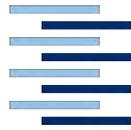




Landeshauptstadt
München
Baureferat



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Eigenverbrauchsoptimierung einer öffentlichen Schule mit Schwimmbad durch optimale Dimensionierung von PV und BHKW mit Hilfe von Simulationen in Matlab

Bachelorthesis im Studiengang

Umwelttechnik - Bachelor of Science in Environmental Engineering

vorgelegt von

Alexander Stephan Matr. Nr. 1955613

Gutachter: Prof. Dr. Heiner Kühle (HAW Hamburg)

Gutachter: Dipl.-Ing. Univ. Markus Kaps (Baureferat München)

Die Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt in Zusammenarbeit mit der
Landeshauptstadt München Baureferat Hochbau.

München am 19. Februar 2016

Thema der Bachelorthesis

Eigenverbrauchsoptimierung einer öffentlichen Schule mit Schwimmbad durch optimale Dimensionierung von PV und BHKW mit Hilfe von Simulationen in Matlab

Stichworte

Photovoltaik, PV, Blockheizkraftwerk, BHKW, Schwimmbad, Schwimmbecken, Matlab, Lastverlauf, energetische Sanierung

Kurzfassung

Durch den wachsenden Ausbau von Photovoltaik in der Bundesrepublik Deutschland in den letzten Jahren wurde die Einspeisevergütung von Solarstrom sukzessive gesenkt. Da es nun größeren ökonomischen Nutzen verspricht, hat sich das Interesse von vollständiger Einspeisung hin zum Eigenverbrauch verlagert. Zugleich hat sich die Technik der Kraft-Wärme-Kopplung in den letzten Jahren stetig weiterentwickelt und bietet eine sinnvolle Unterstützung der Wärmeversorgung bei gleichzeitiger Stromproduktion.

Die Landeshauptstadt München betreut mehrere Schulen mit integriertem Schwimmbad, die einen ganzjährigen Wärmebedarf zu decken haben. Diese Arbeit soll prüfen, wie diese beiden Technologien sinnvoll einzusetzen sind. Es sollen Veränderungen des Eigenverbrauches und der Wirtschaftlichkeit beurteilt werden, die bei Installation einer Photovoltaik-Anlage zu erwarten sind. Ferner soll geprüft werden, wie sich eine zuvor durchgeführte energetische Optimierung der elektrischen Verbraucher auf die Planung der Photovoltaik-Anlage auswirkt.

Topic of bachelor thesis

Optimization of self consumption for a public school with integrated swimming pool by optimized dimensioning of photovoltaic and block heat power plant with matlab simulation

Keywords

Photovoltaik, PV, block heat and power plant, combined heat and power, CHP, swimming pool, Matlab, load curve, energy saving renovation

Abstract

The increasing development of photovoltaic in Federal Republic of Germany during the last years was followed by successively lowered feed-in compensation. In consequence, interest in full feed-in translocated to self consumption because of better economical benefit. At the same time, combined heat and power technology advanced permanently and offered useful support of heat supply with simultaneous power production.

Munich, the state capital of Bavaria, maintained multiple schools with integrated swimming pool that have an all-year heat requirement. This paper examined how both of these technologies can be usefully utilised and what kind of changes in self consumption and profitability can be expected with installation of a photovoltaic power plant. As a further object of investigation, this paper examined which impact a previously executed energetical optimization of electric consumers have on planning a photovoltaic power plant.

Abkürzungsverzeichnis

\varnothing Leistung _{thermisch}	durchschnittliche thermische Leistung
°C	Grad Celsius
€	Euro
T€	Tausend Euro
a	Anno (Jahr)
A	Fläche
$A_{Dachfenster}$	Fläche des Dachfensters
$A_{Schornstein}$	Fläche des Schornsteins
B	Brennwert
el	elektrisch
F_{MwSt}	Faktor Mehrwertsteuer
h	Stunden
k	Kosten Teilmenge
$k_{Betrieb}$	Kosten Betrieb
k_{kWh}	Kosten je produzierter Kilowattstunde
$K_{Instandsetzung}$	Kosten der Instandsetzung
$K_{Schornsteinfeger}$	Kosten des Schornsteinfegers
$k_{Zähler}$	Kosten für Miete des Einspeisezählers
K	Kosten gesamt
K_{Anlage}	Investitionskosten der gesamten Photovoltaik-Anlage
K_{BHKW}	Kosten für das Blockheizkraftwerk
$K_{Einbindung}$	Anschlusskosten
$K_{Installation}$	Kosten der Installation
$K_{Investition}$	Kosten der gesamten Investition
K_{Modul}	Investitionskosten je 1 kW Peak Leistung
$K_{Speicher}$	Kosten für Pufferspeicher
kW	Kilowatt
kW_{peak}	maximale erreichbare Leistung
kWh	Kilowattstunde

<i>Leistung_{el}</i>	elektrische Leistung
<i>Leistung_{Stufe}</i>	Leistung je Stufe
<i>Leistung_{th}</i>	thermische Leistung
m	Meter
mm	Millimeter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
Nm ³	Normkubikmeter
<i>P</i>	Leistung
<i>P_{el}</i>	elektrische Leistung
<i>P_{th}</i>	thermische Leistung
<i>P_{peak}</i>	maximale erreichbare Leistung
<i>R²</i>	Erklärte Varianz
th	thermisch
W	Watt
<i>Wirkungsgrad_{Brenner}</i>	Wirkungsgrad der Gasbrenner
<i>z</i>	Zustandszahl
<i>Z_{Investition}</i>	Zuschuss zur Investition
<i>Z_{Speicher}</i>	Zuschuss zum Pufferspeicher
Abb.	Abbildung
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BHKW	Blockheizkraftwerk
BGBI	Bundesgesetzblatt
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BNA	Bundesnetzagentur
BSW Solar	Bundesverband Solarwirtschaft
e.V.	eingetragener Verein
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEX	European Energy Exchange
EVG	Elektronisches Vorschaltgerät
GUS	Gemeinschaft Unabhängiger Staaten (Armenien, Aserbaidshan, Weißrussland, Kasachstan, Kirgisistan, Moldawien, Russland,

Tadschikistan, Turkmenistan, Ukraine, Usbekistan)

k.A.	keine Angabe
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KVG	Konventionelles Vorschaltgerät
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
LED	Licht-emittierende Diode
LHM	Landeshauptstadt München
NGF	Netto-Grundfläche
p.a.	per anno
Pf	Pfennig
PV	Photovoltaik
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
SWM	Stadtwerke München
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
VBH	Vollbenutzungsstunden
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WW	Warmwasser

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1 GAS- UND STROMPREISE DER LANDESHAUPTSTADT MÜNCHEN	13
ABBILDUNG 2 INSTALLATIONSKOSTEN PHOTOVOLTAIKANLAGEN <100kWPEAK	14
ABBILDUNG 3 AUSGANGSSZENARIEN	16
ABBILDUNG 4 SICHT AUF DAS HAUPTGEBÄUDE VON DER BERGMANNSTRASSE.....	17
ABBILDUNG 5 LUFTBILD MIT PARZELLARKARTE © BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG	18
ABBILDUNG 6 ABWEICHUNG DER THEORETISCHEN ERZEUGUNG DER ZWEI DÄCHER.....	22
ABBILDUNG 7 GEORDNETES WÄRMELASTPROFIL	25
ABBILDUNG 8 WÄRMELASTPROFIL	26
ABBILDUNG 9 BHKW LEISTUNGSWERTE.....	27
ABBILDUNG 10 GEEIGNETE DACHFLÄCHEN FÜR PHOTOVOLTAIKMODULE	30
ABBILDUNG 11 ELEKTRISCHER LASTVERLAUF	33
ABBILDUNG 12 UNTERER BEREICH MIT DEN DAUERVERBRAUCHERN	34
ABBILDUNG 13 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES TAGES	35
ABBILDUNG 14 LASTVERLAUF AN EINEM TAG VOR UND NACH DER OPTIMIERUNG	35
ABBILDUNG 15 EIGENVERBRAUCHSANTEIL PHOTOVOLTAIK.....	36
ABBILDUNG 16 EIGENDECKUNGSANTEIL PV	37
ABBILDUNG 17 STROMGESTEHUNGSKOSTEN	40
ABBILDUNG 18 GEWINN UND VERLUST DER PV-ANLAGEN ÜBER 20 JAHRE	41
ABBILDUNG 19 AMORTISATION PHOTOVOLTAIK.....	42

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1 BRENNWERTKESSEL.....	18
TABELLE 2 HEIZUNGSPUMPEN	18
TABELLE 3 WARMWASSERSPEICHER	19
TABELLE 4 UNTERTISCHBOILER	19
TABELLE 5 SCHWIMMBADLÜFTUNG.....	19
TABELLE 6 SCHWIMMBADFILTER.....	20
TABELLE 7 KÜCHENGERÄTE	20
TABELLE 8 LEUCHTMITTEL	20
TABELLE 9 RECHERCHE BHKW-LEISTUNGSDATEN	52
TABELLE 10 RECHERCHE PHOTOVOLTAIKMODULE.....	53
TABELLE 11 RECHERCHE HEIZUNGSPUMPEN	53
TABELLE 12 RECHERCHE LEUCHTMITTEL	54

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
Abkürzungsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	7
1 Einleitung / Motivation	10
2 Grundlagen	11
2.1 Zu Grunde liegende Gesetze EEG, KWKG	11
2.1.1 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG).....	11
2.1.2 Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG).....	12
2.2 Wirtschaftliche Aspekte	13
2.2.1 Strom-/Gaspreisentwicklung der LHM (Rahmenvertrag).....	13
2.2.2 Entwicklung der Anlagenpreise.....	13
2.2.3 Netzparität.....	14
2.3 Technik	14
2.3.1 Stromnetzentlastung	14
2.3.2 Deckung des täglichen Lastgangs durch PV (Korrelation).....	15
2.3.3 Deckung der Grundlast durch BHKW (Volllaststunden).....	15
2.3.4 Lebensdauererhöhung von BHKW durch längere Laufzeiten	15
2.3.5 Laufzeiterhöhung durch Pufferspeicher	15
3 Szenarien	16
4 Datenerhebung	17
4.1 Begehung	17
4.1.1 Rahmendaten.....	17
4.1.2 Kartenansicht	18
4.1.3 Technische Installation der Liegenschaft	18
4.2 Datenreihen	21
4.2.1 Strom, Gas und Solar.....	21
4.2.2 Datenaufbereitung.....	22
5 Auswertung	24
5.1 Matlab als Simulationsumgebung	24
5.2 Dimensionierung BHKW	25
5.3 Photovoltaik-Anlage	29
5.3.1 Solarpotentialkarte	29
5.3.2 Ermittelte Daten aus Bauplan und Berechnungen	30
5.4 Optimierter Lastverlauf	31

5.4.1	Maßnahmenvorschläge zur Optimierung des Lastverlaufes	31
5.4.2	Berechnung	33
5.5	Eigenverbrauch/Eigendeckung der Photovoltaik-Anlage.....	36
5.6	Eigenverbrauch/Eigendeckung des BHKW	37
5.7	Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	38
5.7.1	Kostenaufteilung	38
5.7.2	Photovoltaik.....	38
5.7.3	Blockheizkraftwerk	42
6	Fazit und Ausblick	47
7	Quellenverzeichnis	49
8	Anhang	52

1 Einleitung / Motivation

In der Bundesrepublik Deutschland hat man sich darauf verständigt, auf Atomkraft zu verzichten (Lenz, 2012), Treibhausgasemissionen zu verringern und regenerative Energien auszubauen, um die Energieerzeugung nachhaltig zu gestalten.

Im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) werden Ausbauziele von regenerativen Energietechnologien wie Photovoltaik oder Windkraft beschrieben und mit Vergütungen und Förderungen wird dieser Ausbau gesteuert. Die Steuerung erfolgt durch feste Vergütungssätze für jede in das Netz eingespeiste Kilowattstunde (kWh). Die Vergütung wird für jede regenerative Erzeugungstechnik separat festgelegt.

Mit dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) werden darüber hinaus auch Blockheizkraftwerke (BHKW) gefördert, da diese einen sehr hohen Wirkungsgrad im Hinblick auf die eingesetzte Primärenergie erzielen. Dies erreichen sie durch das Erzeugen von elektrischer Energie bei gleichzeitiger Nutzung der Abwärme. Derzeit werden bei der Landeshauptstadt München (LHM), bis auf eine Ausnahme, keine BHKW eingesetzt.

Im Einsatz von BHKW, kann sich die Stadt München im Umgang mit Photovoltaik (PV) – Anlagen auf Erfahrungen vieler Jahre stützen. Bei der bisherigen Planung stand die Maximierung der Photovoltaik-Anlagengröße im Vordergrund, da es bis vor kurzem wirtschaftlicher war, den Strom einzuspeisen, anstatt ihn zu verbrauchen. Die Folge waren Photovoltaik-Anlagen, die auf Einspeisung optimiert waren, da der erzeugte Strom großzügig vergütet wurde. Mit fallender Einspeisevergütung und steigenden Strompreisen ist nun Eigenverbrauch ökonomisch sinnvoller geworden. In dieser Arbeit soll eine Photovoltaik-Anlage am tatsächlichen Lastgang der Liegenschaft dimensioniert werden.

Bei dem in dieser Arbeit betrachteten Gebäude handelt es sich um ein Schulgebäude, das in in dieser oder ähnlicher Form häufiger in der Stadt München vorkommt. Es bietet Platz für rund 400 Schüler, hat eine Turnhalle und ein Schwimmbad.

Schwimmbäder müssen auch im Sommer beheizt werden und erhöhen damit den Wärmebedarf eines Gebäudes beträchtlich. Andererseits stellt es für ein BHKW ein gutes Ausgangsszenario dar, durch viele Vollbenutzungsstunden (VBH) eine bessere Wirtschaftlichkeit mit hoher Auslastung zu erzielen.

Die Betreuung öffentlicher Liegenschaften wird, im Unterschied zu privat geführten Gebäuden, in unterschiedliche Abteilungen aufgeteilt. So gibt es Abteilungen für den Bauunterhalt, die Heizung-Lüftung-Sanitär Anlagen, den Betrieb technischer Anlagen (inkl. Energiemanagement und Energiebeschaffung) und einige mehr. Außerdem beziehen die Abteilungen Gelder aus verschiedenen Energieeffizienz- und Klimaschutzprogrammen der Landeshauptstadt München, um in ihrem Aufgabenfeld tätig werden zu können.

So war es bisher nicht notwendig, dass die für den Bau einer Photovoltaik-Anlage zuständige Abteilung zuvor Rücksprache mit der Abteilung für Energiemanagement

halten musste, um zum Beispiel Verbrauchsdaten abzufragen. Dies könnte jetzt, wo sich der Fokus auf den Eigenverbrauch verschoben hat, im schlimmsten Fall zu einer Fehlinvestitionen führen. Diesen Zusammenhang zu untersuchen, soll ein weiteres Ziel dieser Arbeit sein.

Solarthermische-Anlagen werden in dieser Arbeit nicht untersucht, da sie in der Landeshauptstadt München nicht mehr eingesetzt werden. Das liegt hauptsächlich an schlechten Erfahrungen, hervorgerufen durch Komplexität, Wartung und Kosten der Anlagen.

2 Grundlagen

2.1 Zu Grunde liegende Gesetze EEG, KWKG

2.1.1 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)

Das *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien*, mit dem Kurztitel *Erneuerbare-Energien-Gesetz*, ist im Jahre 2000 in Kraft getreten. Das Ziel dieses Gesetzes ist die Reduktion des Einsatzes von fossilen Brennstoffen, welche den Treibhauseffekt vorantreiben und Abhängigkeiten gegenüber Dritten fördern. Im Jahr 2002 ist mit dem *Gesetz zur geordneten Beendigung der Kernenergienutzung zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität* noch ein weiteres Ziel hinzugekommen.

Dem EEG liegt das *Stromeinspeisungsgesetz* von 1991 zugrunde. Allerdings war die Einspeisevergütung zu der Zeit weit unter dem Niveau des EEG. Im Jahre 2000, kurz vor der Einführung des EEG, waren es für Solarstrom 16,10 Pf/kWh, und nach Einführung 99 Pf/kWh (Leuschner, o.D.).

Über das EEG werden regenerative Energien wie Photovoltaik oder Windkraft direkt gefördert. Das geschieht über feste Vergütungssätze je eingespeister Kilowattstunde und über eine garantierte Abnahme durch die Netzbetreiber.

Dies hatte auch Erfolg. Es wurde viel Geld in den Ausbau von Solar- und Windkraft investiert, sodass 2014 ein Anteil erneuerbarer Energien von 26,2 % an der deutschen Stromerzeugung erreicht wurde (bdew, 2015).

Weiterhin sind die Preise für neue Anlagen stark gefallen. Bei der Photovoltaik sogar um rund 73 % in den Jahren 2006 – 2014 (Ziegler, 2015). Daher wurde die Einspeisevergütung sukzessive angepasst.

Bis April 2012 wurde die Einspeisevergütung auch bei Eigenverbrauch grundsätzlich gezahlt. Seitdem müssen Betreiber von Anlagen mit einer Leistung größer 10 Kilowatt Peak 10 % ihres Stromes jedoch selbst verbrauchen oder vermarkten. Seit der Überarbeitung des EEG 2014 muss ein Anteil der EEG-Umlage auf den Eigenverbrauch gezahlt werden. 2016 liegt dieser Anteil bei 35 % (BSW Solar, 2014).

Mit der Überarbeitung des EEG in 2014 wurden auch neue Ausbauziele festgelegt. Bis 2025 soll der Anteil regenerativer Energien bei 40 – 45 % und bis 2035 bei 55 – 60 % liegen (BMWi, 2014; EEG, 2014)

2.1.2 Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG)

Das *Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung*, mit dem Kurztitel *Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG)*, trat am 19 März 2002 in Kraft. Ziel und Zweck des Gesetzes besteht darin, im Rahmen der Klimaschutzziele die Stromerzeugung aus Kraft-Wärmekopplung bis 2020 auf 25 % zu erhöhen (BGBl. I S. 1092).

Die Primärenergie in Deutschland wird nicht nur zur Stromgewinnung, sondern zum größeren Teil zur Wärmegewinnung eingesetzt (BMW, 2015). Hier kann der Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung zu großen Effizienzsteigerungen und Energieeinsparungen verhelfen. Wegen der Verwendung von meist fossilen Brennstoffen für den Betrieb stellen BHKW eine Brückentechnologie dar (Berliner Energieagentur, 2010). Es gibt zwar schon BHKW, die in Kombination mit Biogasanlagen oder Faultürmen von Kläranlagen ihren Dienst verrichten. Der weit größere Teil setzt aber auf Erdgas als Energieträger, da es leicht über das Gasnetz verfügbar ist.

