.e. 105 kW _{el}	46.119	7,1
BHKW & KS & WS PV	PV (Sokratherm 71 kW _{el}) ¹¹	-3.097	> 10
BHKW & KS & WS & AKM	Sokratherm 71 kW _{el} & AKM	-166.730	> 10
BHKW & KS & WS & AKM	Sokratherm 205 kW _{el} & AKM	-321.227	> 10
BHKW & KS & WS & AKM	EAW 238 kW _{el} & AKM	-385.594	> 10

Tabelle 6: Vergleich der wirtschaftlichen Kennzahlen aller Szenarien

In allen Varianten durchweg positive Kapitalwerte konnten mit einer Strom- und Wärmeversorgung durch BHKW realisiert werden. Besonders die Motoren geringerer elektrischer Leistung weisen die höchste Wirtschaftlichkeit auf. Wie bereits erwähnt, bietet sich im Rahmen einer Feinanalyse die Simulation verschiedener Aggregate mit variierenden Stromkennzahlen im Leistungsbereich von 70 kW_{el} an. Auch bei starken Abweichungen der wichtigsten Eingangsparameter haben die durchgeführten Sensitivitätsanalysen gezeigt, dass sich der Betrieb von Aggregaten der genannten Leistung noch lohnen kann. Möglichst kurze Amortisationszeiten werden in der Regel bei großen und mittelständischen Unternehmen gefordert. Da es sich bei dem Auftraggeber um die Stadt Oberhausen handelt, sind möglicherweise auch die berechneten Amortisationszeiten von knapp fünf Jahren akzeptabel. Es kann folglich eine deutliche Empfehlung für den Einsatz eines BHKW ausgesprochen werden.

¹¹ Bei einem Betrachtungszeitraum in Höhe von 15 Jahren beträgt der Kapitalwert der PV-Anlage 2.320 €.

Anhand der negativen Kapitalwerte könnten die Varianten 1, 3 und 5 zunächst ausgeschlossen werden. Eine einfache Sanierung der Kesselanlage sollte trotz geringen Aufwandes nicht erfolgen, da die CO₂-Emissionsminderung und Primärenergieeinsparung äußerst gering sind und die Amortisationszeit deutlich größer als zehn Jahren ist. AKM weisen basierend auf den Simulationsergebnissen für das dargestellte Objekt keinen wirtschaftlichen Betrieb auf. Bedingt durch die Datengrundlage konnten die Simulationsergebnisse jedoch nicht validiert werden. Der Trend an sich lässt sich zwar durch die hohe Stromeinspeisung der BHKW in das Netz der öffentlichen Versorgung bedingt durch die starke Verringerung des Strombedarfes erklären, jedoch ist an dieser Stelle eine weitere Feinanalyse mit vorheriger Messung des Strombedarfes der KKM zu empfehlen, um den tatsächlichen Kältebedarf zu ermitteln und so eine höhere Güte der Simulationen garantieren zu können. Hier könnten sich weitere Aufträge anschließen.

Die Installation einer PV-Anlage zur zusätzlichen Stromerzeugung weist zwar nur einen geringen Kapitalwert auf, lässt sich aber mit vergleichsweise geringem Aufwand realisieren. Hier kann eine Umsetzung in Kombination mit einem BHKW grundsätzlich empfohlen werden, da neben der ökologischen Effizienz noch der Darstellungseffekt hinzukommt. BHKW stehen meist in Kellerräumen oder Heizungszentralen, die für Besucher von öffentlichen Objekten nicht einsehbar sind. Eine große PV-Anlage auf dem Dach des Glaspavillons ist für jeden sichtbar und kann besser "vermarktet" werden.

So sollten für die Lösungen BHKW bzw. BHKW mit unterstützender PV-Anlage Feinanalyse basierend auf konkreten Angeboten und unter Einbezug der Abhängigkeit der Raumheizung von der Luftfeuchtigkeit erfolgen. Zuvor sind jedoch jegliche weitere Energieeinsparmaßnahmen durchzuführen, da diese den Betrieb und damit die Wirtschaftlichkeit der Erzeugungsanlagen stark beeinflussen.

4 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wurde im ersten Schritt der Energiebedarf für das Schloss Oberhausen analysiert und auf die verschiedenen Endenergien Strom, Wärme und Kälte aufgeteilt. Die wichtigsten Ergebnisse basierend auf der vorhandenen Datengrundlage und den anschließend synthetisierten Lastgängen sind in **Tabelle 7** mit farblicher Bewertung dargestellt¹².

Szenario	Aggregat	Kapitalwert nach 10 a [€]	Jährl. Ein- sparung [€]	Jährl. dis- kont. Ein- sparung [€]	Dyn. Amortisa- tionszeit [a]
BHKW & KS & WS	Sokratherm 71 kW_{el}	129.948	46.154	29.575	3,65
BHKW & KS & WS	f.u.n.k.e. 50 kW _{el}	104.376	37.755	23.899	4,17
BHKW & KS & WS	K&S 100 kW _{el}	76.356	43.252	27.992	5,13
BHKW & KS & WS	2G 100 kW _{el}	67.356	40.855	27.026	5,24
BHKW & KS & WS	f.u.n.k.e. 105 kW _{el}	46.119	38.906	24.280	7,1
PV	-	2.320 ¹³	3.400	1.667	> 10
Kesselsanierung (KS)	Erdgaskessel	-11.860	1.942	1.155	> 10
BHKW & KS & WS & AKM	Sokratherm 71 kW _{el}	-166.730	27.725	18.429	> 10
BHKW & KS & WS & AKM	Sokratherm 205 kW _{el}	-321.227	22.142	16.074	> 10
BHKW & KS & WS & AKM	EAW 238 kW _{el}	-385.594	22.259	12.477	> 10