Um das Ziel der Erhöhung des KWK-Anteils zu erreichen, hat die Bundesregierung verschiedene Förderungen beschlossen. Dies sind Vergütungen für eingespeiste und eigenverbrauchte elektrische Arbeit, Investitionszuschüsse für das BHKW abhängig von der elektrischen Leistung und Investitionszuschüsse für den Pufferspeicher (BAFA, 2015, 2014). Auf die einzelnen Förderungen wird im Verlauf dieser Arbeit noch näher eingegangen.

2.2 Wirtschaftliche Aspekte

2.2.1 Strom-/Gaspreisentwicklung der LHM (Rahmenvertrag)

Die Landeshauptstadt München kauft am Strom- und Gasmarkt Teilmengen (Tranchen) ein bis zwei Jahre im Vorraus an der Energiebörse (EEX). Die Preise, welche in dieser Arbeit verwendet werden, beruhen auf dem Mittelwert aller eingekauften Tranchen inklusive Steuern, Umlagen und Netznutzungsentgelte eines Jahres. Dies wird als Rahmenvertrag bezeichnet, da der Versorgungsvertrag nicht für einzelne, sondern für alle Objekte, ausgenommen der Wohngebäude, abgeschlossen wird. Das betrifft fast alle öffentlichen Gebäude der Stadt, einschließlich dem in dieser Arbeit betrachteten Schulgebäude.

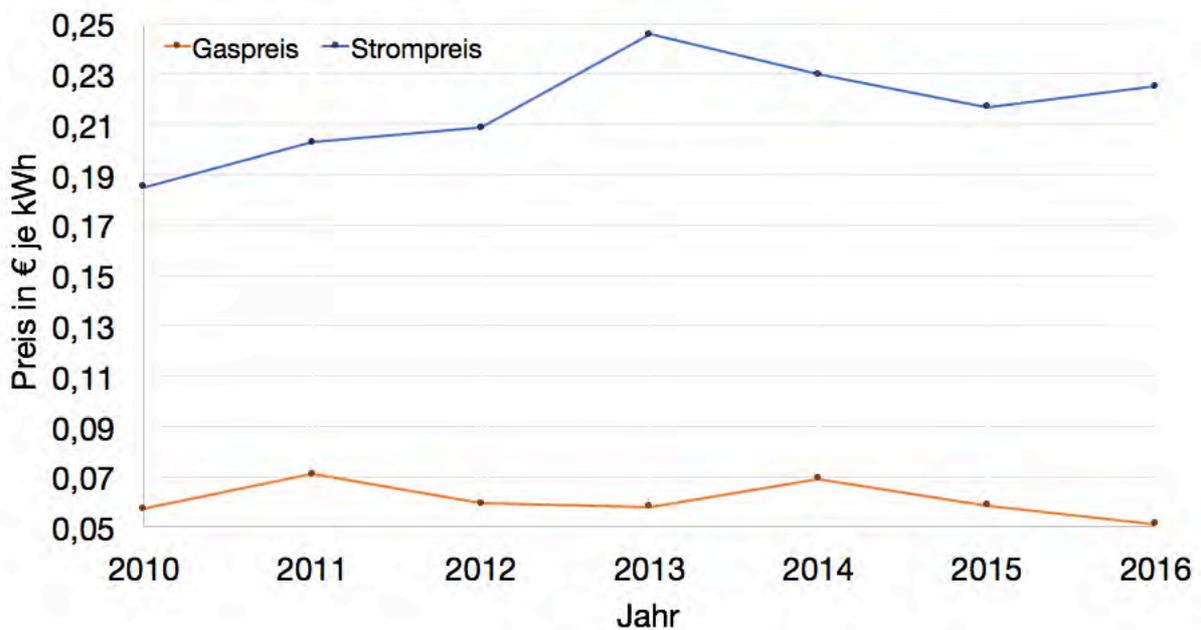


Abbildung 1 Gas- und Strompreise der Landeshauptstadt München von 2010-2016

2.2.2 Entwicklung der Anlagenpreise

Deutschland hat frühzeitig damit begonnen, durch das EEG und die damit verbundene Einspeisevergütung, Photovoltaik-Anlagen zu fördern. Diese Subventionen sorgten für eine positive wirtschaftliche Entwicklung in der Solarbranche und halfen dabei, die Photovoltaik Module in größeren Stückzahlen herstellen und günstiger anbieten zu können. Die Forschungsinvestitionen wurden gesteigert, was sich positiv auf den Wirkungsgrad der Module auswirkte. Seit der Einführung 2002 gab es einen regelrechten Boom, sodass Deutschland bis 2014 das Land mit der höchsten installierten Solarleistung weltweit war. Seit 2015 hat China die Führung übernommen (Quaschnig, 2016).

Abbildung 2 zeigt den rasanten Preisverfall für schlüsselfertige Photovoltaik-Anlagen seit 2006. Die Preise wurden über das ganze Bundesgebiet erhoben und repräsentieren Anlagen mit einer Leistung bis 100 Kilowatt Peak (Ziegler, 2015).

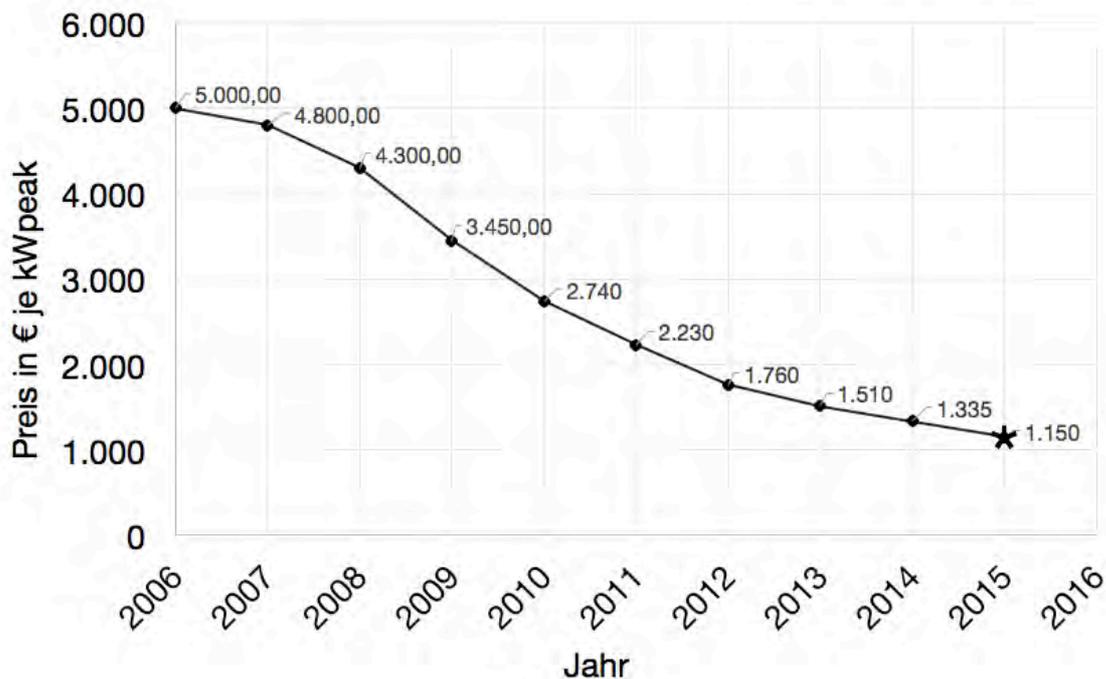


Abbildung 2 Installationskosten Photovoltaikanlagen <100kWpeak (Schlüsselfertig) *Schätzwert(Ziegler, 2015)

Die Daten sind allerdings nicht direkt übertragbar, da die Stadt München keine schlüsselfertigen Anlagen errichtet, sondern architektonisch integrierte Photovoltaik-Anlagen bevorzugt. So kommen noch Kosten für beispielsweise Ausschreibung, Planung und Architekten hinzu. Laut Erfahrungen aus dem Baureferat belaufen sich die Mehrkosten auf ca. 15 – 25 %.

2.2.3 Netzparität

Netzparität ist ein Begriff, der sich im Zusammenhang mit Photovoltaik-Anlagen etabliert hat und beschreibt den Punkt, an dem die Stromgestehungskosten für eine erzeugte Kilowattstunde identisch mit dem Preis für eine Kilowattstunde aus dem Netz ist (Kost et al., 2013).

2.3 Technik

2.3.1 Stromnetzentlastung

Ein häufiges Thema in den politischen Debatten ist der Ausbau der Stromnetze. Einer der Gründe ist, dass im Norden Deutschlands durch Windkraft mehr Strom erzeugt wird, als in der Region verbraucht werden kann. Der Ausbau der Stromnetze soll die erforderlichen Kapazitäten schaffen, den in Norddeutschland erzeugten Strom in die südlichen Bundesländer zu leiten. Die südlichen Bundesländer haben dagegen einen Standortvorteil bei der Photovoltaik, da die mittlere Globalstrahlung hier um bis zu 32,6 % höher ausfallen kann als in Norddeutschland (Kost et al., 2013: 39). Die Erhöhung des Eigenverbrauches der Solarstromproduktion kann dazu beitragen, die Einspeisung in das Stromnetz zu verringern und die Netze dadurch zu entlasten.

2.3.2 Deckung des täglichen Lastgangs durch PV (Korrelation)

Eine Annahme dieser Arbeit besteht darin, dass der Lastgang der Schule eine hohe Kongruenz zum Erzeugungsprofil einer Photovoltaik-Anlage aufweist:

- Schulbeginn um 7:00 Uhr
- mittags hoher Verbrauch durch das Aufwärmen von Schulspeisen
- zwei Ganztagsklassen sind bis 15:00 Uhr anwesend
- die Schwimmhalle wird bis ca. 19:00 Uhr und die Turnhalle bis ca. 22 Uhr genutzt

2.3.3 Deckung der Grundlast durch BHKW (Volllaststunden)

Die Schule weist aufgrund des Schwimmbeckens einen ganzjährigen Wärmebedarf auf. Außerdem benötigt der Nassbereich, unter Berücksichtigung möglicher Schimmelbildung und zum Schutz der Bausubstanz, eine ausreichende Belüftung. Die dafür notwendige Lüftungsanlage erzeugt dabei eine elektrische Grundlast.

Diese Faktoren lassen ein BHKW sinnvoll erscheinen, denn für eine ökonomische Nutzung sollte ein BHKW mindestens 4000 Vollbenutzungsstunden pro Jahr erreichen (Klingebl, 2009: 36). Es wurde bereits nachgewiesen, dass 7000 Vollbenutzungsstunden und mehr im Zusammenhang mit einem BHKW, Schwimmbad und Pufferspeicher möglich sind (Lindenfels and Wydor, 2009). In einer Machbarkeitsstudie wird empfohlen, ein BHKW wenn möglich im durchgehenden Betrieb einzusetzen (Stappenbeck et al., 2010, p. 63).

2.3.4 Lebensdauererhöhung von BHKW durch längere Laufzeiten

Ein Erdgas-BHKW besteht in der Hauptsache aus einem Motor, ähnlich dem in einem Auto. Die Lebenserwartung eines Motors hängt dabei auch von der Art und Weise der Nutzung ab. Häufige Kaltstarts wirken sich beispielsweise negativ auf die Laufleistung aus. Je länger ein Motor dagegen ohne Unterbrechung in Betrieb ist, desto mehr Zeit arbeitet er in seinem optimalen Betriebszustand mit dem geringsten Verschleiß.

2.3.5 Laufzeiterhöhung durch Pufferspeicher

Pufferspeicher sind stark isolierte Wasserspeicher und dienen dazu temporäre Schwankungen des Wärmebedarfes auszugleichen. So kann man einem BHKW mehr Vollbenutzungsstunden ermöglichen, da es bei zu geringem Wärmebedarf den Wärmestrom in den Speicher umlenken kann. Der Pufferspeicher kann dann zu Hauptlastzeiten eine zusätzliche Wärmequelle neben dem BHKW und Spitzenlastkessel darstellen.

3 Szenarien

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, die Veränderung des Eigenverbrauchsanteils im Zusammenhang mit einer Photovoltaikanlage in vier verschiedenen Ausgangsszenarien zu ermitteln (Abbildung 3).

So soll untersucht werden, welchen Einfluss die Optimierung des elektrischen Lastverlaufes eines Gebäudes vor Installation einer Photovoltaik-Anlage auf den Eigenverbrauchsanteil hat.

Eine weitere Untersuchung prüft den Einfluss eines BHKW auf die Photovoltaik-Anlagengröße und den Eigenverbrauchsanteil.

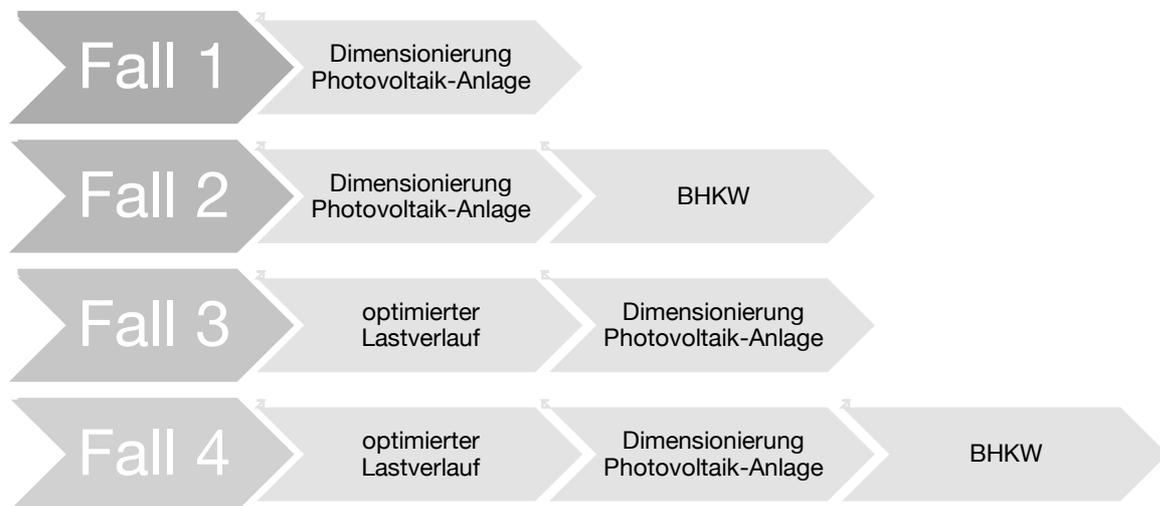


Abbildung 3 Ausgangsszenarien

Fall 1 Dimensionierung PV ohne BHKW an Lastverlauf

Für den gemessenen Lastverlauf der Liegenschaft wird eine Photovoltaik-Anlage in verschiedenen Größen anhand eines Erzeugungsverlaufes dimensioniert, um das Optimum der Anlagengröße in Bezug auf den Eigenverbrauch zu ermitteln.

Fall 2 Dimensionierung PV mit BHKW an Lastverlauf

Wie Fall 1, nur wird zusätzlich zur Photovoltaik-Anlage ein BHKW bei der Stromerzeugung eingeplant, das primär für die Wärmeerzeugung des Schwimmbades genutzt wird und dabei Strom erzeugt.

Fall 3 Dimensionierung PV ohne BHKW an optimiertem Lastverlauf

Wie Fall 1, allerdings mit einem optimierten Lastverlauf, welcher Optimierungsvorschläge beinhaltet, die aus einer durchgeführten Begehung der Liegenschaft resultieren.

Fall 4 Dimensionierung PV mit BHKW an optimiertem Lastverlauf

Wie Fall 3, mit einem zusätzlichen BHKW, um veränderte Auswirkungen in Bezug auf Fall 2 zu untersuchen.

4 Datenerhebung

4.1 Begehung

Im Rahmen der Bachelorarbeit wurde am 17.11.2015 eine Begehung der Liegenschaft Grundschule Bergmannstr. 36, 80339 München (Schwanthalerhöhe) durchgeführt, um genauere Kenntnisse über das Gebäude mit seinen Verbrauchern zu erhalten. Dazu wurde ein detaillierter Bericht für das Baureferat der Landeshauptstadt München angefertigt, welcher an dieser Stelle in komprimierter Form wiedergegeben werden soll. Die Maßnahmenvorschläge werden auf jene reduziert, die einen direkten Einfluss auf den elektrischen Lastverlauf haben.



Abbildung 4 Sicht auf das Hauptgebäude von der Bergmannstraße

4.1.1 Rahmendaten

Gebäudefläche gesamt	6933,6 m ² NGF
Gebäudeanzahl	2
Gebäude 1	Hauptgebäude mit Schwimmbad / Baujahr 1891
Gebäude 2	Turnhalle mit Gymnastikraum / Baujahr 1950
Nutzer	390 Schüler, 32 Lehrer

4.1.2 Kartenansicht



Abbildung 5 Luftbild mit Parzellarkarte © Bayerische Vermessungsverwaltung 1.Schulgebäude 2.Turnhalle

4.1.3 Technische Installation der Liegenschaft

Das Heizsystem besteht aus zwei Erdgasbrennern, welche die gesamte Liegenschaft inklusive der Turnhalle, das Schwimmbecken und zwei Warmwasserspeicher versorgen. Das Schwimmbecken wird dabei über einen Gegenstromwärmetauscher versorgt. Die zwei Brennwertkessel sind von Viessmann (Vertomat) mit Brennern von Weishaupt (G1).

Tabelle 1 Brennwertkessel

	Firma	Model	Anschlusswert in kW	Baujahr
Hauptkessel	Viessmann	Vertomat	285	1996
Spitzenlastkessel	Viessmann	Vertomat	225	1996

Tabelle 2 Heizungspumpen

Firma	Typ	Stufen(los)	Leistung in W
Grundfos	UCP 50-60 Modell: A	3 Stufen	120 – 375
Grundfos	UP 20-45 N 150	1 Stufe	115
Grundfos	UPE 25-60 180	Stufenlos	40 – 100
Grundfos	UPE 50-120 / F	Stufenlos	65 – 790
Grundfos	UPE 32-60 180	Stufenlos	40 – 100
Grundfos	UPS 25-60 180	3 Stufen	40 – 100

Grundfos	UPE 32-80 180	Stufenlos	40 – 250
Grundfos	UPS 25-80 180	3 Stufen	140 – 245
		<i>Summe</i>	600 – 2075

Die Warmwasserspeicher (WW-Speicher) sind außenbeheizt und werden von der Heizungsanlage mitversorgt. Sie versorgen damit die Küche sowie die Duschen des Schwimmbades und der Turnhalle.