Tabelle 7: Simulationsergebnisse aller Szenarien

Da die Datengrundlage bis auf den gemessenen Stromverbrauch sehr spärlich war, musste anhand verschiedener Vorgehensweisen auf den Wärme- und Kältebedarf geschlossen werden, was eine gewisse Unsicherheit mit sich bringt. Aus diesem Grund ist eine umfassende energetische Analyse durch hochauflösende Messungen von Strom- und Erdgasbezug in zeitlicher und örtlicher Auflösung nachdrücklich zu empfehlen. Ebenso ist der Betrieb der KKM

¹² Abkürzungen: BHKW = Blockheizkraftwerk, KS = Kesselsanierung, WS = Wärmespeicher, PV = Photovoltaik, AKM = Absorptionskältemaschine.

¹³ Der Betrachtungszeitraum beträgt in diesem Fall 15 Jahre.

durch geeignete Geräte zu monitoren und anschließend zu analysieren. Erst mit einer umfassenden Datengrundlage, die über einen Zeitraum von mehreren Monaten erstellt werden sollte (um den saisonalen Einfluss auf die Energieverbräuche darstellen zu können), kann eine entsprechende KWK-Anlage detailliert ausgelegt und simuliert werden.

Alle betrachteten BHKW-Lösungen aus Szenario 2 weisen einen positiven Kapitalwert sowie hohe durchschnittliche, jährliche Einsparungen auf und können zur Strom- und Wärmeversorgung des Schlosses ausdrücklich empfohlen werden, da die spezifische Verbrauchsstruktur des Objektes für den wirtschaftlichen Betrieb von KWK-Anlagen eine besonders hohe Eignung aufweist. Gleiches gilt für die zusätzliche Stromerzeugung mittels PV-Anlage. Auch wenn hier die zusätzlichen Einsparungen überschaubar sind, so müssen gleichzeitig der geringe Aufwand dieser Maßnahme sowie deren hoher Prestigewert berücksichtigt werden. Auch nach ökologischen Aspekten sind die Szenarien 2 und 3 deutlich zu empfehlen, da sich sowohl Primärenergieeinsparungen als auch eine Reduktion der CO₂-Emission in allen Varianten im Vergleich zum Referenzszenario ergeben.

Die beste Eignung weist das BHKW Sokratherm 71 kW_{el} mit einer **durchschnittlichen jährlichen Einsparung** in Höhe von **46.154 €** und einer **dynamischen Amortisationszeit** von **3,65 Jahren** auf. Die Reduktion der **CO₂-Emission** sowie die **Primärenergieeinsparung** liegen bei **1.371 t** (bei Betrachtung des BRD-Mix) bzw. **7.266 MWh** bei einem Betrachtungszeitraum von zehn Jahren. Da weitere Energieeinspar- bzw. Effizienzmaßnahmen in naher Zukunft zu einer Reduktion von Strom- und Wärmebedarf im betrachteten Objekt führen, sollten diese zunächst realisiert werden. Anschließend sollten im Rahmen einer Feinanalyse das zuvor betrachtete BHKW sowie bedingt durch die Einsparmaßnahmen ebenfalls Anlagen in einem anderen Leistungsbereich erneut betrachtet werden.

Die Simulation der verschiedenen Szenarien hat gezeigt, dass nicht zwangsweise jede zuvor passend erscheinende Energieversorgungslösung sowohl ökonomisch als auch ökologisch effizient ist. Hier sollte geprüft werden, ob eine über den Betrachtungszeitraum von zehn Jahren unwirtschaftlich erscheinende Anlage wegen der hohen Emissionsminderungen und Primärenergieeinsparungen trotzdem umgesetzt werden kann.

Die Installation eines entsprechenden BHKW kann in jedem Fall empfohlen werden, da im Rahmen der Analyse Lösungen mit einer dynamischen Amortisationszeit von weniger als vier Jahren ermittelt wurden. Auch der zusätzliche Betrieb einer PV-Anlage ist insbesondere durch den geringen Aufwand (im Vergleich zu den anderen Maßnahmen) und den hohen Prestigewert zu empfehlen.

Die Simulationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen durchgeführt und zusätzlich anhand eines kommerziellen Simulationsprogrammes überprüft und validiert. Dennoch können in der Umsetzung Abweichungen zu den in diesem Projekt erzielten Ergebnissen auftreten, wofür seitens des LET keine Garantie übernommen wird.

5 Verzeichnisse

V 1	Literaturverzeichnis	42
V 2	Abbildungsverzeichnis	44
V 3	Tabellenverzeichnis	45

V 1 Literaturverzeichnis

- [1] IT.NRW INFORMATION UND TECHNIK NORDRHEIN-WESTFALEN: *Wirtschaftswachstum in NRW 2016 bei +1,8 Prozent*. URL https://www.it.nrw.de/presse/pressemitteilungen/2017/pres_080_17.html
- [2] GÜNTER DEHOUST, DR. DORIS SCHÜLER, REGINE VOGT, JÜRGEN GIEGRICH: *Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft : Am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz*. Dessau-Roßlau, 2010
- [3] AGENTUR FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN: *Spezifische CO₂-Emissionen der Stromerzeugung (g CO₂/kWh)*. URL https://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/bundesland/NRW/kategorie/strom/auswahl/733-spezifische_co2-emis/#goto_733
- [4] EVO - ENERGIEVERSORGUNG OBERHAUSEN AG: *Kennzeichnung der Stromlieferung 2016*. 01.11.2017
- [5] M. SCHMIDT, C. SPITTA, V. VRANGOS: *roadmap | KWK.NRW - Einsatz von KWK-Technologien in NRW - Detailfragestellungen und Forschungsagenda : Abschlussbericht zum Verbundprojekt*. Essen, 2015
- [6] ASUE ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR SPARSAMEN UND UMWELTFREUNDLICHEN ENERGIEVERBAUCH E.V.; ASUE Arbeitskreis Brennstoffzellen/BHKW, Carmen Klein, Kostja Rozanski, Markus Gailfuß, Jürgen Kukuk, Thomas Beck (Mitarb.): *BHKW-Kenndaten 2014/2015 : Module, Anbieter, Kosten*. Essen : Verlag für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch, 2014
- [7] FORSCHUNGSSTELLE FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT E.V.; Michael Beer, Tobias Schmid, Dominik Bernhard, Gilbert Vogler (Mitarb.): *Flex - Flexible Betriebsweisen von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen : Teilprojekt des Forschungsvorhabens "EnEff:Stadt - Chancen und Risiken von KWK im Rahmen des IEKP"*. München, 2012
- [8] *Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz - KWKG)* (idF v. 17. 7. 2017) (2015-12-21). URL https://www.gesetze-im-internet.de/kwkg_2016/KWKG.pdf
- [9] *Energiesteuergesetz (EnergieStG)* (idF v. 10. 3. 2017) (2006-07-15). URL <https://www.gesetze-im-internet.de/energiestg/EnergieStG.pdf>
- [10] *Stromsteuergesetz (StromStG)* (idF v. 27. 8. 2017) (1999-03-24). URL <https://www.gesetze-im-internet.de/stromstg/StromStG.pdf>
- [11] *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017)* (idF v. 17. 7. 2017) (2014-07-21). URL https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2017.pdf

-
- [12] BDEW - BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT E.V.: *Biomethan: Erneuerbar, speicherbar, flexibel*. URL <https://www.bdew.de/energie/erdgas/biomethan-erneuerbar-speicherbar-flexibel/>
- [13] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *EU-Kommission genehmigt vollständige EEG-Entlastung von Bestandsanlagen bei der Eigenversorgung*. 19.12.2017. URL <http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2017/20171219-eu-kommission-genehmigt-vollstaendige-eeg-entlastung-von-bestandsanlagen-bei-eigenversorgung.html>

V 2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Gasbezug und Außentemperatur (September - November 2017) ..	5
Abbildung 2: Gemessener Außentemperaturverlauf und ermittelter Wärmelastgang (2016)	6
Abbildung 3: Übersicht monatlicher Gesamtwärmebedarf und monatliche Spitzenlast (2016)	6
Abbildung 4: Geordnete Jahresdauerlinie des Wärmebedarfes (2016)	7
Abbildung 5: Gemessener Jahresstromverbrauch	7
Abbildung 6: Gemessener Stromlastgang (2016)	8
Abbildung 7: Übersicht monatlicher Gesamtstrombedarf und monatliche Spitzenlast (2016)	9
Abbildung 8: Relative Luftfeuchtigkeit und Außentemperatur (2016)	10
Abbildung 9: Hergeleiteter Kältelastgang und zugehörige Jahresdauerlinie	11
Abbildung 10: Betrachtung verschiedener Motoren in der geordneten Jahresdauerlinie (Wärme)	17
Abbildung 11: Benutzungsstunden der Erzeugungsanlagen in den Szenarien 1 und 2	22
Abbildung 12: Aufteilung des Gasverbrauches für BHKW und Spitzenlastkessel inkl. Wärmespeicher ...	23
Abbildung 13: Wirtschaftliche Simulationsergebnisse Szenario 2	24
Abbildung 14: Wärmeerzeugung BHKW/SLK im Jahresverlauf	25
Abbildung 15: Betriebsergebnisse BHKW Sokratherm 71 kW _{el}	26
Abbildung 16: Amortisationszeiten BHKW Sokratherm 71 kW _{el}	26
Abbildung 17: Primärenergieeinsparungen nach zehn Jahren für die Szenarien 1 und 2	27
Abbildung 18: CO ₂ -Einsparung bei verschiedenen Emissionsfaktoren der Szenarien 1 und 2	28
Abbildung 19: Kapitalwertveränderung bei Sensitivierung verschiedener Eingangsparameter	29
Abbildung 20: Dynamische Amortisationszeit bei Sensitivierung verschiedener Eingangsparameter (Szenario 2)	30
Abbildung 21: Kapitalwert nach zehn Jahren mit verschiedener EEG-Umlageregulung	31
Abbildung 22: Jährliche Einsparungen bei verschiedenen EEG-Umlageregulungen	31
Abbildung 23: Stromerzeugung durch PV-Anlage (2016)	32
Abbildung 24: CO ₂ -Emissionsminderung nach zehn Jahren (Szenarien 2 und 3)	33
Abbildung 25: Betriebsergebnisse BHKW Sokratherm 71 kW _{el} mit PV-Anlage	33
Abbildung 26: Geordnete Jahresdauerlinie Wärmebedarf mit und ohne AKM (2016)	34
Abbildung 27: Wärmeerzeugung BHKW (Sokratherm 71 kW _{el})/SLK im Jahresverlauf (Szenario 5)	35
Abbildung 28: Stromerzeugung und -nutzung der verschiedenen BHKW (Szenario 2)	48
Abbildung 29: Aufteilung der Wärmeerzeugung SLK und BHKW (Szenario 2)	48
Abbildung 30: Periodenergebnisse BHKW Sokratherm 71 kW _{el} (Szenario 2)	49
Abbildung 31: Wärmeerzeugung BHKW (f.u.n.k.e. 50 kW _{el})/SLK im Jahresverlauf (Szenario 2)	50
Abbildung 32: Wärmeerzeugung BHKW (2G 100 kW _{el})/SLK im Jahresverlauf (Szenario 2)	50
Abbildung 33: Wärmeerzeugung BHKW (K&S 100 kW _{el})/SLK im Jahresverlauf (Szenario 2)	50
Abbildung 34: Wärmeerzeugung BHKW (f.u.n.k.e. 105 kW _{el})/SLK im Jahresverlauf (Szenario 2)	51
Abbildung 35: Wärmeerzeugung BHKW (Sokratherm 201 kW _{el})/SLK im Jahresverlauf (Szenario 5)	51
Abbildung 36: Wärmeerzeugung BHKW (EAW 238 kW _{el})/SLK im Jahresverlauf (Szenario 5)	51