Tabelle 3 Warmwasserspeicher

Gerät	Firma	Modell	Volumen in Liter	Temperatur in °C	Baujahr
WW-speicher	Viessmann	VertiCell	250	Keine Anzeige	1996
WW-speicher	Viessmann	VertiCell	250	Keine Anzeige	1996

Einzelne Räume, die nicht mit Warmwasser aus den Warmwasserspeichern versorgt werden, stellen ihre Versorgung über einen Untertischboiler sicher.

Tabelle 4 Untertischboiler

Raum	Hersteller	Modell	Größe in Liter
Lehrerzimmer	Stiebel Eltron	SNU 10 SL	10
Hort	Siemens	CTDOB5C	5
Speiseraum	Stiebel Eltron	SNU 5 SL	5

Die Schwimmbadlüftung ist durchgehend in Betrieb, um die Lufttemperatur immer mindestens 2°C über der Wassertemperatur zu halten. Nur in den Sommerferien, wenn das Becken zur Revision geleert wird, wird die Lüftung abgestellt.

Tabelle 5 Schwimmbadlüftung

Gerät	Leistung in kW
Umwälzpumpe	0,07
Lüfter oben	0,29
Lüfter unten	0,29
Kompressor oben	2,2
Kompressor unten	2,2

Der Schwimmbadfilter, mit einer volumenstromgeregelten Umwälzpumpe (Frequenzumformer), läuft durchgehend auf Minimalleistung (ca. 1,6 kW). Wenn das Schwimmbad in Benutzung ist, wird die Leistung hochgefahren. Diese Regelung findet über Chlorzehrung im Wasser statt. Sobald das Becken genutzt wird, bindet sich das enthaltene Chlor an unerwünschte Stoffe und die Konzentration an freiem Chlor im Wasser sinkt. Über eine permanente Messung wird der sinkende Chlorgehalt bestimmt und damit Rückschlüsse auf die Beckennutzung gezogen. Dies ermöglicht die Steuerung der Filterleistung.

Die Filteranlage wird in den Sommerferien abgeschaltet.

Tabelle 6 Schwimmbadfilter

Gerät	Firma	Modell	Maximale Leistung in kW
Umwälzpumpe	Herborn Pumpen	3/50X-W2	2,2

Die Küche wird nur in der Mittagszeit genutzt, da ausschließlich gelieferte Mahlzeiten erwärmt werden.

Tabelle 7 Küchengeräte

Gerät	Firma	Modell	maximale Leistung in W
Tiefkühler	Viessmann	BN2048020901	464
Tiefkühler	Viessmann	BN2048020901	464
Tiefkühler	Viessmann	BN2048020901	464
Kühlschrank	Liebherr	profi line	ca. 150 *
Heißluftofen	Convothem Elektrogeräte GmbH	AR 72	18400
Spülmaschine	Hobart GmbH	ECOMAX602S-11	6600

* Werte von ähnl. Schrank nach Recherche

Kumulierte Leistung aller Leuchtmittel (Kellerlampen nicht gezählt, keine Relevanz)

$$P = 58 \text{ W} \cdot 556 + 18 \text{ W} \cdot 119 + 11 \text{ W} \cdot 58 + 36 \text{ W} \cdot 36 + 35 \text{ W} \cdot 16 \approx 36,3 \text{ kW}$$

Tabelle 8 Leuchtmittel

Bereich	Modell	Leistung in W	Anzahl	Vorschaltgerät
Klassenzimmer, Turnhalle (42)	FT8/58 W/840 (T8)	58	556	KVG
Flure, Decke	LT/18 W/840 (T8)	18	119	KVG
Flure, Wand	S 11W/830	11	58	KVG
Gymnastikraum	F/36 W/830 (T8)	36	36	KVG
Hort	FH/35 W/840 HE (T5)	35	16	EVG

4.2 Datenreihen

4.2.1 Strom, Gas und Solar

Das Baureferat nutzt ein eigens entwickeltes Datenerfassungs- und -übertragungssystem (GA-Knoten), welches auf einem Computer mit Linux oder BSD als Betriebssystem installiert ist. Die Daten der Messsysteme werden über Ethernet oder die serielle Schnittstelle dem System zugeführt. Die so erhobenen Daten werden in einer gemeinsamen Datenbank gesammelt. Leider sind nicht alle Datensätze vollständig oder fehlerfrei.

Für diese Liegenschaft wurde der Zeitraum vom 1.7.2012 – 30.6.2013 gewählt, da die Daten in diesem Zeitraum vollständig sind. Seit 2014 hat das Messsystem der Liegenschaft einen Defekt und überträgt keine Daten mehr.

Für diese Arbeit sind die Verbrauchsdaten der Schule relevant. Zum einen der elektrische Lastverlauf, um die Photovoltaik-Anlage an diesem zu dimensionieren. Zum anderen der thermische Lastverlauf, um die Leistung des BHKW zu ermitteln.

Der thermische Verlauf liegt nicht direkt vor, dafür jedoch der Gasverbrauch. Da in der Liegenschaft, neben der Heizanlage, keine Gasverbraucher installiert sind, kann über den Gasverbrauch direkt auf die Arbeit und somit über die Zeit auf die Leistung geschlossen werden. Die Auflösung beträgt dabei $0,1 \text{ m}^3$. Die zeitliche Auflösung beträgt bei beiden Reihen eine viertel Stunde.

Formel für die Berechnung des Energieinhaltes von Gas in kWh

$$\text{thermische Energiemenge} = \text{Volumen} \cdot \text{Brennwert} \cdot \text{Zustandszahl} = V \cdot B \cdot z$$

Das Erdgas der Stadtwerke München gehört zu der Gasfamilie *Naturgase Untergruppe H* (Methangehalt 87-99 %, Herkunft Nordsee und GUS Staaten) (Recknagel et al., 2011, p. 295) und hat einen Brennwert von $11,2 \text{ kWh/Nm}^3$ wobei Nm^3 für Normkubikmeter steht (SWM, 2016a). Die Zustandszahl wird aus einer komplexeren Formel errechnet, die aber in diesem Fall nicht von Relevanz ist. Den ausschlaggebenden Faktor stellt dabei die geodätische Höhe dar, die für einzelne Gebiete im Stadtbereich gesondert ausgegeben wird. Im Fall der Bergmannstr. 36 entspricht dies dem Gebiet der Schwanthalerhöhe mit einer Zustandszahl von 0,9159 (SWM, 2016b).

Der elektrische Lastverlauf liegt in diesem Fall als Datenreihe mit einer Auflösung von 1 kWh vor.

Für die Dimensionierung einer Photovoltaik-Anlage wurde außerdem auf Daten einer bestehenden Anlage im gleichen Zeitrahmen zurückgegriffen. Hierfür lagen Datenreihen von verschiedenen Gebäuden vor, die jedoch nicht in allen Parametern,

wie Azimut und/oder Anstellwinkel, mit dem untersuchten Gebäude übereinstimmten.

Die Photovoltaik-Anlage, welche der in der Grundschule am nächsten kommt, ist die der Turnhalle Riesstr. 50 mit einer Leistung von 46,2 kW Peak und einer Abweichung des Südazimutes von 5° und 8,4° im Anstellwinkel. Um diese Abweichungen zu kompensieren, wurde über den PV-Leistungsrechner PVGIS (Europäische Union, 2016) ein Monatsprofil beider Anlagen berechnet und die Abweichungen ermittelt. Über diese wurde mit Hilfe der Polynomregression eine Ausgleichsfunktion erstellt. Die Ausgleichsfunktion erklärt einen Varianzanteil von 97,2 %.

Ausgleichsfunktion

$$y = 1,58 \cdot 10^{-16}x^4 - 1,15 \cdot 10^{-11}x^3 + 2,3 \cdot 10^{-7}x^2 - 7,72 \cdot 10^{-4}x - 7,2$$

Erklärte Varianz der Ausgleichsfunktion

$$R^2 = 0,972$$

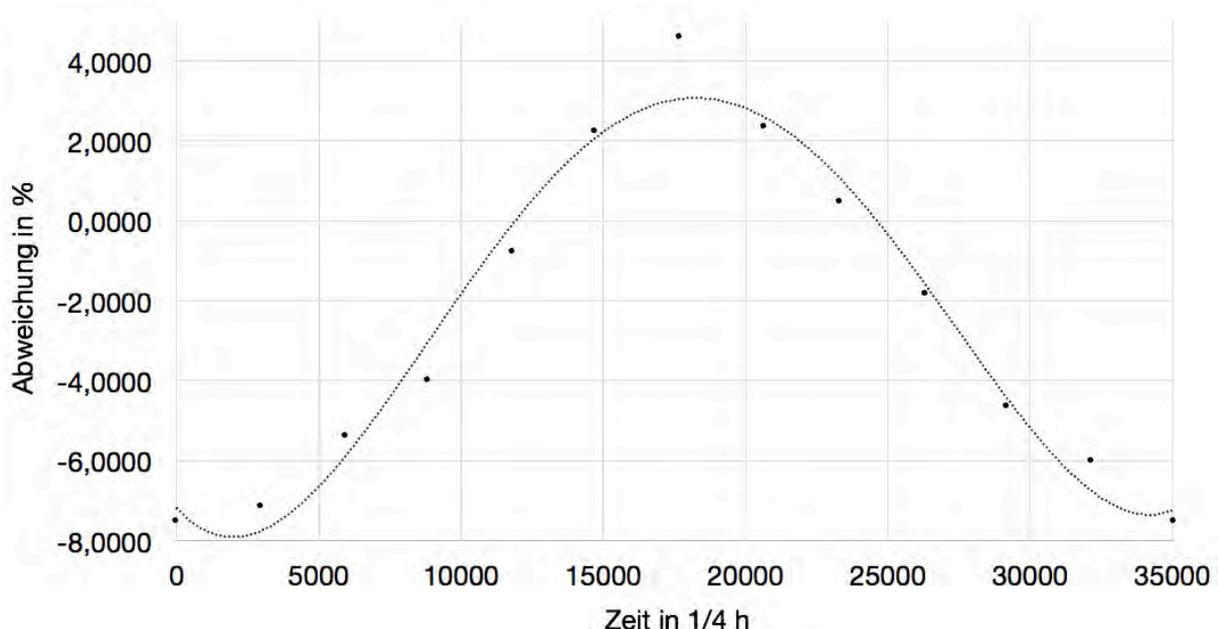


Abbildung 6 Abweichung der theoretischen Erzeugung der zwei Dächer

Um im weiteren Verlauf die PV-Daten zu dimensionieren, wurde der mit der Ausgleichsfunktion bereinigte Datensatz durch den ermittelten Maximalwert des Jahres geteilt. Der daraus resultierende Datensatz hat dadurch eine maximale Leistung von 1 kW Peak und kann im weiteren Verlauf der Berechnung zur Dimensionierung in Schritten von je 1 kW Peak genutzt werden.

4.2.2 Datenaufbereitung

Die Strom-, Gas-, und Photovoltaikdatenreihen wurden aus dem Datenbanksystem des Baureferates entnommen. Allerdings waren einige Fehler in den Daten

vorhanden, welche bereinigt wurden. Folgende Fehler sind dabei in den Strom-, und Gasdaten aufgetaucht und korrigiert worden.

1. Duplikate von Viertelstundenwerten wurden gelöscht.
2. Einzelne, fehlende Zeilen wurden durch die Differenz aus dem vorherigen und dem nachfolgenden Wert ersetzt.
3. Mehrere fehlende Zeilen hintereinander wurden bereinigt, indem die Differenz des letzten und neusten vorhandenen Wertes ermittelt und diese durch die Anzahl der fehlenden Zeilen plus eins dividiert wurde. Diese anteilige Differenz wurde zu dem vorangegangenen Wert addiert.
4. An manchen Tagen ist die Messzeit des Wertes um ein paar Sekunden oder um wenige Minuten versetzt. Interessanterweise wurde dieser Fehler jeweils um 0:00 Uhr nach Kalibrierung des Messsystems behoben. Die Messzeiten wurden entsprechend korrigiert.
5. Außerdem gab es in den Aufzeichnungen insgesamt 3 nicht erklärbare Wertesprünge. Dies geschah bei beiden Datenreihen der Bergmannstr. 36 (Strom, Gas) zur gleichen Zeit und lässt einen technischen Fehler vermuten. Diese Fehler wurden korrigiert, indem der Sprung auf die mittlere Differenz der benachbarten Werte gesenkt wurde.

Die Datenreihe der Photovoltaik-Anlage aus der Riesstr. 50 wies ebenfalls fehlende Zeilen auf, welche mit den gleichen Methoden korrigiert wurden.

5 Auswertung

5.1 Matlab als Simulationsumgebung

Da das Ziel eine diskrete Simulation mit großen Datenmengen war, wurde das Programm Matlab der Firma The MathWorks Inc. genutzt.

Matlab ist ein auf mathematische Aufgaben, Datenauswertung und Simulation spezialisiertes Programm. Mit diesem Programm lassen sich große Datensätze einlesen und verwalten. Außerdem kann mit einer C verwandten Sprache die Datenanalyse und Simulation programmiert werden.

Für die Programmierung der Simulation wurde Matlab in der Version R2015b benutzt.

In der Simulation wurden auf Viertelstundenebene unter anderem folgende Werte (absolut und relativ) ermittelt und berechnet.

thermische Last	Die aus dem Gasverbrauch resultierende thermische Leistung
Eigenverbrauch	Der Anteil der erzeugten Leistung, welcher selbst verbraucht werden kann
Erzeugung	Die im Moment erzeugte Leistung
Einspeisung	Überschüssige Leistung, welche ins Stromnetz eingespeist werden muss
Verbrauch	Last der Liegenschaft, die im Moment benötigt wird

5.2 Dimensionierung BHKW

Ein Untersuchungsgegenstand ist außerdem der Einsatz eines BHKW. Da es die ganzjährige Wärmesenke des Schwimmbades bedienen soll, wird es wärmegeführt dimensioniert.

Um das zu erreichen, wird ein geordnetes Wärmelastprofil des thermischen Lastgangs vom 01.07.2012 bis 30.06.2013 erstellt (Abbildung 7).

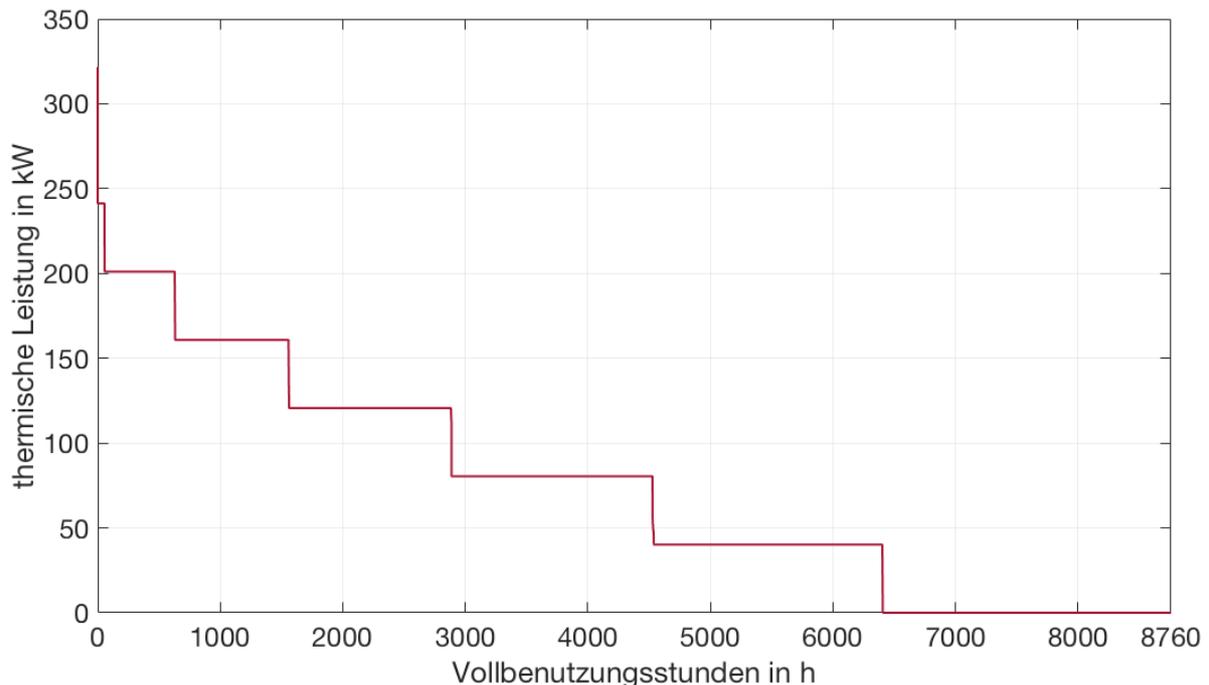


Abbildung 7 geordnetes Wärmelastprofil

Das so erzeugte Profil zeigt eine deutliche Treppenbildung, diese Stufen sind auch im Wärmelastprofil zu erkennen. Sie entstehen da das Messsystem zwar mit einer Auflösung von $0,1 \text{ m}^3$ je Impuls arbeitet, die Aufzeichnung aber in Zehnerschritten erfolgt. Daher resultiert eine Schrittweite von $40,21 \text{ kW}$.

$$Leistung_{Stufe} = \frac{Impulse \cdot Auflösung \cdot Brennwert \cdot Zustandszahl \cdot Wirkungsgrad_{Brenner}}{Anteil\ Stunde}$$

$$Leistung_{Stufe} = \frac{10 \cdot 0,1 \text{ m}^3 \cdot 11,2 \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3} \cdot 0,9159 \cdot 0,98}{0,25 \text{ h}} = 40,21 \text{ kW}$$

Bei Betrachtung des Wärmelastprofils käme ein BHKW bei einer Leistung von $40,21 \text{ kW}$ thermisch auf 6408 Vollbenutzungsstunden und ein zweites bei einer Leistung von $80,42 \text{ kW}$ thermisch auf 4530 VBH. Allerdings wird die Wärmeversorgung mit zwei großen Brennern ohne Pufferspeicher sichergestellt. Deutlich wird dies bei einem Blick auf den ganzjährigen Wärmelastverlauf.

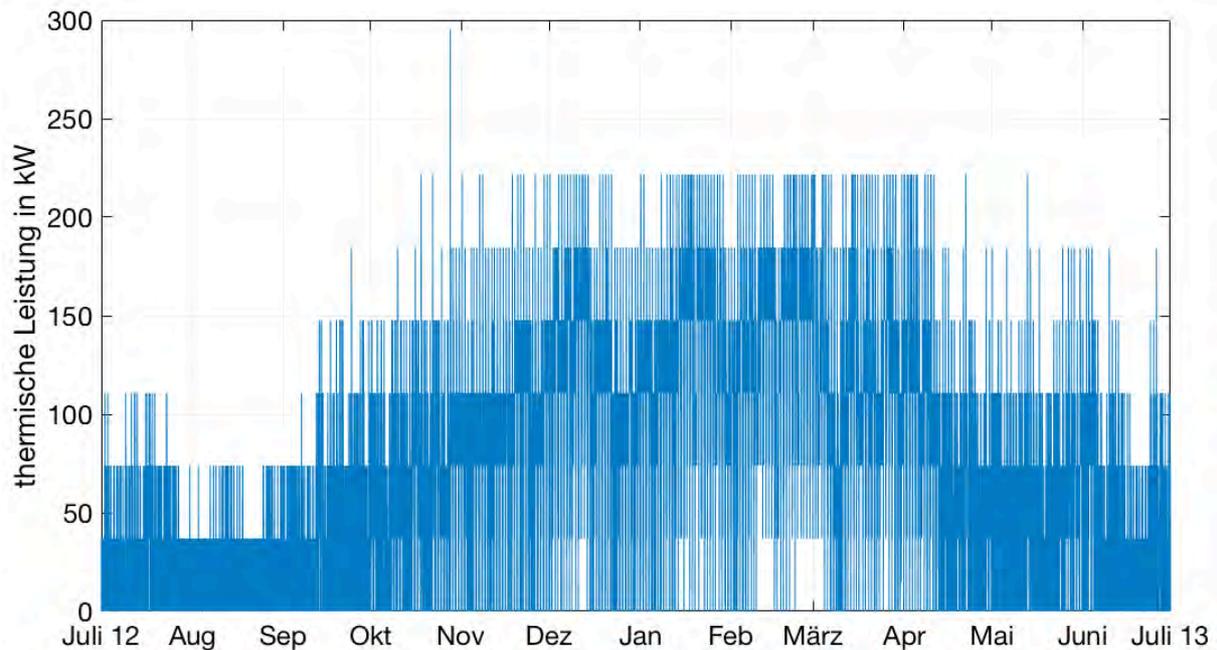


Abbildung 8 Wärmelastprofil

Es wird deutlich, dass die beiden unteren Stufen des Wärmelastverlaufes ganzjährig in kurzen Taktungen bedient werden. Lediglich für den Zeitraum der Sommerferien erkennt man einen Rückgang in der Wärmelast. Im Gegensatz zu anderen Gebäuden liegt der Wärmebedarf nicht nur auf den kälteren Monaten, sondern verteilt sich ganzjährig. Daher wurde für die Dimensionierung des BHKW eine andere Berechnungsmethode gewählt, die auf der durchschnittlich zu erbringenden Wärmeleistung basiert.

Als erstes wurden aus den Daten des Wärmelastverlaufes die Werte oberhalb einer thermischen Leistung von 80,42 kW entfernt. Der resultierende Wärmelastverlauf repräsentiert damit die ganzjährig abgerufene Wärmeleistung. Diese wurde über das Jahr gemittelt, um auf eine durchschnittliche Wärmeleistung des BHKW schließen zu können. Allerdings wird durch diese Methode nur eine Näherung erreicht. So fällt in den kälteren Monaten ein Teil der Gebäudeheizung in den Bereich bis 80,42 kW. Außerdem ist der Wärmebedarf in den Sommerferien geringer. Aus diesem Grund sollte das BHKW in der Realität kleiner ausfallen als der ermittelte Wert. Die errechnete Leistung über das Jahr liegt bei 50,21 kW thermisch.

$$\bar{\varnothing} \text{ Leistung}_{\text{thermisch}} = \frac{\text{Summe Leistung}_{\text{th}} (\text{bis } 80,42 \text{ kW}) \text{ über das Jahr}}{\text{Viertelstunden}} = 50,21 \text{ kW}$$

BHKW werden meistens unter Angabe der elektrischen Leistung angeboten. Für die Berechnungen des elektrischen Eigenverbrauchsanteils der Photovoltaik-Anlagen ist, in den Szenarien mit BHKW, dessen elektrische Leistung relevant. Daher ist die Festlegung einer elektrischen Leistung für das BHKW notwendig. Dafür wurden die Leistungsdaten von 28 Mini BHKW verschiedener Anbieter verglichen (siehe Anhang Tabelle 9). Mit Hilfe der linearen Regression wurde eine Funktion, in Abhängigkeit von thermischer zu elektrischer Leistung, ermittelt (Abbildung 9).

$$\text{Leistung}_{th} = 2,0036 \cdot P_{el} + 2,384 \text{ kW} \quad \text{oder} \quad \text{Leistung}_{el} = \frac{P_{th} - 2,384 \text{ kW}}{2,0036}$$

Vereinfacht kann in der Praxis mit dem Mittelwert des Verhältnisses, also der Stromkennzahl gerechnet werden. Das Verhältnis aus elektrischer und thermischer Leistung beträgt bei den verglichenen BHKW im Mittel 0,46.

$$\text{Leistung}_{th} = \frac{P_{el}}{0,46} \quad \text{oder} \quad \text{Leistung}_{el} = P_{th} \cdot 0,46$$

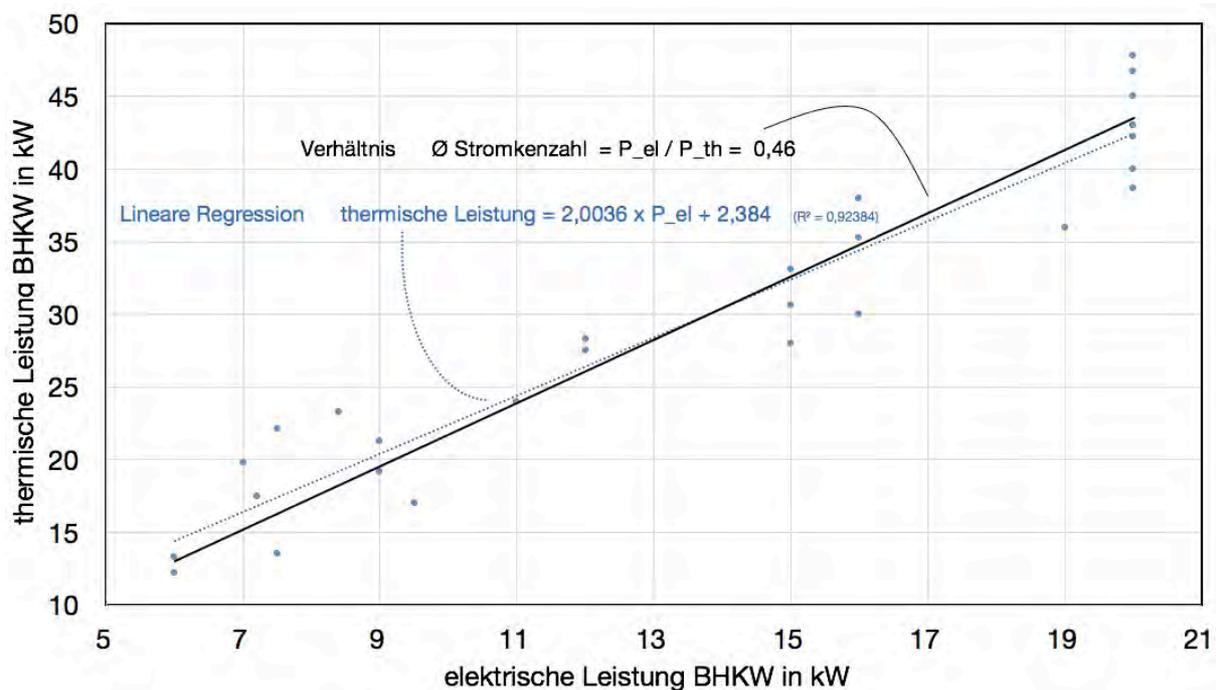


Abbildung 9 BHKW Leistungswerte

In dieser Arbeit wurde mit der Funktion der linearen Regression gerechnet, um eine präzisere Berechnung des Eigenverbrauches zu ermöglichen. Das erforderliche BHKW müsste damit eine Größe von

$$\text{Leistung}_{el} = \frac{50,21 \text{ kW} - 2,384 \text{ kW}}{2,0036} = 23,87 \text{ kW}_{el}$$

haben.

Die Angebotslage ist für BHKW mit einer elektrischen Leistung über 20 kW sehr gering, was mit den Fördervoraussetzungen in der Bundesrepublik Deutschland begründet werden kann. BHKW bis 20 kW elektrischer Leistung werden bevorzugt gefördert.

Wie zuvor beschrieben wird davon ausgegangen, dass die Dimensionierung etwas kleiner ausfallen sollte als der errechnete Wert. So wird für die Simulation ein BHKW mit einer elektrischen Leistung von 20 kW und einer resultierenden Leistung von 42,46 kW verwendet. Die thermische Leistung beruht auf der Formel zur

Abhängigkeit von elektrischer zu thermischer Leistung bei BHKW in dieser Leistungsklasse. Es sind zwar auch kleinere BHKW denkbar, es gibt BHKW mittlerweile auch in Dimensionen von 2,5 – 11 kW (Mikro-BHKW) und unter 2,5 kW (Nano-BHKW) elektrischer Leistung. Allerdings werden die spezifischen Kosten eines BHKW mit abnehmender Leistung immer höher. Im Vergleich von einem BHKW mit 1kW und 20 kW elektrischer Leistung, fallen die spezifischen Kosten bei dem BHKW mit 1 kW, 5 mal höher aus (Klein et al., 2014). In dieser Arbeit wird daher versucht, ein BHKW größtmöglich zu dimensionieren.

Für die Simulation wurde ein BHKW mit den maximal erreichbaren 8760 Vollbenutzungsstunden pro Jahr angenommen. Diese Annahme beruht auf der Berechnung der thermischen Leistung des BHKW, in der eine Durchschnittsleistung über das Jahr errechnet wird. In der Realität kommen noch Unterbrechungen für Wartung und Instandsetzung hinzu. Diese werden in dieser Arbeit nicht mit einbezogen.

5.3 Photovoltaik-Anlage

Für die Simulation der Photovoltaik-Anlage musste die installierbare Fläche im Vorfeld ermittelt werden.

5.3.1 Solarpotentialkarte

Für die Landeshauptstadt München wurde im Rahmen des integrierten Handlungsprogramms Klimaschutz in München (IHKM) eine Solarpotentialkarte erstellt.



Solarpotentialkarte © Referat für Gesundheit und Umwelt Landeshauptstadt München

Angaben aus der Solarpotentialkarte

a.) Max. Modulfläche 372 m²	Mögl. Peak Leistung 55,5 kW	Mögl. Stromertrag/Jahr 59.862 kWh/a
b.) Max. Modulfläche 65 m²	Mögl. Peak Leistung 9,7 kW	Mögl. Stromertrag/Jahr 10.468 kWh/a
c.) Max. Modulfläche 82 m²	Mögl. Peak Leistung 12,2 kW	Mögl. Stromertrag/Jahr 13.087 kWh/a

Da die Berechnungen der Solarpotentialkarte nicht einsehbar und dadurch nicht nachvollziehbar waren, wurde auf eigene Berechnungen zurückgegriffen.

5.3.2 Ermittelte Daten aus Bauplan und Berechnungen

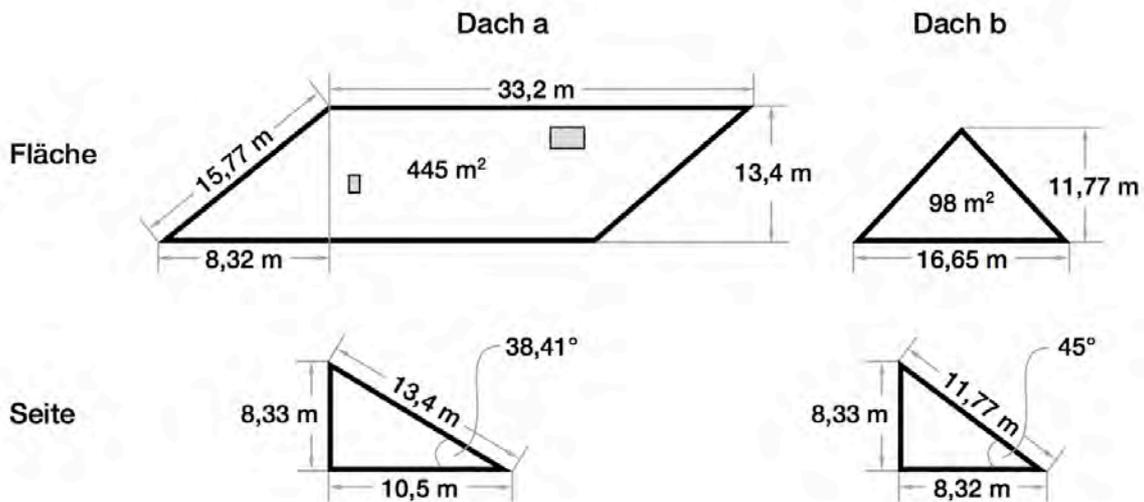


Abbildung 10 geeignete Dachflächen für Photovoltaikmodule

Dach a – Das Hauptdach des Schulgebäudes hat ein Südazimut von 7° und einen Anstellwinkel von 38,41°. Die nutzbare Fläche (A) berechnet sich wie folgt.

$$A_{\text{Schornstein1}} = 2 \text{ m} \cdot 1,2 \text{ m} = 2,4 \text{ m}^2 \quad \text{und} \quad A_{\text{Schornstein2}} = 1,2 \text{ m} \cdot 0,5 \text{ m} = 0,6 \text{ m}^2$$

$$A = 445 \text{ m}^2 - 2,4 \text{ m}^2 - 0,6 \text{ m}^2 = 442 \text{ m}^2$$

Dach b – Das Dach des Seitenflügels hat das gleiche Azimut wie das Hauptdach. Allerdings mit einem Anstellwinkel von 45°. Die nutzbare Fläche berechnet sich wie folgt.

$$A_{\text{Dachfenster}} = 1,1 \text{ m} \cdot 2 \text{ m} = 2,2 \text{ m}^2$$

$$A = 98 \text{ m}^2 - 2,2 \text{ m}^2 = 95,8 \text{ m}^2$$

Dach c – Das Flachdach der Turnhalle (Dach c) wird in dieser Arbeit nicht betrachtet, da die Zukunft des Gebäudes ungewiss ist. Im Gespräch befinden sich zur Zeit Vorschläge über Sanierung bis Neubau. Eine Nutzung über einen wirtschaftlichen Zeitraum ist daher nicht wahrscheinlich.

Das Dach b wurde aufgrund der ausreichenden Fläche von Dach a ebenfalls nicht weiter betrachtet.

Zur Bestimmung der maximalen Leistung der Modulfläche, wurde eine Erhebung von Solarmodulen durchgeführt (siehe Anhang Tabelle 10). Dadurch ergab sich ein Mittelwert von rund 153 W/m². Auf Dach a wäre dadurch ein theoretisches Potential für eine Leistung von rund 68 kW Peak vorhanden. Allerdings entspricht die tatsächlich zu installierende Fläche wegen der Form des Daches mit seinen Schrägen nicht vollständig dem Maximalwert von 442 m².

Der Grund für den Unterschied von den ermittelten Flächen der Solarpotentialkarte zu den errechneten Flächen aus dem Bauplan, wird in der Arbeitsweise des Algorithmus vermutet. Diesem stehen nur Luftbildaufnahmen in einem bestimmten Winkel zur Verfügung. Dieser kann aber leicht variieren, da diese Fotos mit Flugzeugen erstellt werden. Weiterhin wird vermutet, dass dem Algorithmus die Winkel der Dächer nicht nachträglich zur Verfügung gestellt wurden. Ein Beispiel anhand der Fläche von Dache a unter Nutzung der Kantenlängen der optimalen Draufsicht.

$$A = 32,2 \text{ m} \cdot 10,5 \text{ m} = 338,1 \text{ m}^2$$

Das ergibt eine Differenz zur Solarpotentialkarte von 33,9 m². Die Differenz der Solarpotentialkarte zur manuellen Berechnung beträgt 70 m².

5.4 Optimierter Lastverlauf

Bisher war die Anlagengröße ausschließlich durch die zur Verfügung stehenden Dachflächen limitiert, da jeder Überschuss zu einer lohnenden Vergütung eingespeist werden konnte, die höher ausfiel als der Preis für den Strombezug aus dem Netz. Mit sinkender Einspeisevergütung und steigenden Strompreisen verschob sich in jüngerer Vergangenheit der Fokus nun auf den Eigenverbrauch der produzierten Energie.

Wenn die Anlage auf dem Dach einer Liegenschaft mit dem Ziel der Maximierung des Eigenverbrauchs installiert werden soll, erscheint es sinnvoll, die Liegenschaft vorher energetisch genauer zu betrachten und den elektrischen Verbrauch zu senken. Dies kann zum Beispiel über Entfernung oder Austausch von Verbrauchern gegen Geräte mit geringerer Leistungsaufnahme geschehen.

Ziel des optimierten Lastverlaufes ist das Optimum an Einsparungen zu demonstrieren. Der hier ermittelte Lastverlauf ist theoretisch und beinhaltet die Umsetzung aller Maßnahmenvorschläge ungeachtet aktueller Pläne zur Umsetzung oder Finanzierung.

Der Lastverlauf ist heute ein wichtiger Faktor für die Eigenverbrauchsoptimierung von Photovoltaik-Anlagen.

5.4.1 Maßnahmenvorschläge zur Optimierung des Lastverlaufes

Die Vorschläge zur Optimierung des Lastverlaufes in dieser Arbeit beziehen sich lediglich auf elektrische Verbraucher. Eine umfangreichere Liste wurde in einem separaten Bericht für das Baureferat angefertigt.

Maßnahmenvorschlag 1

In der Liegenschaft sind bis auf wenige Ausnahmen alle Leuchtmittel, Leuchtstoffröhren mit einer Länge von 1449 mm und einem Durchmesser von 25,4 mm (T8). Die Leuchtstoffröhren sind zusätzlich mit konventionellen Vorschaltgeräten (KVG) ausgestattet, welche einen zusätzlichen Verlust von ca. 10 – 20 % der Leuchtmittleistung verursachen. Bei einer Leuchtstoffröhre mit 58 W kommen 13 W für das KVG hinzu, also insgesamt 71 W (Rieste, 2016).

Maßnahme: Austausch aller Leuchtmittel gegen aktuelle LED-Leuchtmittel.