V 3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Förderung für KWK-Strom nach dem KWKG	14
Tabelle 2: Ausgewählte BHKW Szenario 2.....	17
Tabelle 3: Ausgewählte AKM-Daten.....	20
Tabelle 4: Investitions- und Betriebskosten der AKM.....	20
Tabelle 5: Ausgewählte neue BHKW Szenario 5.....	35
Tabelle 6: Vergleich der wirtschaftlichen Kennzahlen aller Szenarien.....	37
Tabelle 7: Simulationsergebnisse aller Szenarien.....	39
Tabelle 8: Investitionskosten BHKW und Wärmespeicher (netto)	46
Tabelle 9: Wartungskosten BHKW (netto).....	46
Tabelle 10: Betrachtete Wärmespeicher	46
Tabelle 11: Teillastdaten der betrachteten BHKW.....	47
Tabelle 12: Module und Leistungen PV-Anlage.....	48

6 Anhang

Investitions- und Wartungskosten der verschiedenen Versorgungsvarianten. Hierbei handelt es sich um Nettokosten. Für die erfolgten Wirtschaftlichkeitsberechnungen wurde die Mehrwertsteuer in Höhe von 19 % berücksichtigt.

Bezeichnung	Modulkosten [€]	Transport bis Abnahme [€]	Einbindung [€]	Zusatzkosten (Puffer) [€]	Speicherkosten [€]	Gesamt [€]
Kessel	12.997	-	5.000			17.997
f.u.n.k.e. 50 kW _{el}	68.876	4.133	26.862	10.000	3.250	113.121
Sokratherm 71 kW _{el}	86.478	5.189	33.726	10.000	3.937	139.330
2G 100 kW _{el}	108.004	6.480	42.121	10.000	3.903	170.509
K&S 100 kW _{el}	108.004	6.480	42.121	10.000	4.456	171.061
f.u.n.k.e. 105 kW _{el}	100.126	6.008	45.057	10.000	4.085	165.275

Tabelle 8: Investitionskosten BHKW und Wärmespeicher (netto)

Hersteller	Bezeichnung	Wartungskosten [Cent/kWh _{el}]
f.u.n.k.e. senergie	f.u.n.k.e. 50 kW _{el}	2,51
Sokratherm	Sokratherm 71 kW _{el}	2,3
2G	2G 100 kW _{el}	2,11
Kuntschar & Schlüter	K&S 100 kW _{el}	2,11
f.u.n.k.e. senergie	f.u.n.k.e. 105 kW _{el}	1,68

Tabelle 9: Wartungskosten BHKW (netto)

BHKW	Kapazität [kWh]	Kosten [€]	Förderung [€]
f.u.n.k.e. 50 kW _{el}	312	4.921	1.671
Sokratherm 71 kW _{el}	456	6.380	2.443
2G 100 kW _{el}	448	6.303	2.400
K&S 100 kW _{el}	592	7.627	3.171
f.u.n.k.e. 105 kW _{el}	492	6.720	2.636

Tabelle 10: Betrachtete Wärmespeicher

BHKW	P_{el} [kW]	P_{th} [kW]	$P_{Brennt.}$ [kW]	η_{el}	η_{th}
------	---------------	---------------	--------------------	-------------	-------------

100 % Last					
f.u.n.k.e. 50 kW _{el}	50	78	148	34	53
Sokratherm 71 kW _{el}	71	114	204	35	56
2G 100 kW _{el}	100	112	260	38,4	42,9
K&S 100 kW _{el}	100	148	290	35	51
f.u.n.k.e. 105 kW _{el}	105	123	269	39	46
75 % Last					
f.u.n.k.e. 50 kW _{el}	38	68	125	30	54
Sokratherm 71 kW _{el}	53	88	159	33	55
2G 100 kW _{el}	75	91	205	36,5	44,4
K&S 100 kW _{el}	75	119	233	32	41
f.u.n.k.e. 105 kW _{el}	79	106	229	34	46
50 % Last					
f.u.n.k.e. 50 kW _{el}	25	56	103	24	54
Sokratherm 71 kW _{el}	35	69	122	29	57
2G 100 kW _{el}	50	69	152	32,9	45,5
K&S 100 kW _{el}	50	95	184	27	52
f.u.n.k.e. 105 kW _{el}	53	87	188	28	46

Tabelle 11: Teillastdaten der betrachteten BHKW

Bei den in Szenario 3 erfolgten Berechnungen berücksichtigte Module und Zusatzleistungen.