Anmerkung: 16 Leuchtstoffröhren entsprechen bereits der aktuelleren Bauart mit einer Leistung von 36 W und verfügen über ein aktuelles elektronisches Vorschaltgerät (EVG). Um den theoretischen Effekt der Einsparungen zu maximieren, wird auch der Austausch dieser Leuchtmittel simuliert. In der Praxis würde ein solcher Austausch aber nicht stattfinden.

Maßnahmenvorschlag 2

Weiteres Einsparpotential bieten die Heizungspumpen, die derzeit 600 – 2075 W verbrauchen. Die Minimalleistung wird dabei dauerhaft abgerufen und die Maximalleistung variiert je nach Anforderung.

Maßnahme: Austausch gegen aktuelle Hocheffizienzpumpen. Nach dem Austausch beläuft sich die Leistung auf 79 – 1222 W.

Maßnahmenvorschlag 3

In der Liegenschaft sind 3 Untertischboiler an Waschbecken verbaut, die hauptsächlich zum gelegentlichen Händewaschen und nicht zur Warmwasserversorgung für die Reinigung oder in Sanitarräumen genutzt werden. Bedingt durch ihre Bauart, haben diese einen dauerhaften Bereitschaftsverlust. Aktuelle Geräte mit einer effektiven Isolierung haben einen Bereitschaftsverbrauch von zirka 0,27 kWh/Tag (Bund der Energieverbraucher e.V., 2016). Bei den verbauten Geräten wird der Verlust höher ausfallen, da die verbauten Geräte nicht mehr der zeitgemäßen Bauweise entsprechen.

Maßnahme: Austausch der Untertischboiler gegen Durchlauferhitzer in der Leistungsklasse von 3,5 Kilowatt. Diese liefern eine Temperatur von 30 °C. Das ist ausreichend zum Händewaschen und es wird nur soviel Wasser erwärmt, wie benötigt wird.

Da keine Liegenschaft mit einem Lastverlauf vor und nach einer energetischen Gebäudeoptimierung zur Verfügung stand, wurde der vorhandene angepasst.

5.4.2 Berechnung

Der Lastverlauf unterteilt sich in mehrere Bereiche.

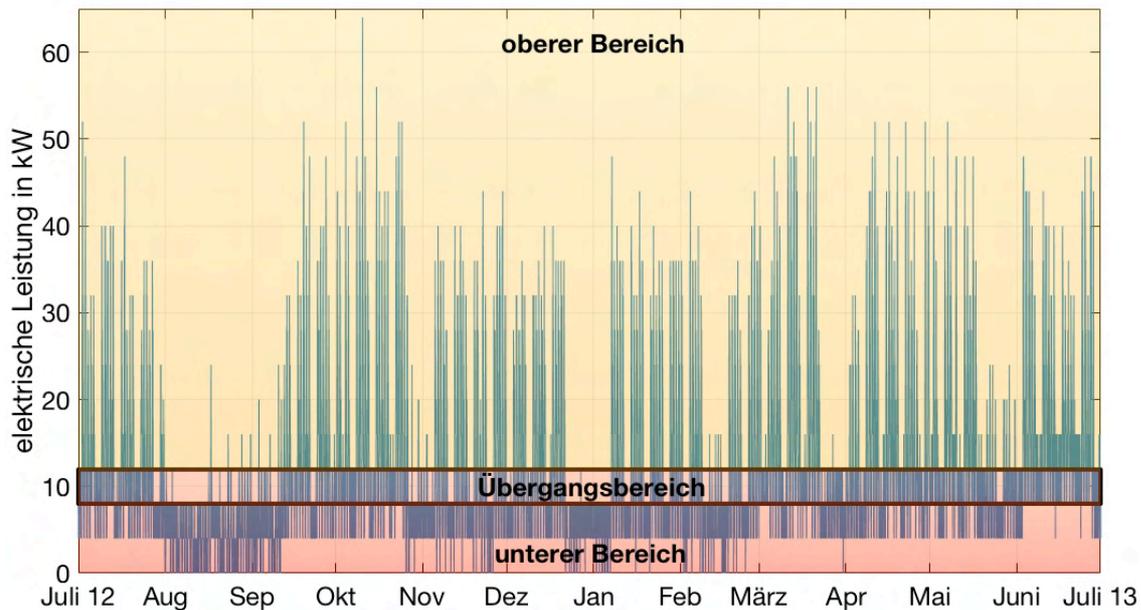


Abbildung 11 elektrischer Lastverlauf

Im oberen Bereich befinden sich die Verbraucher, die durch die Nutzung direkt beeinflusst werden. Dazu gehört das Licht als mit Abstand größter Verbraucher und einer Gesamtleistung von insgesamt 36,88 kW (siehe Tabelle 8). Der Heißluftofen, der größte Einzelverbraucher mit 18 kW (siehe Tabelle 7), ist im Lastverlauf nicht eindeutig zu identifizieren. Angesichts seines kurzen Einsatzes mit hoher Leistung, kann dieser nicht einzeln betrachtet werden. Für die Optimierung der Leuchtmittel wurde mit energiesparsamen LED Versionen gerechnet (siehe Anhang Tabelle 12). Die maximale Leistung verringert sich dadurch um 47,77 % auf 17,62 kW.

Im unteren Bereich befinden sich Verbraucher, die sowohl nachts als auch tagsüber benötigt werden. Zu diesen zählen ungetaktete Dauerverbraucher, Pumpen und Kompressoren, die nie unter eine Mindestlast fallen (Fix). Außerdem hat der untere Bereich einen Teil schwankender Last, hervorgerufen durch Verbraucher je nach Nutzung des Gebäudes wie Schwimmbadfiltrierung, Heizungspumpen, Tiefkühler, Kühlschränke und Untertischboiler (Variabel). Die Leistungsunterschiede vor und nach der Optimierung fallen hier geringer aus. So sind es aktuell 11,47 kW und nach der Optimierung noch 10,01 kW also 87,27 %. Der Hauptteil der Einsparungen in diesem Bereich ist dem Austausch der Heizungspumpen zuzuschreiben (siehe Anhang Tabelle 11).



Abbildung 12 unterer Bereich mit den Dauerverbrauchern

Für den optimierten Lastverlauf wurden beide Bereiche, Licht und Dauerverbraucher, wie oben beschrieben getrennt betrachtet, um den optimierten Lastverlauf zu errechnen. Dabei ergaben sich zwei unterschiedliche Situationen.

Situation 1 Nacht

Wenn die Leistung nicht höher als 12 kW ausfällt, was nur in der Nacht geschieht, kann davon ausgegangen werden, dass keine zusätzlichen Verbraucher, wie beispielsweise Lichtquellen, als Last zugeschaltet sind. Daher wird in dieser Zeit der Lastverlauf nur mit dem Einsparpotential des unteren Bereiches (87,27 %) verrechnet.

Situation 2 Tag

Fällt die Leistung höher als 12 kW aus, so kann davon ausgegangen werden, dass der Mehrverbrauch dem Licht und somit der Anwesenheit von Nutzern (Schüler, Lehrer, Sportler) geschuldet ist.

Der Leistungsanteil über 12 kW wird dann mit dem Einsparpotential des oberen Bereiches (47,77 %) verrechnet (hellgrauer Bereich in Abbildung 13).

Außerdem gibt es einen Übergangsbereich (schraffierter Bereich in Abbildung 13) aus den anteiligen Spitzen der variablen Verbraucher des unteren Bereiches sowie Anteile des Lichtes des oberen Bereiches. In dem Übergangsbereich zwischen 8 und 12 kW werden je 2 kW dem oberen und unteren Band zugeordnet und entsprechend mit 0,4777 und 0,8727 multipliziert.

Die restlichen 8 kW des unteren Bandes werden wie gehabt mit dem Einsparpotential des unteren Bereiches (87,27 %) verrechnet.

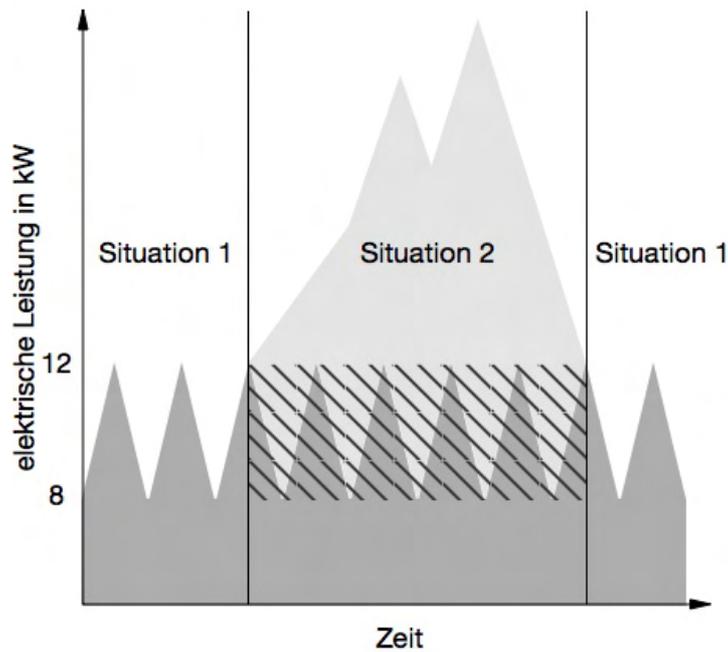


Abbildung 13 Schematische Darstellung eines Tages mit den Verrechnungsbereichen

Die Sommerferien stellen einen besonderen Abschnitt für die Berechnung dar. In dieser Zeit wird das Schwimmbecken zur Revision geleert und die Schwimmbadtechnik abgeschaltet, was sich im Lastverlauf bemerkbar macht. Daher wurde für diesen Zeitabschnitt eine gesonderte Optimierung für den unteren Bereich ohne die Schwimmbadtechnik erstellt. Wird diese aus dem unteren Bereich herausgerechnet so ergibt sich ein optimierte Leistung von 67,71 %.

In der Abbildung 14 sind beide Lastverläufe zusammen abgebildet.

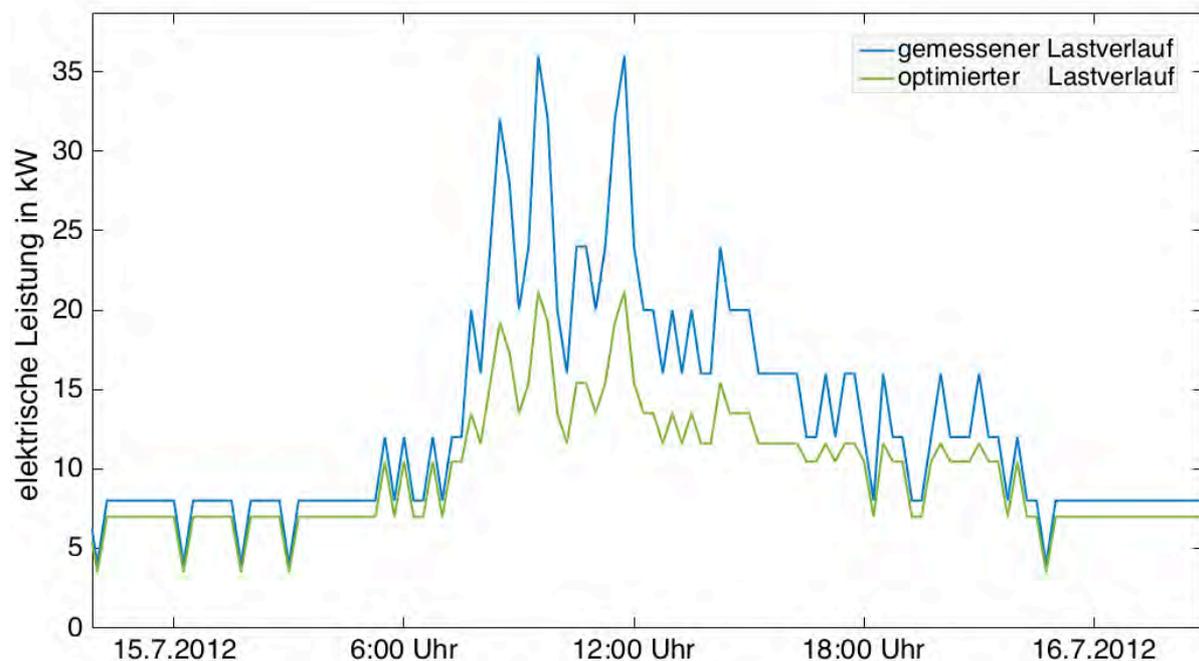


Abbildung 14 Lastverlauf an einem Tag vor und nach der Optimierung

Dieser auf Basis von Viertelstundenwerten errechnete optimierte Lastverlauf wird in der Simulation für die Fälle 3 und 4 an Stelle des realen Lastverlaufes verwendet. Durch die Optimierung ergab sich eine Einsparung von insgesamt 24804 kWh, gegenüber dem realen Lastverlauf, das sind 25,49 % des gesamten Bedarfes. Dies sind bei nach aktuellem Strompreis des Rahmenvertrages von 0,2251 €/kWh, 5583,38 € Ersparnis in einem Jahr.

5.5 Eigenverbrauch/Eigendeckung der Photovoltaik-Anlage

Eigenverbrauchsanteil

Der Eigenverbrauchsanteil beschreibt den Teil des erzeugten Stromes der selbst genutzt werden kann und nicht in das Stromnetz eingespeist werden muss.

Der Eigenverbrauchsanteil der Photovoltaikanlage wurde für alle vier Fälle simuliert. Alle Simulationen fanden immer über den Zeitraum vom 01.07.2012 bis 30.06.2013 auf Basis von Viertelstundenwerten statt.

In der folgenden Abbildung 15 sind alle vier Fälle zusammen aufgetragen.

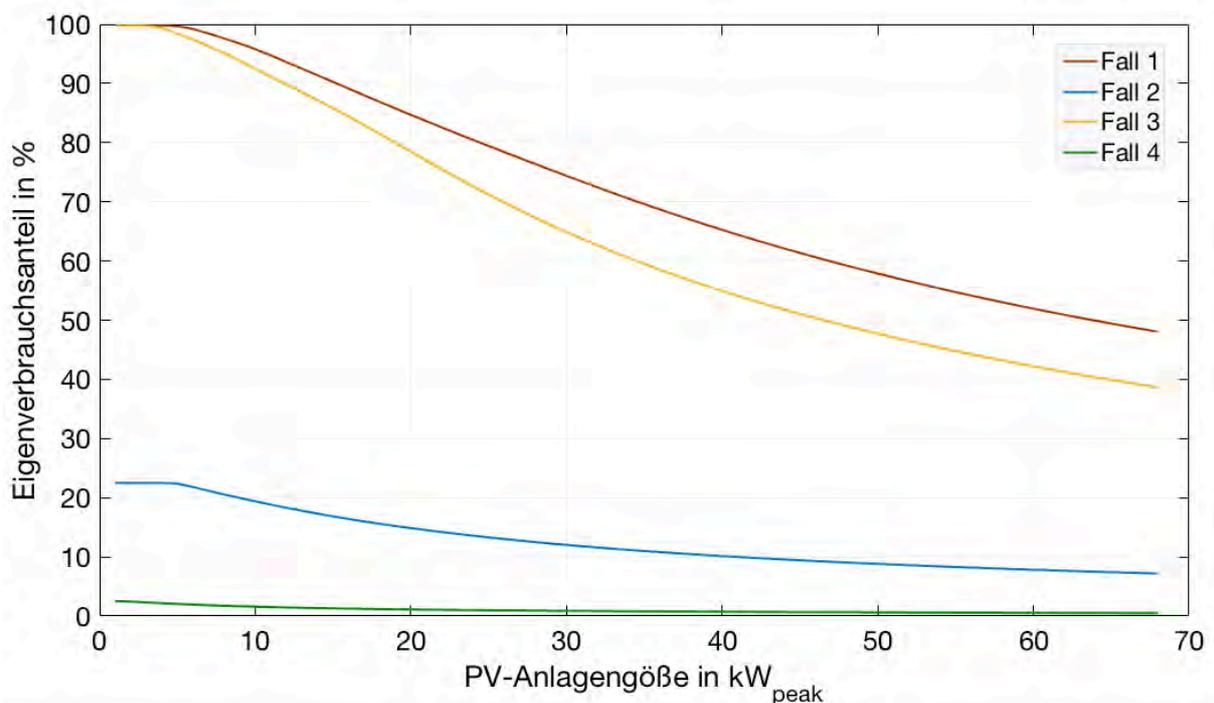


Abbildung 15 Eigenverbrauchsanteil Photovoltaik

Der Eigenverbrauchsanteil der Photovoltaikanlage liegt in den Fällen 1 und 3, den Fällen ohne BHKW, sehr hoch und kann bei Anlagengrößen von 30 kW Peak 65 % bzw. 75 % Eigenverbrauchsanteil erreichen.

Ganz anders sieht es in den Fällen mit BHKW aus. In diesen Fällen liegt der maximale Eigenverbrauchsanteil der Photovoltaikanlage bei etwas über 20 % in Fall 2. In Fall 4 mit optimiertem Lastverlauf ist der Anteil der photovoltaischen Stromerzeugung auf ein zu vernachlässigendes Niveau gefallen.

Da in dieser Arbeit keine elektrischen Energiespeicher verwendet werden, ist der Einspeisungsanteil gleich 100 % minus den Eigenverbrauchsanteil.

Eigendeckungsanteil

Der Eigendeckungsanteil beschreibt den Anteil des erzeugten Stroms an der tatsächlichen auftretenden Last. Er dient der Veranschaulichung, wie hoch der noch zu leistende Bedarf an zusätzlicher Stromversorgung ist.

In der Abbildung 16 ist der Anteil des erzeugten Solarstromes an der tatsächlichen Last aufgetragen.