<i>In spez. Investitionskosten der PV-Anlagen enthaltene Module und Leistungen</i>
PV-Module inkl. Leistungsgarantie
Wechselrichter inkl. Lieferung und Installation
Ton-Rundsteuer-Empfänger (EEG-Anlagen) inkl. Lieferung und Installation
Datenlogger und Anlagenüberwachungssoftware inkl. Einrichtung und Garantie
Kleinverteiler zur Aufnahme von Sicherungen oder Sensoren inkl. Montage
PV-Montagesystem inkl. 10 Jahre Garantie
PV-Montage durch Facharbeiter und Elektroinstallateur
Solarkabel und Stecker inkl. Lieferung und Montage
Wandzählerschrank einschließlich Einbauten

Verlegesystem (Kabel etc.)
Inbetriebnahme der Anlage und Unterweisung durch Fachpersonal
Baustellenkosten (Gerüste etc.)
Formelles (Prüfung der Netzeinspeisung, Anlagenanmeldung etc.)

Tabelle 12: Module und Leistungen PV-Anlage

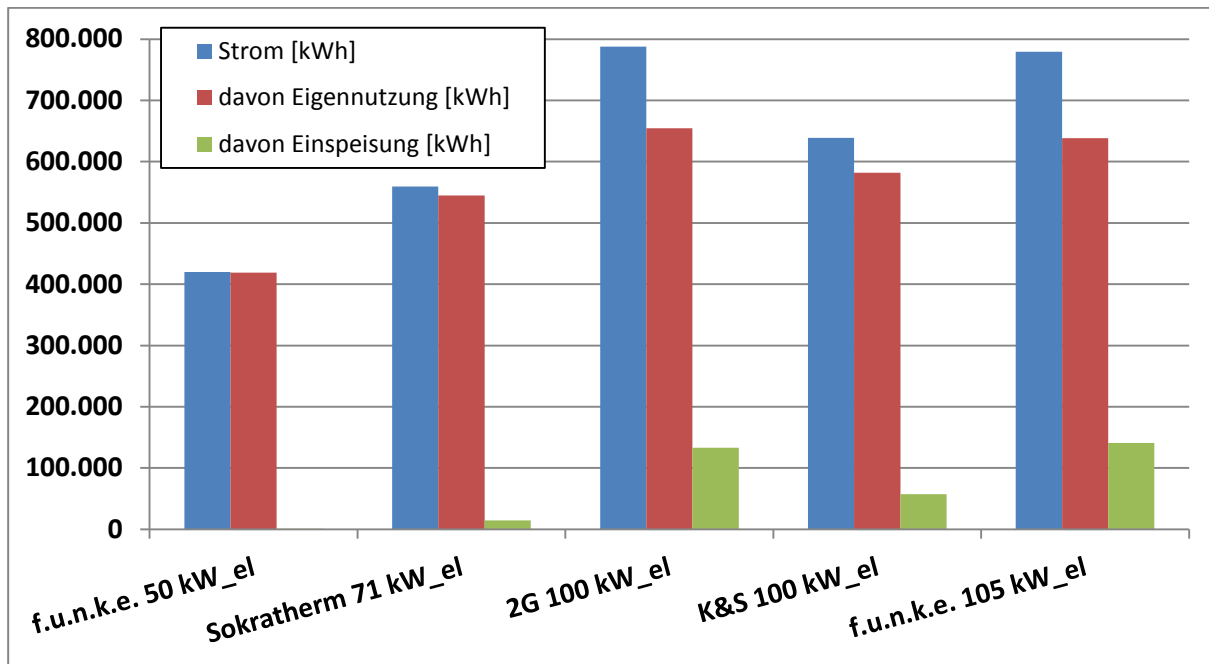


Abbildung 28: Stromerzeugung und -nutzung der verschiedenen BHKW (Szenario 2)

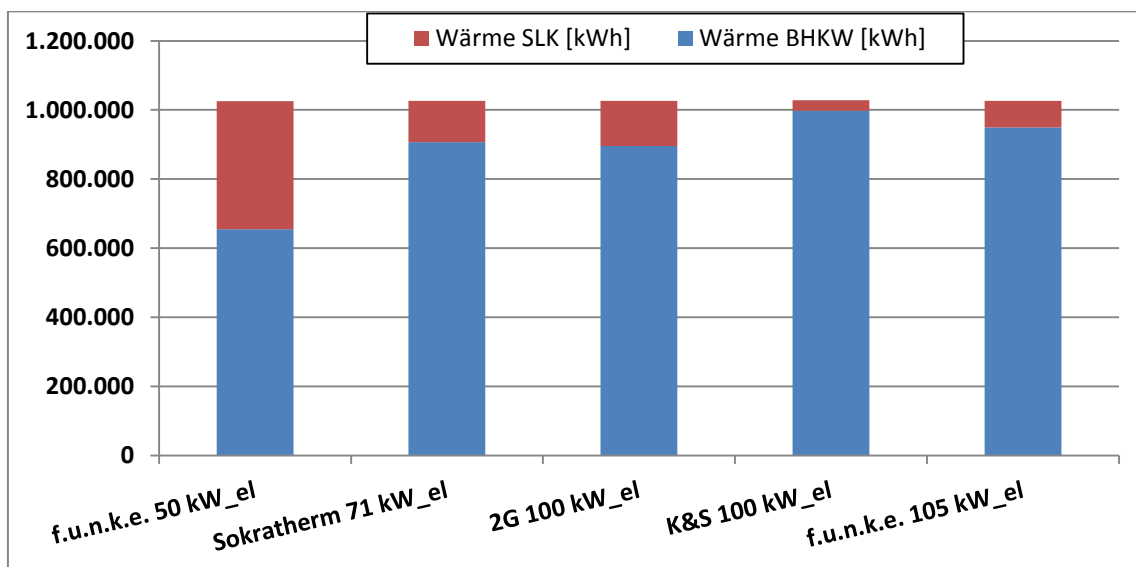


Abbildung 29: Aufteilung der Wärmeerzeugung SLK und BHKW (Szenario 2)