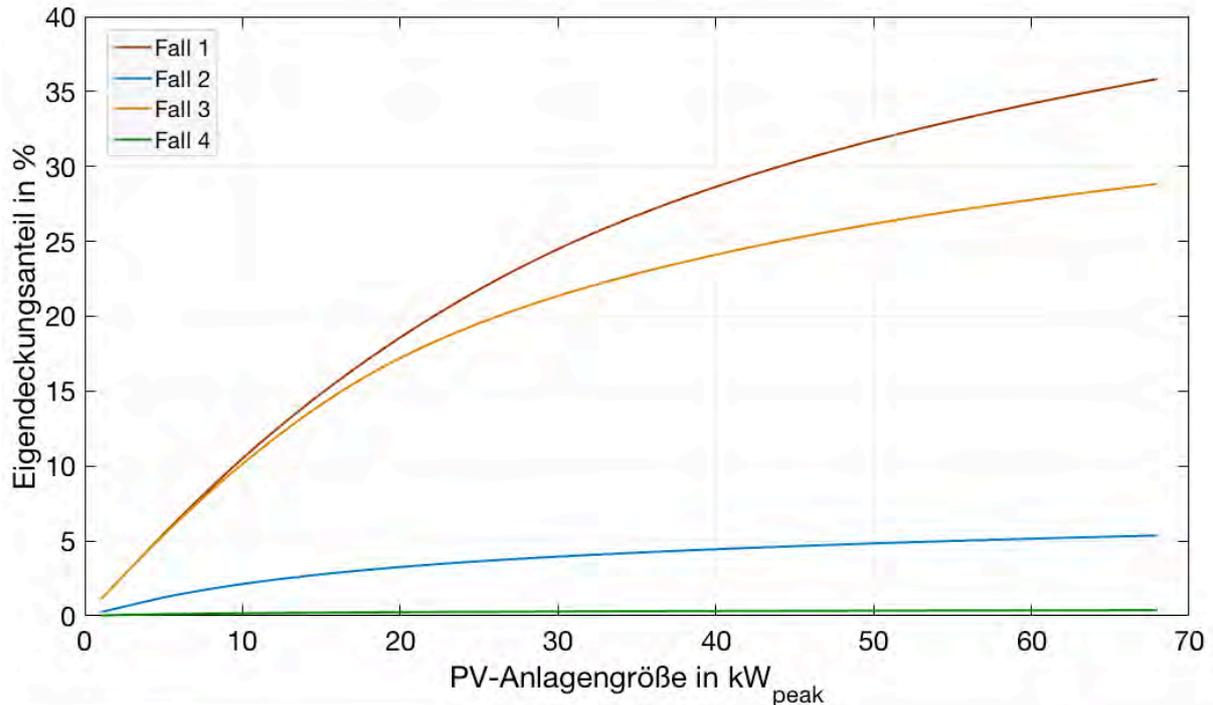


Abbildung 16 Eigendeckungsanteil PV

Während der Eigenverbrauchsanteil mit zunehmender Anlagengröße sinkt, steigt der Eigendeckungsanteil weiter an. Die Steigung nimmt bei höherer Anlagengröße stetig ab, erreicht aber in Fall 1 einen Anteil von über 35 % bei 64 kW Peak Anlagengröße. In Fall 3 immerhin noch bis über 28 %. Die Anteile in Fall 2 und 4 sind dagegen im Verhältnis zur Anlagengröße zu vernachlässigen.

5.6 Eigenverbrauch/Eigendeckung des BHKW

Eigenverbrauchsanteil

Die Eigenverbrauchsanteile des BHKW liegt in Fall 2 bei 49,95 % und in Fall 4 mit optimiertem Lastverlauf bei 41,11 %.

Eigendeckungsanteil

Die Eigendeckungsanteile des BHKW liegen in Fall 2 bei 89,93 % und in Fall 4 mit optimierten Lastverlauf noch immer bei 74,01 %.

5.7 Wirtschaftlichkeitsberechnung

5.7.1 Kostenaufteilung

In einer Wirtschaftlichkeitsberechnung sind die Kosten normalerweise in drei Abschnitte unterteilt. Hierzu gehören kapitalgebundene Kosten, verbrauchsgebundene Kosten und betriebsgebundene Kosten.

Kapitalgebundene Kosten unterteilen sich in Fremd- und Eigenkapitalkosten. Fremdkapitalkosten fallen bei einer Finanzierung über Kredite an und werden durch die Annuität ausgedrückt. Eigenkapitalkosten sind dagegen theoretische Verluste durch verloren gegangene Zinsen, da das Eigenkapital in Anlagevermögen gebunden ist und somit nicht investiert werden konnte.

In dieser Wirtschaftlichkeitsberechnung werden Investitionen im öffentlichen Sektor betrachtet und für die Berechnungen werden aktuelle Zinssätze von der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) aus entsprechenden Förderprogrammen verwendet. Dies ist bei der Photovoltaikanlage das Programm 208 mit 0,5 % Zinsen p.a. am 15.02.2016 (KfW, 2016a) und bei dem BHKW das Programm 217 mit 0,05 % p.a. am 15.02.2016 (KfW, 2016b).

Verbrauchsgebundene Kosten sind an die tatsächlichen Laufzeiten gekoppelt. Darunter fallen Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, aber auch Vergütungen oder Einsparungen.

Betriebsgebundene Kosten sind dagegen laufende verbrauchsunabhängige Kosten, welche für den Erhalt der Anlage notwendig sind. Zum Beispiel Wartung, Reinigung, Instandsetzung und Versicherung.

5.7.2 Photovoltaik

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung der Photovoltaik-Anlage wurden folgende Berechnungen, über einen Zeitraum von 20 Jahren einbezogen. Der Zeitraum von 20 Jahren richtet sich nach der gesetzlich garantierten Einspeisevergütung nach EEG.

Investitionskosten

Für Photovoltaik-Anlagen wird laufend eine Umfrage unter Anlagenbauern in ganz Deutschland (<http://www.photovoltaiikumfrage.de>) durchgeführt. Aus diesen Werten wird ein deutschlandweiter Mittelwert generiert, welcher die Modulkosten, Wechselrichter und die Installation durch geschulte Monteure beinhaltet. Da diese Arbeit im Jahreswechsel 2015/2016 entstand, sind die aktuellen Preise für 2015 noch nicht erschienen. Allerdings wurden Schätzwerte der ersten Auswertungen Ende 2015 veröffentlicht, welche einem Preis zwischen 1050 und 1150 €/kW Peak ermitteln. Im weiteren Verlauf wird mit $K_{\text{Modul}} = 1150 \text{ €/kW}_{\text{peak}}$ gerechnet (Ziegler, 2015).

Da im Baureferat der Landeshauptstadt München intern noch Mehrkosten durch Ausschreibungen, Architekten und ähnliches hinzukommen, wird ein Aufschlag von

20 % auf K_{Modul} veranschlagt. Dieser Aufschlag basiert auf Erfahrungswerten innerhalb des Baureferates.

Betriebskosten

Die Betriebskosten für Photovoltaik-Anlagen beinhalten die Anlagenkosten für Wartung, Reperatur und Versicherung. Im aktuellen Bericht *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland* des Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE wurden dafür 1% der Investitionssumme pro Jahr ermittelt (Wirth, 2015). Je kW Peak (P_{peak}) installierter Leistung ergeben sich damit Kosten von $k_{\text{Betrieb}} = 13,8 \text{ €/a} \cdot \text{kW}_{\text{peak}}$. Um den überschüssigen Strom in das Stromnetz einspeisen zu können, wird ein Einspeisezähler vorgeschrieben. Dieser kostet bei den Stadtwerken München für je 35 kW Leistung 86,10 €/a.

Kosten und Einnahmen je Kilowattstunde

Für die Einspeisung des überschüssigen Stroms in das Stromnetz erhält der Anlagenbetreiber eine Vergütung nach dem EEG. Diese beläuft sich im ersten Quartal 2016 auf 0,08525869 €/kWh (Bundesnetzagentur, 2016a). Nach der EEG-Novelle von 2014 wird eine anteilige EEG-Umlage auf den Eigenverbrauch bei Anlagen größer 10 kW Peak erhoben. Für 2016 sind dies 35 % auf 0,06354 €/kWh EEG-Umlage und damit eine Abgabe 0,022239 €/kWh (BSW Solar, 2014; Bundesnetzagentur, 2016).

Des Weiteren wird seit der Überarbeitung des EEG 2014 nur noch ein Anteil von 90 % bei der Einspeisung bei Anlagen über 10 kW Peak Leistung vergütet (BSW Solar, 2014).

Technische Einnahmenminderung

Da Solarmodule einer Alterung durch Wetter und Einstrahlung unterliegen, nehmen sie jedes Jahr an Leistung ab. Diesen Vorgang nennt man Degradation. In einer Metaanalyse wurde ein Wert von 0,8 %/Jahr ermittelt (Jordan and Kurtz, 2012) und in dieser Arbeit verwendet.

Stromgestehungskosten

Die Stromgestehungskosten (k_{kWh}) beschreiben die Kosten, die jede produzierte Kilowattstunde verursacht. Dabei wird die erwartete Produktion der Photovoltaik-Anlage über den Betrachtungszeitraum den Gesamtkosten der Anlage gegenübergestellt.

$$k_{\text{kWh}} = \frac{K_{\text{Anlage}} + \text{Aufschlag} + k_{\text{Betrieb}} \cdot P_{\text{peak}} \cdot \text{Jahre} + k_{\text{Zähler}} \cdot \text{Jahre}}{\sum \text{Erzeugung} \cdot \left(\frac{100 - \text{Degradation}}{100} \right)}$$

$$k_{kWh} = \frac{1150 \text{ €} + (1150 \text{ €} \cdot 0,2) + 41,4 \frac{\text{€}}{\text{a}} \cdot P_{peak} \cdot 20 \text{ a} + 16 \frac{\text{€}}{\text{a}} \cdot 20 \text{ a}}{\sum_{n=1}^{20} \text{Erzeugung}_{\text{Jahr}1} \cdot \frac{100 - (0,8 \cdot n)}{100}}$$

Da die abhängige Variable in diesem Fall durch die Anlagengröße (P_{peak}) bestimmt wird, wurde in Abbildung 17 die Kostenfunktion graphisch dargestellt. Wie man deutlich

erkennen kann, fallen die Kosten um ca. 8 Cent je kWh in den ersten Ausbaustufen bis 10 kW Peak. Dieser rapide Verfall liegt an den Mietkosten des Einspeisezählers von 86,10 €/a und relativiert sich schnell bei höheren Ausbaustufen. Da der Einspeisezähler nur für 35 kW elektrischer Leistung zugelassen ist, würde über 35 kW ein zweiter benötigt. Daher nähert sich der Preis bei 35 kW 0,089 €/kWh, steigt bis 0,092 €/kWh und nähert sich dann wieder 0,089 €/kWh.

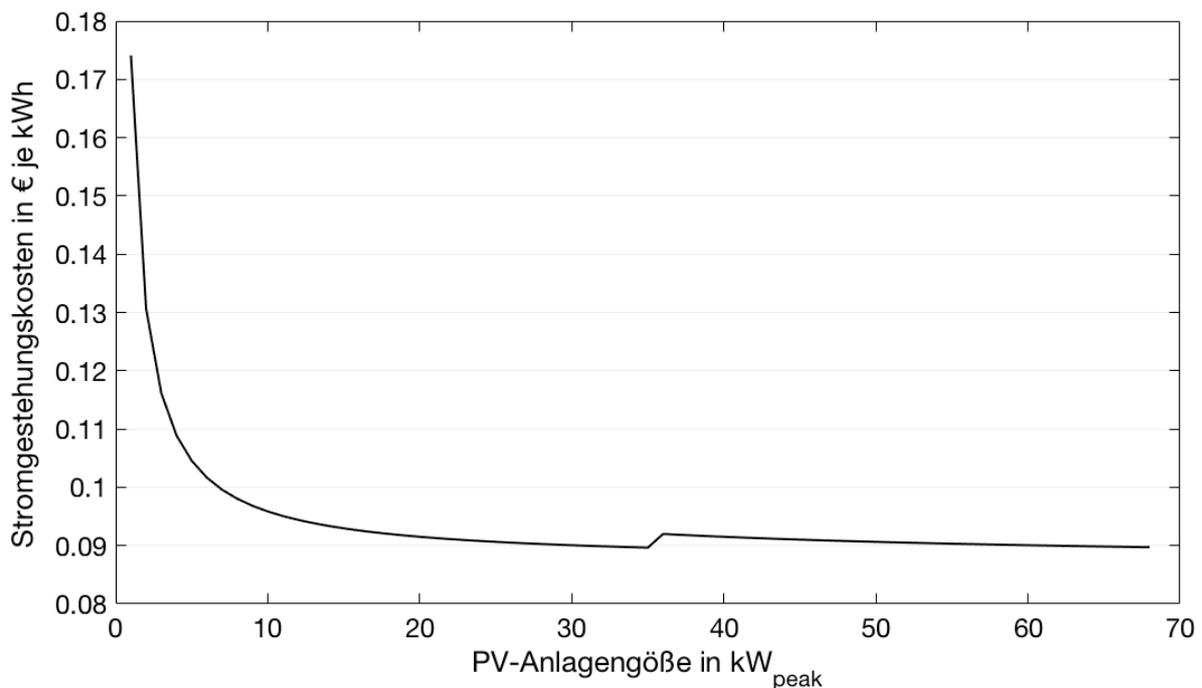


Abbildung 17 Stromgestehungskosten

Gewinn/Verlust

Um eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit treffen zu können, wurde eine Simulation der Einnahmen und Ausgaben über die Laufzeit der Photovoltaik-Anlage von 20 Jahren mit einer jährlichen Degradation von 0,8 % erstellt (Jordan and Kurtz, 2012). Dabei ist zu beachten, dass der zugrundeliegende Erzeugungsverlauf die Aufzeichnung eines Jahres repräsentiert und durch meteorologische Einflüsse eine Unsicherheit besteht. Daher kann es in der Realität zu Schwankungen im tatsächlichen Verlauf kommen. In der Abbildung 18 sind die absoluten Gewinne der vier Fälle für diesem Zeitraum über der Anlagengröße aufgetragen. Der Knick, welcher bei 10 kW Peak Leistung auftritt, hängt mit der EEG-Umlage auf den Eigenverbrauch bei Anlagen größer 10 kW Peak zusammen (BMW, 2014). Der zweite Knick bei 35 kW Peak Anlagengröße ist der Einfluss des zweiten Einspeisezählers, der ab dieser Leistung installiert werden muss.

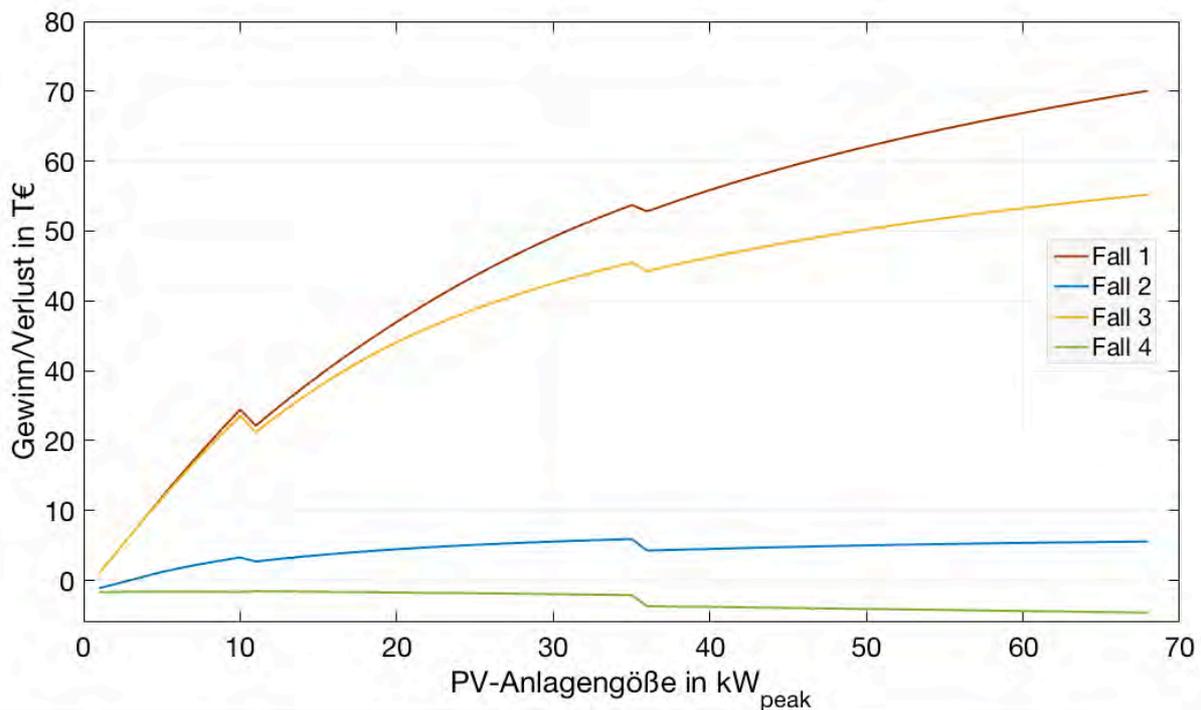


Abbildung 18 Gewinn und Verlust der PV-Anlagen über 20 Jahre

Es ist gut zu erkennen, dass nur in den Fällen ohne Einsatz eines BHKW ein Gewinn ausgewiesen werden kann. Im Fall 1 sind es bei maximaler Ausbaustufe von 68 kW ca. 70080 € in 20 Jahren im Fall 3 mit optimierten Lastverlauf 55210 €. Dieser Gewinn kommt durch die recht hohen Eigenverbrauchsanteile (siehe Abbildung 15) und der Differenz zwischen Stromgestehungs- und Strombezugskosten zustande. Im Fall 2 mit BHKW, ist noch ein Gewinn ab einer Anlagengröße von 3 kW Peak zu erzielen. Er liegt ab einer Anlagengröße von 20 kW im Mittel bei 5000 € in 20 Jahren. Unter 3 kW Peak erwirtschaftet die Anlage durch die relativ hohen Kosten für den Einspeisezähler einen Verlust. Im Fall 4 mit BHKW und optimiertem Lastverlauf wird über alle Anlagengrößen ein Verlust generiert.

Amortisation

Der Einfachheit halber wurde sich für die statische Amortisation entschieden. Dabei wurden die Kapitalkosten über die 20 Jahre kumuliert und zu den Investitionskosten addiert. Die kumulierten Kapitalkosten des Kredites über die KfW mit 0,5 % Zinsen (KfW, 2016a) wurden mit Hilfe des Tilgungsrechner der *FHM Finanzberatung* berechnet und belaufen sich auf 70,32 € (FHM, 2016).

In der Abbildung 19 ist die Amortisationsdauer über der Anlagengröße aufgetragen.

$$\text{Amortisationszeit} = \frac{\text{Investitionskosten} + \text{Kapitalkosten}}{\text{durchschnittlicher Gewinn}/a}$$

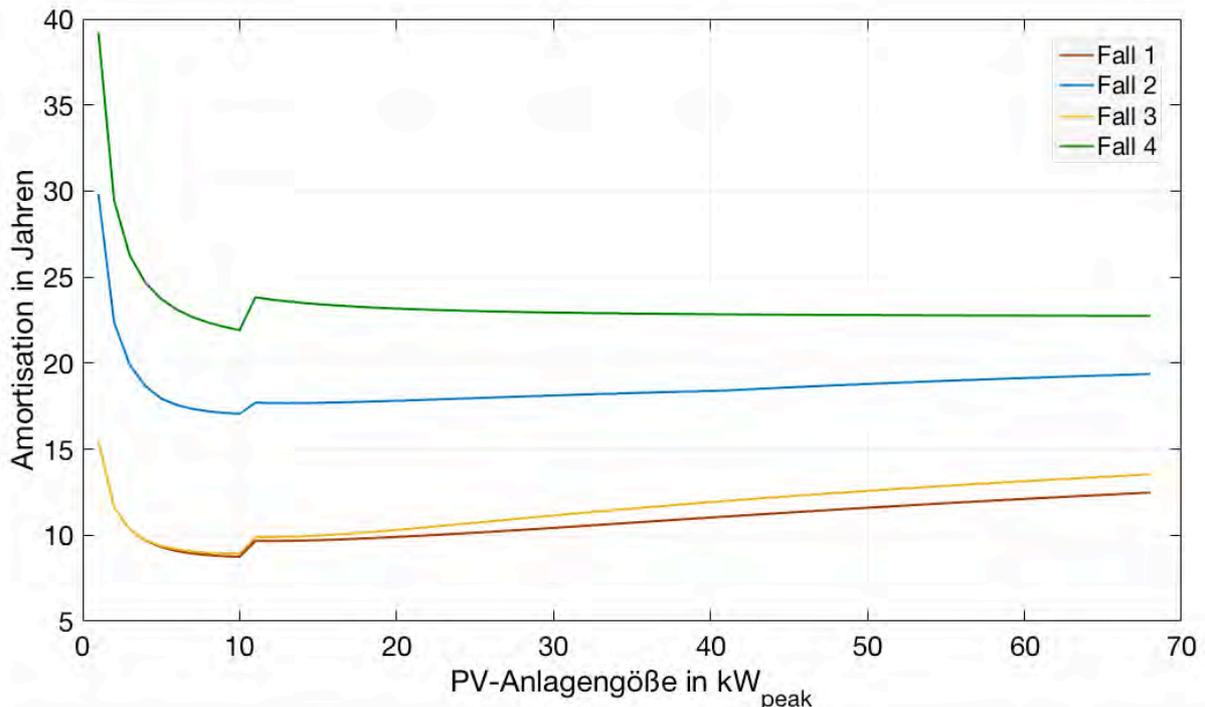


Abbildung 19 Amortisation Photovoltaik

Gut zu erkennen ist die zuerst sinkende Amortisation bei sehr kleiner Anlagengröße wegen der ebenso schnell sinkenden Stromgestehungskosten im Bereich bis fünf Kilowatt Peak Anlagengröße. Der Anstieg bei zehn Kilowatt ist der an diesem Punkt einsetzenden EEG-Umlage auf den Eigenverbrauch geschuldet.

Bei Fall 4 mit BHKW und optimiertem Lastverlauf fällt dieser Anstieg am höchsten aus, da nur ein kleiner Teil der erzeugten Leistung (< 5 %), selbst verbraucht wird. Da in diesem Fall nur Verlust generiert wird, kann der Kostenpunkt des Einspeisezählers auch nicht kompensiert werden.

Bei Fall 1 und 3 ohne BHKW amortisieren sich die Photovoltaik-Anlagen am schnellsten. Dennoch steigt die Amortisationszeit stetig an, da mit steigender Anlagengröße auch der Eigenverbrauchsanteil sinkt.

Der Fall 2 zeigt ohne Optimierung des Lastverlaufes die geringste Amortisationszeit mit 17 Jahren bei 10 kW Peak Anlagengröße.

5.7.3 Blockheizkraftwerk

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung eines BHKW gestaltet sich aufgrund der umfangreicheren Förderungs- und Kostenstruktur umfangreicher als bei der Photovoltaik-Anlage.

Kosten und Einnahmen je Kilowattstunde

Der Preis für den Gasbezug innerhalb des Rahmenvertrages zwischen dem Baureferat München und den Stadtwerken München liegt 2016 für Erdgas bei 0,0512 €/kWh und für Strom bei 0,2251 €/kWh.

Für die Einspeisung in das Stromnetz gibt es zum einen die garantierte Abnahme des Stroms durch die Netzbetreiber. Dieser Preis wird nach dem KWKG mit dem durchschnittlichen Quartalspreis der Leipziger Strombörse EEX des vorangegangenen Quartals vergütet und liegt im ersten Quartal 2016 bei 0,03319 €/kWh (§ 4 Abs. 3 Satz 3 KWKG 2012). Zum anderen beläuft sich die Einspeisevergütung nach dem EEG in den ersten 60.000 Vollbenutzungsstunden auf 0,08 €/kWh.

Eine weitere Besonderheit ist, dass bei der Einspeisung ein vergünstigter Preis für die Netznutzungskosten bei dem jeweiligen Kabelnetzbetreiber beantragt werden kann, da die Einspeisung auf einer niedrigeren Spannungsebene erfolgt. Dies wird durch eine Erstattung realisiert und beträgt in diesem Fall 0,00378 €/kWh (SWM, 2016c). Außerdem wird, wenn die Anlage einen Jahresnutzungsgrad von mindestens 70 % erreicht, die Energiesteuer auf den Gaspreis erstattet. Diese beträgt aktuell 0,0055 €/kWh_{Gas} (Zoll, 2016).

Beim Eigenverbrauch wird nach dem EEG eine Vergütung von 0,04 €/kWh in den ersten 60.000 VHB erstattet. Hinzu kommt, seit der EEG-Novelle 2014, ein Anteil der EEG-Umlage auf den Eigenverbrauch (ÜNB, 2015). Das sind 2016 35 % auf die EEG-Umlage von 0,6354 €/kWh (§ 61 Abs. 1 EEG 2014).

Investitionskosten

Für die Investitionskosten wurden Formeln der *BHKW-Kenndaten 2014/2015 der Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.* einbezogen (Klein et al., 2014). Hier wurden die spezifischen Modulkosten in Euro je Kilowatt elektrischer Leistung und ohne Mehrwertsteuer angegeben. Daher müssen für den Endpreis die spezifischen Modulkosten noch mit der elektrischen Leistung des BHKW multipliziert werden. Außerdem wurde der Mehrwertsteuersatz von 19 % aufgeschlagen und als Faktor $F_{MwSt} = 1,19$ ausgedrückt.

Unter Berücksichtigung der *BHKW-Kenndaten 2014/2015* ergaben für ein Erdgas BHKW von 10 – 100 kW elektrischer Leistung folgende Kosten.

Modulkosten: BHKW, Schalt- und Steuerschrank, Schmierölver- und -entsorgung, Katalysator, Fernüberwachung, Abgasschalldämmkapsel, Be- und Entlüftung

$$K_{BHKW} = 5438 \text{ €} \cdot P_{el}^{-0,351} \cdot P_{el} \cdot F_{MwSt}$$

$$K_{BHKW} = 5438 \cdot 20 \text{ kW}_{el}^{-0,351} \cdot 20 \text{ kW} \cdot 1,19 = 45222,51 \text{ €}$$

Installationskosten: Transport, Aufstellung, Montage, Inbetriebnahme, Probetrieb und Abnahme

$$K_{Installation} = K_{BHKW} \cdot 0,06$$

$$K_{Installation} = 45222,51 \text{ €} \cdot 0,06 = 2713,35 \text{ €}$$

Einbindungskosten: Anbindung an Brennstoffversorgung, die Abgasleitung sowie Einbindung in das Strom- und Wärmeverteilnetz

$$K_{\text{Einbindung}} = K_{\text{Installation}} \cdot 0,39$$

$$K_{\text{Einbindung}} = 45222,51 \text{ €} \cdot 0,39 = 17636,78 \text{ €}$$

Investitionszuschuss

Bei Bau eines BHKW kann eine Basisförderung für den Bau eines Mini-BHKWs bis 20 kW elektrischer Leistung beantragt werden. Da das in dieser Arbeit eingesetzte BHKW 20 kW elektrische Leistung hat, kann die Förderhöchstsumme von $Z_{\text{Investition}} = 3500 \text{ €}$ veranschlagt werden (BAFA, 2015).

Speicherkosten

Zusätzlich zum BHKW ist die Installation eines Pufferspeichers von mindestens 60 Liter je Kilowatt thermischer Leistung des BHKW vorgeschrieben, um Förderungen nach dem KWKG erhalten zu können.

Die Speicherkosten wurden dem *Taschenbuch für Heizung- und Klimatechnik* entnommen (Recknagel et al., 2011, p. 746). Die Kosten wurden dabei mit 700 – 1500 € veranschlagt. In dieser Arbeit wird dabei der Höchstbetrag von 1500 € verwendet. Die thermische Leistung des BHKW beträgt 42,46 kW (siehe 5.2. Dimensionierung BHKW).

$$K_{\text{Speicher}} = 1,5 \text{ €} \cdot 60 \text{ L/kW}_{\text{th}} \cdot P_{\text{th}}$$

$$K_{\text{Speicher}} = 1,5 \text{ €} \cdot 60 \text{ L/kW}_{\text{th}} \cdot 42,46 \text{ kW} = 3821,4 \text{ €}$$

Speicherzuschuss

Bei Installation eines neuen hocheffizienten BHKW können weitere Zuschüsse beantragt werden. Bei einem BHKW mit 20 kW elektrischer Leistung wird ein Investitionszuschuss von 3500 € gewährt (BAFA, 2015). Des Weiteren wird der Bau eines Pufferspeichers mit 250 € je installiertem Kubikmeter Speichervolumen vergütet (Z_{Speicher}) (BAFA, 2014).

$$\text{Speichergröße} = 60 \text{ L/kW}_{\text{th}} * 42,46 \text{ kW}_{\text{th}} = 2547,6 \text{ L} \approx 2,5 \text{ m}^3$$

d.h. 2 installierte Kubikmeter, daraus folgt

$$Z_{\text{Speicher}} = 250 \text{ €/m}^3 * 2 \text{ m}^3 = 500 \text{ €}$$

Die Gesamtkosten der Investition beläuft sich damit auf:

$$K_{Investition} = K_{BHKW} + K_{Installation} + K_{Einbindung} + K_{Speicher} - Z_{Investition} - Z_{Speicher}$$

$$K_{Investition} = 45222,51 \text{ €} + 2713,35 \text{ €} + 17636,78 \text{ €} + 3821 \text{ €} - 3500 \text{ €} - 500 \text{ €} = 65393,68 \text{ €}$$

Betriebskosten

Der Motor eines BHKW muss in gewissen Intervallen gewartet und instandgesetzt werden. Die *Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.* hat in ihrem Buch *BHKW-Kenndaten 2014/2015* eine Funktion für die anfallenden Kosten aufgrund einer Umfrage erstellt. Dies geschah auf Grundlage der VDI 4680, *Blockheizkraftwerke – Grundsätze für die Gestaltung von Serviceverträgen*. Der Umfang der erstellten Kostenfunktion umfasst Inspektion, Wartung, Instandsetzung und Generalüberholungen alle 30.000 – 60.000 Betriebsstunden. Die Funktion drückt die Instandhaltungskosten in Eurocent pro Stunde Laufzeit aus (Klein et al., 2014).

$$k_{Instandsetzung} = 6,6626 \cdot P_{elBHKW}^{-0,25}$$

$$k_{Instandsetzung} = 6,6626 \cdot 20 \text{ kW}_{elBHKW}^{-0,25} = 3,1505 \text{ Cent/h}$$

Zuletzt kommen noch jährliche Kosten hinzu. Diese sind im Falle des BHKW die Schornsteinfegerkosten. Nach dem *Schornsteinfegergesetz (SchfG)* besteht für den Eigentümer von Grundstücken und Räumen eine Überprüfungspflicht der Feuerstätten zum Erhalt der Feuersicherheit.

Im Fall der Landeshauptstadt München sind dies Abgasmessungen alle 3 Jahre à 120 € und zwei Feuerstättenbescheide innerhalb von 7 Jahren à 50 €.

Auf 1 Jahr gerechnet sind dies Kosten von:

$$k_{Schornsteinfeger} = 120 \text{ €/3 Jahre} + 2 \cdot 50 \text{ €/7 Jahre} = 54,29 \text{ €/Jahr}$$

Amortisation

Zur Ermittlung der Amortisation wurden die Kosten, Erlöse, Vergütungen und Zuschüsse mit Hilfe der Simulation auf Basis der Viertelstundenwerte ermittelt.

Die Erlöse pro Jahr werden wie folgt ermittelt:

$$\begin{aligned} & \text{Einsparungen Strombezug} \\ & + \text{Einsparungen Erzeugung Wärme über Brennwertkessel} \\ & + \text{KWK Zuschlag Einspeisung} \\ & + \text{KWK Zuschlag Eigenverbrauch} \\ & + \text{Vergütung Einspeisung EEX} \\ & + \text{Erstattung Energiesteuer} \\ & + \text{Erstattung Netznutzungsgebühren} \\ & - \text{Kosten Gaseinsatz} \\ & - \text{EEG-Umlage Eigenverbrauch} \\ & - \text{Instandsetzungskosten} \\ & - \text{Kosten Schornsteinfeger} \\ & = \underline{\underline{\text{Jährlicher Erlös}}} \end{aligned}$$

Der jährliche Erlös des BHKW beläuft sich auf 20445 €/Jahr in Fall 2 und 20097 €/Jahr in Fall 4 mit optimierten Lastverlauf.

Als Kapitalkosten wird ein Kredit der KfW mit einem Zinssatz von 0,05 % zugrundegelegt, mit der kürzesten Laufzeit von 10 Jahren (KfW, 2016b). Die über die Zeit kumulierten Zinskosten wurden mit Hilfe des Tilgungsrechners der *FHM Finanzberatung* berechnet und belaufen sich auf 164,91 € (FHM, 2016).

Der Einfachheit halber wurde, wie bei der Photovoltaikanlage, die statische Amortisation gewählt.

Folgende Amortisationen ergaben sich dadurch

$$\text{Amortisationszeit} = \frac{\text{Investitionskosten} + \text{Kapitalkosten}}{\text{durchschnittlicher Gewinn/a}}$$

$$\text{Amortisation}_{\text{Fall 2}} = \frac{65393,68 \text{ €} + 164,91 \text{ €}}{20445 \text{ €/a}} = 3,2 \text{ Jahre}$$

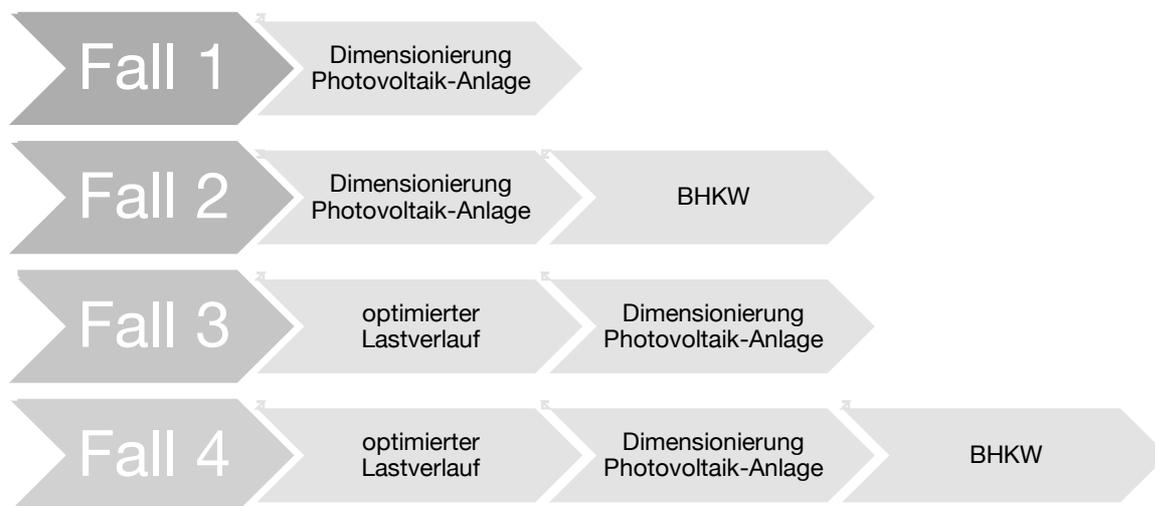
$$\text{Amortisation}_{\text{Fall 4}} = \frac{65393,68 \text{ €} + 164,91 \text{ €}}{20097 \text{ €/a}} = 3,3 \text{ Jahre}$$

Da die Einspeise- und Eigenverbrauchsvergütung nach EEG nur für die ersten 60000 Vollbenutzungsstunden gezahlt werden, wurden in einer weiteren Betrachtung die Erlöse ohne EEG-Vergütung berechnet. So ergaben sich noch Erlöse von 9930 €/Jahr im Fall 2 und 7360 €/Jahr in Fall 4.

6 Fazit und Ausblick

Ziel dieser Abschlussarbeit im Baureferat der Landeshauptstadt München war die Überprüfung des Eigenverbrauchsanteiles einer Photovoltaik-Anlage mit variabler Dimensionierung, die theoretische Optimierung des elektrischen Lastverlaufes anhand von Maßnahmenvorschlägen nach der Begehung der Liegenschaft, sowie die Simulation der Installation eines wärmegeführten Blockheizkraftwerkes, um die Wärmesenke des Schwimmbades zu bedienen.

Zur Übersicht werden die verschiedenen Fälle noch einmal schematisch dargestellt.



Eine Hauptannahme war, dass ein BHKW mit seiner durchgehenden Stromerzeugung die elektrische Grundlast bedienen kann, während die Photovoltaik-Anlage tagsüber die Spitzenlast abfängt.

Im Vergleich der Eigenverbrauchsanteile der Photovoltaik-Anlagen zwischen den vier Fällen zeigt sich deutlich, dass nur in den Fällen 1 und 3, ohne BHKW, ein hoher Eigenverbrauchsanteil zu erreichen ist. Aber auch wenn im Fall 1 der Gewinn über 20 Jahre höher ausfällt und sich die Anlage schneller amortisiert, sollte beachtet werden, dass im Fall 3 die Optimierung des Lastverlaufes auch Einsparungen im Strombezug von 24804 kWh pro Jahr mit einer Einsparnis von aktuell 5583,38 € pro Jahr nach sich zieht. Daher wird bei einer Anlage ohne BHKW der Fall 3 empfohlen.