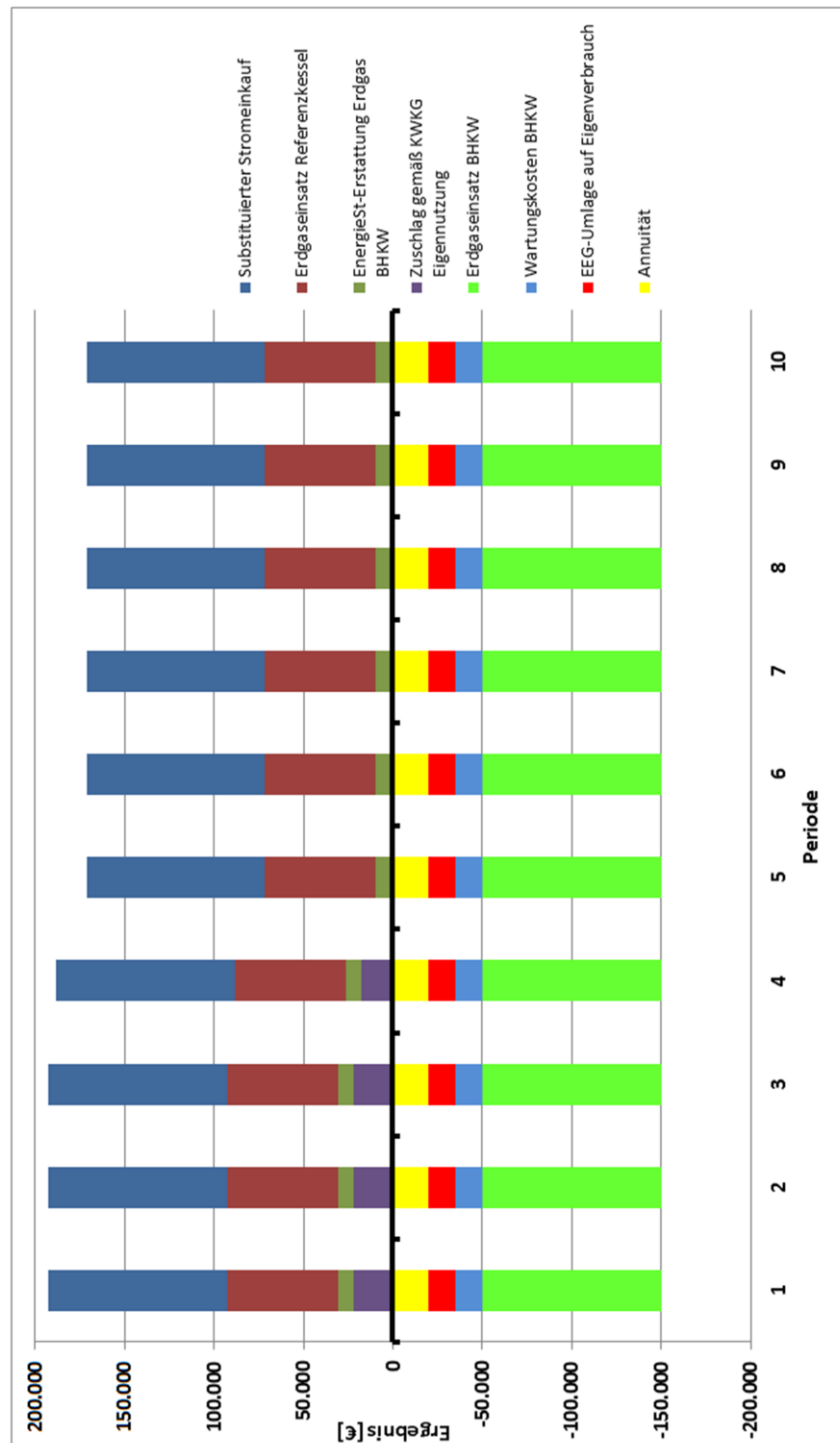


Abbildung 30: Periodenergebnisse BHKW Sokratherm 71 kW_{el} (Szenario 2)

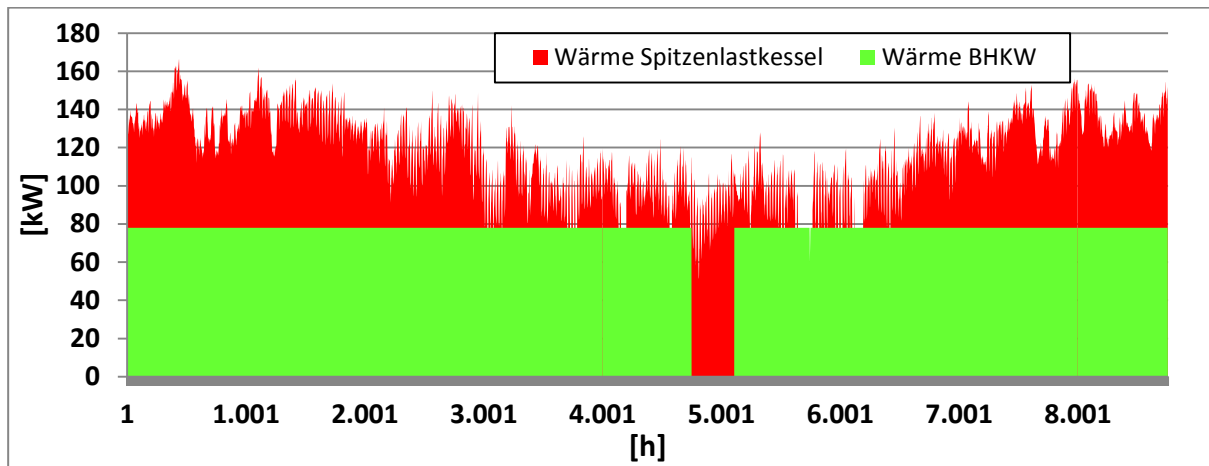


Abbildung 31: Wärmeerzeugung BHKW (f.u.n.k.e. 50 kW_{el})/SLK im Jahresverlauf (Szenario 2)

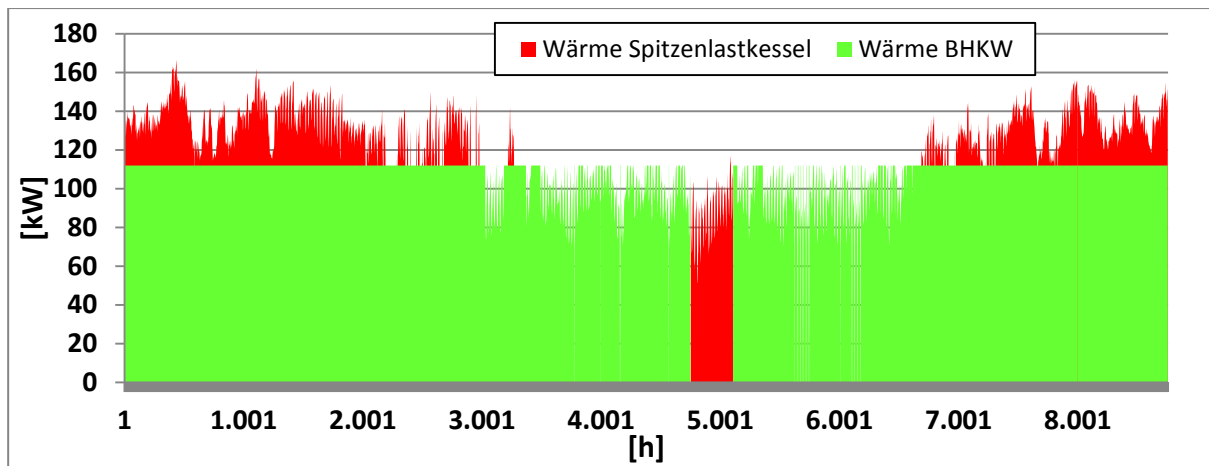


Abbildung 32: Wärmeerzeugung BHKW (2G 100 kW_{el})/SLK im Jahresverlauf (Szenario 2)

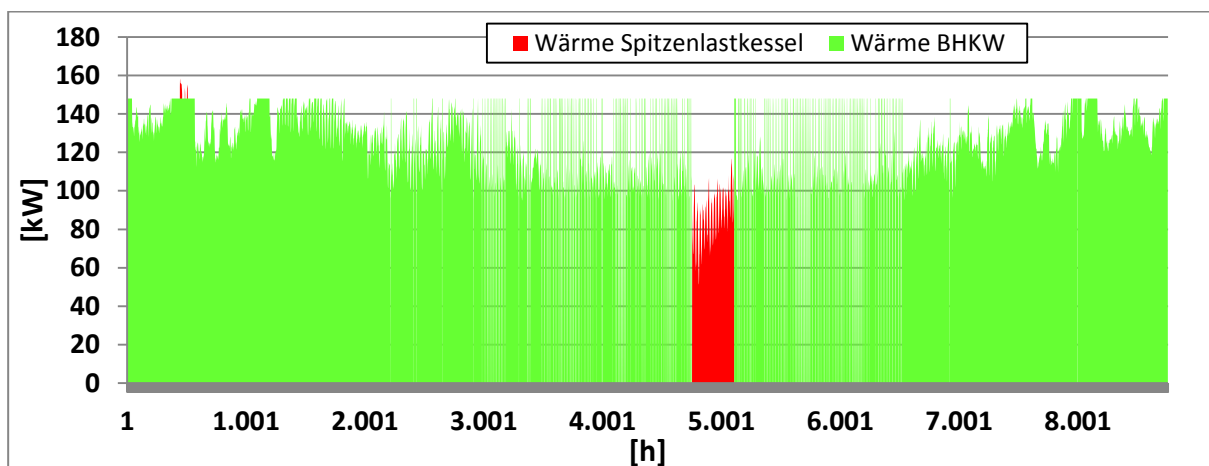


Abbildung 33: Wärmeerzeugung BHKW (K&S 100 kW_{el})/SLK im Jahresverlauf (Szenario 2)

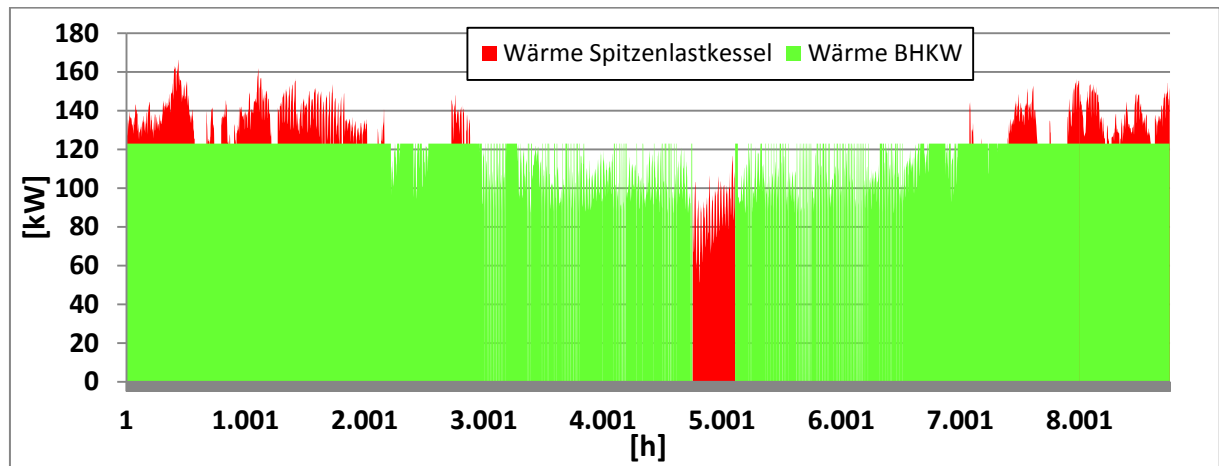


Abbildung 34: Wärmeerzeugung BHKW (f.u.n.k.e. 105 kW_{el})/SLK im Jahresverlauf (Szenario 2)

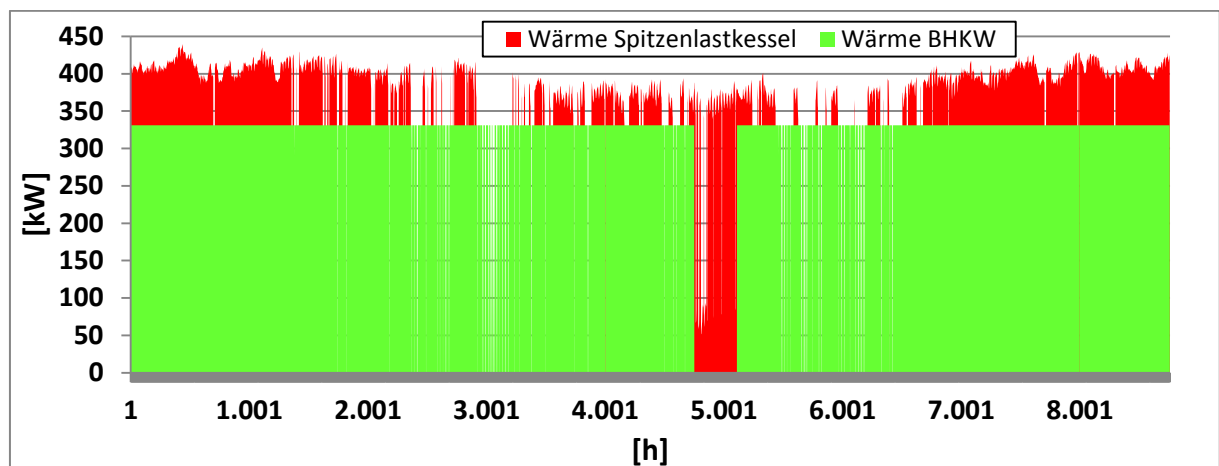


Abbildung 35: Wärmeerzeugung BHKW (Sokratherm 201 kW_{el})/SLK im Jahresverlauf (Szenario 5)

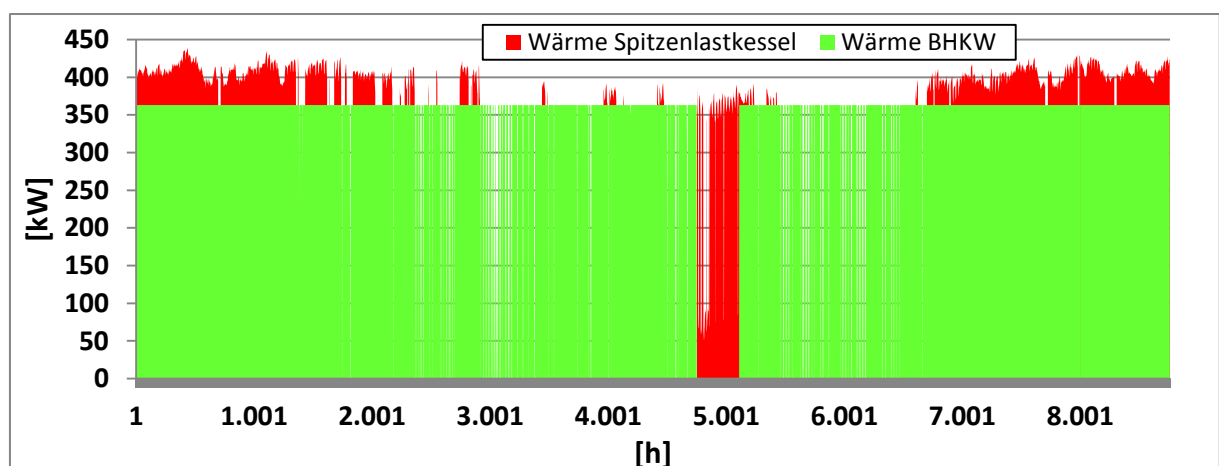


Abbildung 36: Wärmeerzeugung BHKW (EAW 238 kW_{el})/SLK im Jahresverlauf (Szenario 5)