In den Fällen 2 und 4 hingegen stellt die Installation einer Photovoltaik-Anlage neben einem BHKW kaum einen Vorteil für das Erreichen hoher Eigenverbrauchsanteile dar. Denn wird ein BHKW zur Betrachtung hinzugezogen, so reduzieren sich die Eigenverbrauchsanteile der Photovoltaik-Anlage erheblich. Das liegt daran, dass das BHKW wärmegeführt ausgelegt wurde. Daraus resultierte eine elektrische Leistung des BHKW von 20 kW. Durch diese, im Vergleich zur elektrischen Grundlast der Liegenschaft, hohe Dimensionierung, ergibt sich ein Eigendeckungsanteil des BHKW von 89,39 % im Fall 2 und 74,01 % in Fall 4. Aufgrund des geringen Restanteils der Eigendeckung wird die Installation einer zusätzlichen Photovoltaik-Anlage in diesen Szenarien nicht empfohlen.

Für die Liegenschaft der Grundschule in der Bergmannstr 36 erscheint die Entscheidung für eine der beiden Technologien, BHKW oder Photovoltaik, an diesem Punkt sinnvoll.

Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten wird ein BHKW empfohlen. Wegen der gleichzeitigen Produktion von Wärme und Strom wird ein jährlicher Gewinn von 20445 € in Fall 2 und 20097 € in Fall 4 generiert und ermöglicht eine Amortisation in 3,2 beziehungsweise 3,3 Jahren. Selbst nach Ablauf der Förderung nach 60000 Vollbenutzungstunden, generiert das BHKW immer noch einen Gewinn von 9930 €/a im Fall 2 und 7360 €/a in Fall 4. Dies ist ein höherer Gewinn als durch Photovoltaik, welche im Fall 1 bei voller Ausbaustufe von 68 kW Peak, 3504 €/a erwirtschaften würde. Wie in Fall 3 wird auch hier die Variante mit elektrischer Optimierung empfohlen, da die Einsparungen höher sind als die Differenz der Erlöse der Fälle 3 und 4.

Abschließend ist noch zu sagen, dass eine Photovoltaikanlage durchaus auch in Verbindung mit einem BHKW denkbar wäre. Dafür müsste die entsprechende Schule aber größer sein als die Grundschule in der Bergmannstr. 36 bei gleicher Beckendimension. Eine größere Schule könnte einen höheren absoluten Verbrauch elektrischer Energie aufweisen, den Eigenverbrauchsanteil erhöhen und den Einsatz einer Photovoltaikanlage wieder wirtschaftlich machen. Das heißt, alle Umstände müssen vor einer Entscheidung im Einzelfall geprüft werden.

Ausblick

Auch wenn die Empfehlung in dieser Arbeit für den Einsatz eines BHKW ausfällt, so zeigen Fall 1 und 3 deutlich, dass die Photovoltaikanlagen allein auf einen hohen Eigenverbrauchsanteil kommen. Durch die stark gefallen Anlagenpreise und den aktuellen Einspeisevergütungen können auch großflächige Anlagen durchaus ökonomisch arbeiten. Daher ist bei einer vergleichbaren Schule ohne Schwimmbad der Einsatz von Photovoltaik selbst mit einer großflächigen Anlage wirtschaftlich attraktiv. Es ist aber davon auszugehen, dass die Einspeisevergütung weiterhin fallen wird und die Installationspreise und Einspeisevergütungen bei zukünftigen Entscheidungen neu zu bewerten sind.

Im Hinblick auf die Nutzungsmöglichkeiten von BHKW, welche noch immer zu den neueren Technologien zur Wärme- und Stromproduktion gehören und nicht flächendeckend eingesetzt werden, ist m.E. das Potential sehr groß. Im Zusammenwirken mit Photovoltaik und Windkraft kann diese Technik als ein wichtiger Faktor im Ausbau von regenerativen Energien angesehen werden. BHKW können bei richtiger Dimensionierung und entsprechenden Wärmesenken durchaus viele Vollbenutzungstunden erreichen. Mit der Technik *Power to Gas*, welche überschüssigen Strom in Wasserstoff und Methan umwandelt, um sie in das Gasnetz einzuspeisen, kann das BHKW in Zukunft vielleicht auch das Image der Brückentechnologie ablegen und als regenerative Stromerzeugungsanlage den Strommix in Deutschland bereichern.

7 Quellenverzeichnis

BAFA, Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2015) Zuschuss für Mini- KWK - Anlagen. Zuschuss für Mini-KWK-Anlagen., [online]
http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/mini_kwk_anlagen/ - [6.1.2016].

BAFA, Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2014) Merkblatt Wärme- und Kältespeicher [online]
http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/publikationen/merkblatt_speicher.pdf [15.11.2016].

bdew, B Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2015) Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2015) [online]
[https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20150511-o-energie-info-erneuerbare-energien-und-das-eeg-zahlen-fakten-grafiken-2015-de/\\$file/Energie-Info_Erneuerbare_Energien_und_das_EEG_2015_11.05.2015_final.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20150511-o-energie-info-erneuerbare-energien-und-das-eeg-zahlen-fakten-grafiken-2015-de/$file/Energie-Info_Erneuerbare_Energien_und_das_EEG_2015_11.05.2015_final.pdf) [5.11.2015].

Berliner Energieagentur (2010) KWK Modellstadt Berlin - Energie effizient nutzen. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt [online]
http://www.ufu.de/media/content/files/Fachgebiete/Klimaschutz/KWK/kwk_informationsammlung.pdf [2.2.2016].

BMWi, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015) Primärenergieverbrauch in Deutschland 2015. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. [online]
<https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energiestatistiken-energiegewinnung-energieverbrauch,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [4.2.2016].

BMWi, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2014) Erneuerbare-Energien-Gesetz 2014. EEG 2014. [online] <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Erneuerbare-Energien/eeg-2014.html> [6.1.2016].

BSW Solar, Bundesverband Solarwirtschaft (2014) EEG-Reform: Das ändert sich ab August für Solarstrom-Erzeuger. [online]
https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/pm_eeg2014.pdf [6.12.2015].

Bund der Energieverbraucher e.V. (2016) Untertischboiler nach Benutzung ausschalten. [online] http://www.energieverbraucher.de/de/Tipp34-Boiler-aus__1922 [27.1.2016].

Bundesnetzagentur (2016) Pressemitteilung: EEG-Umlage auf stabilem Niveau. [online]
https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Presse/Pressemitteilungen/2015/151015_EEG.pdf?__blob=publicationFile&v=4 [6.2.2016].

Europäische Union (2016) PV potential estimation utility. PVGIS Interaktive Karten. [online]
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=de&map=europe> [28.1.2016].

FHM, Finanzberatung (2016) Der Tilgungsrechner [online]
<https://tilgung.fmh.de/rechner3/FMH2/tilgungsrechner> [18.2.2016].

Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (2014).

Jordan, D.C., Kurtz, S.R. (2012) Photovoltaic Degradation Rates — Metaanalyse.

KfW, Kreditbank für Wiederaufbau (2016)a IKK – Investitionskredit Kommunen (208) [online]
[https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Kommunale-soziale-Basisversorgung/Finanzierungsangebote/Investitionskredit-Kommunen-\(208\)/#2](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Kommunale-soziale-Basisversorgung/Finanzierungsangebote/Investitionskredit-Kommunen-(208)/#2) [18.2.2016].

KfW, Kreditbank für Wiederaufbau (2016)b. IKK – Energieeffizient Bauen und Sanieren (217/218) [Online] [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Energetische-Stadtsanierung/Finanzierungsangebote/Energieeffizient-Sanieren-Kommunen-\(218\)/#2](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Energetische-Stadtsanierung/Finanzierungsangebote/Energieeffizient-Sanieren-Kommunen-(218)/#2) [18.2.2016].

Klein, C., Roznski, K., Gailfuß, M., Kukuk, J., Beck, T. (2014). BHKW-Kenndaten 2014/2015. Berlin: Verlag für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch.

Klingebiel, M. (2009) Blockheizkraft - Kleine Blockheizkraftwerke Technik, Planung und Genehmigung. Stuttgart: Wirtschaftsministerium.

Kost, C., Mayer, J.N., Thomsen, J., Hartmann, N., Senkpiel, C., Phillips, S., Nold, S., Lude, S., Schlegel, T. (2013) Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien (Studie). Freiburg : Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.

Lenz, K. (2012) Deutscher Bundestag - Der Einstieg zum Ausstieg aus der Atomenergie [online]
https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2012/38640342_kw16_kalender_atomausstieg/208324 [5.1.2016].

Leuschner, U. (ohne Jahr) Förderung der Erneuerbaren Energien [online]. Förderung der Erneuerbaren Energien. [online] <http://www.udo-leuschner.de/basiswissen/SB103-06.htm> [6.1.2016].

Lindenfels, C. von, Wydor, M. (2009) Betrachtung des möglichen Blockheizkraftwerk-Einsatzes in einem öffentlichen Hallen- und Freibad, Projekt-Arbeit, Fachhochschule Hannover Fakultät II – Abteilung Maschinenbau.

Quaschnig, V. (2016) Installierte Photovoltaikleistung verschiedener Länder [online]. Weltweit installierte Photovoltaikleistung. [online] <http://www.volker-quaschnig.de/datserv/pv-welt/index.php> [7.1.2016].

Recknagel, H., Sprenger, E., Schramek, E.-R. (2011) Taschenbuch für Heizung- und Klimatechnik, Aufl. 75, München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH.

Rieste, G. (2016) Vergleich KVG,VVG,EVG | Lichtplanung [online]
<http://www.rieste.at/Lichtplanung/vergleich-kvgvvgevg.html> [27.1.2016].

Stappenbeck, F., Ott, F., F. Nennstiel (2010) Machbarkeitsstudie und Wirtschaftlichkeitsberechnung für die Wärmeversorgung der Gebäude Dreifachturnhalle, Mehrzweckhalle, Hallenbad, Kindergarten und Grundschule in der Gemeinde Drochtersen [online] <http://www.drochtersen.de/files/MS-drochtersen.pdf> [6.1.2016].

SWM, S.M., (2016)a. Brennwert Erdgas [online]
<https://www.swm.de/privatkunden/installateure/faq-inbetriebnahme/faq-erdgas.html> [28.1.2016].

SWM, S.M. (2016)b. Verfahren zur Ermittlung von Zustandszahl und Abrechnungsbrennwert [online] <https://www.swm-infrastruktur.de/dam/jcr:5bdb9766-51f6-4bec-b7d7-fceb71fa8d84/verfahren-ermittlung-zustandszahl-abrechnungsbrennwert.pdf> [28.1.2016].

SWM, S.M. (2016)c. Stromnetzentgelte – Umlagen gemäß KWKG, gemäß § 19 Abs.2 StromNEV und gemäß § 17f Abs. 5 EnWG (Offshore-Umlage) sowie Konzessionsabgabe und Entgelte für Differenzmengen [online] <https://www.swm-infrastruktur.de/dam/jcr:9bdb8c1b-0679-4175-a581-2d51ca48b2f3/preisblatt2016-7.pdf> [6.2.2016].

ÜNB, Ü. (2015) Konzept der Übertragungsnetzbetreiber zur Prognose und Berechnung der EEG-Umlage 2016 nach AusglMechV [online]
http://www.netztransparenz.de/de/file/20151015_Veroeffentlichung-EEG-Umlage-2016.pdf [7.2.2016].

Wirth, H. (2015) Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fraunhofer ISE, Freiburg.
Ziegler, M., 2015. Voraussichtlicher Preis für eine Solarstromanlage in 2015 [online]
<http://www.photovoltaik-guide.de/wissenswertes/solaranlagen/investitionskosten> [7.1.2016].

Zoll (2016). Steuerentlastungsvoraussetzungen [online]
http://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verbrauchssteuern/Energie/Steuerverguenstigung/Steuerentlastung/KWK-Anlagen/Vollstaendige-Steuerentlastung/Steuerentlastungsvoraussetzungen/steuerentlastungsvoraussetzungen_no.de.html [6.1.2016].

8 Anhang

Recherche BHKW-Leistungsdaten

	Firma	Modell	Leistung		Wirkungsgrad		Strom- gesamt	Strom- kennzahl
			elektrisch	thermisch	elektrisch	thermisch		
1	2G	g-box 20	20	43	32	70,4	102,4	0,47
2	Bosch	CHPCE12N	12	27,5	30,2	69,3	99,5	0,44
3	Bosch	CHPCE20N	19	36	34	64,3	98,3	0,53
4	EAW	EW K 20 S	20	45	27,8	62,5	90,3	0,44
5	EC Power	XRGI 6	6	12,2	30,6	63	93,6	0,49
6	EC Power	XRGI 6	6	13,3	30,5	68,5	98,9	0,45
7	EC Power	XRGI 9	9	19,2	30,4	64,9	95,3	0,47
8	EC Power	XRGI 9	9	21,3	30,6	72,7	103,3	0,42
9	EC Power	XRGI 15	15	30,6	30,5	61,8	92,3	0,49
10	EC Power	XRGI 15	15	33,1	30,5	66,9	97,4	0,45
11	EC Power	XRGI 20	20	38,7	32,7	63,4	96,1	0,52
12	EC Power	XRGI 20	20	42,2	32,9	69,4	102,3	0,47
13	KW Energie	smartblock 7,5	7,5	22,1	k.A.	k.A.	109,1	0,34
14	KW Energie	KWE 12G-4 AP	12	28,3	k.A.	k.A.	101,3	0,42
15	KW Energie	smartblock 16	16	38	31	73,5	104,5	0,42
16	KW Energie	smartblock 20	20	47,8	32,2	77,2	109,5	0,42
17	Höfler	Micro T7	7	19,8	27	76,4	103,4	0,35
18	Kraftwerk	Mephisto G16+	16	35,3	31,5	69,5	101	0,45
19	Kraftwerk	Mephisto G20+	20	46,7	31,5	73,5	105	0,43
20	Na-Wa-Tec	YD075	7,5	13,5	k.A.	k.A.	k.A.	0,56
21	Na-Wa-Tec	YD095	9,5	17	k.A.	k.A.	k.A.	0,56
22	Na-Wa-Tec	YD150s	15	28	k.A.	k.A.	k.A.	0,54
23	Remeha	ELW 20-48	20	43	32	73	105	0,47
24	RMB Energie	neoTower® 7.2	7,2	17,45	29,5	71,5	101	0,41
25	RMB Energie	neoTower® 11.0	11	24	28,9	63,2	92	0,46
26	RMB Energie	neoTower® 16.0	16	30	32,7	61,2	94	0,53
27	RMB Energie	neoTower® 20.0	20	40	32	64	96	0,50
28	Steinecke		8,4	23,3	27,6	76,3	103,9	0,36
Mittelwert					30,81	68,54	99,82	0,46

Tabelle 9 Recherche BHKW-Leistungsdaten

Quellen 19.01.2016:

1. <http://www.2-g.com/de/g-box-20-bis-50-kw>
2. http://www.bosch-kwk.de/files/BHKW-Systeme_Typenübersicht_de_DE.pdf
3. http://www.bosch-kwk.de/files/BHKW-Systeme_Typenübersicht_de_DE.pdf
4. <http://www.eaw-energieanlagenbau.de/index.php/blockheizkraftwerk-bhkw.html>
5. <http://www.ecpower.eu/de/technische-daten.html>
6. <http://www.ecpower.eu/de/technische-daten.html>
7. <http://www.ecpower.eu/de/technische-daten.html>
8. <http://www.ecpower.eu/de/technische-daten.html>
9. <http://www.ecpower.eu/de/technische-daten.html>
10. <http://www.ecpower.eu/de/technische-daten.html>
11. <http://www.ecpower.eu/de/technische-daten.html>
12. <http://www.ecpower.eu/de/technische-daten.html>
13. https://www.kwenergie.de/wp-content/uploads/2015/10/smartblock-75_Infoblatt_2015_web.pdf
14. <https://www.kwenergie.de/blog/2012/06/kwe-12g-4-ap>
15. https://www.kwenergie.de/wp-content/uploads/2015/10/smartblock-16_Infoblatt_2015_web.pdf
16. https://www.kwenergie.de/wp-content/uploads/2015/10/KWE_smartblock_20_NG_20151008.pdf

17. <http://www.hoefler-bhkw.com/Produkte>
 18,19. <http://www.kwk.info>
 20,21,22. <http://www.na-wa-tec.de>
 23. http://www.remeha.de/system/files/1404/original/Remeha_ELW_Blockheizkraftwerk_01_2015.pdf?1429522974
 24. http://www.rmbenergie.de/new/web/seiten/nt7_2.html
 25. http://www.rmbenergie.de/new/web/seiten/nt11_0.html
 26. http://www.rmbenergie.de/new/web/seiten/nt16_0.html
 27. http://www.rmbenergie.de/new/web/seiten/nt20_0.html
 28. <http://www.bhkw-steinecke.de/Technische%20Daten%20elcon%208.pdf>

Recherche Photovoltaikmodule

	Hersteller/ Typ	Höhe	Breite	m2	W/m2
1	Eging/EG P60 - C	1650	990	1,63	153,05
2	Luxor/ECO LINE P60 LX-250P	1640	992	1,63	153,67
3	München Solar/MSP250AS-30	1.640	990	1,62	153,98
4	SunRise/SR-P660 250	1637	992	1,62	153,95
5	Solarwatt/Blue 60P 250	1680	990	1,66	150,31
	Mittelwert	1649,4	990,8	1,63	152,99
	gerundet	1649	991	1,63	153

Tabelle 10 Recherche Photovoltaikmodule

Quellen 15.12.2015:

1. [http://www.egingpv.com/de/download/EG-\(series\)P60-C_dm.pdf](http://www.egingpv.com/de/download/EG-(series)P60-C_dm.pdf)
 2. http://www.luxorsolar.com/root/img/pool/pdf/datenblatt/ecoline60poly/lx_db_ecoline60poly_230-250w_en.pdf
 3. <http://munchensolar.de/download/München%20Solar%20Ü%20MSPxxAS-30%20EN.pdf>
 4. http://3xl-solarsolutions.com/library/uploads/downloads/SR-P660_230-250W_Poly_Silver_1.pdf
 5. http://www.solarwatt.de/fileadmin/user_upload/pdf/datenblaetter/datenblaetter_deutsch/SOLARWATT_BLUE_60P_de_web.pdf

Recherche Heizungspumpen

Firma	Modell, vorhanden	Leistung in W	Austauschmodell	Leistung in W
Grundfos	UPc 50-60 Modell: A	120 – 375	MAGNA3 50-60 F ALPHA1 20-45 N	21 - 249
Grundfos	UP 20-45 N 150	115	150	7 - 45
Grundfos	UPE 25-60 180	40 – 100	ALPHA2 25-60 180	5 - 45
Grundfos	UPE 50-120 / F	65 – 790	MAGNA3 50-120 F	20 - 536
Grundfos	UPE 32-60 180	40 – 100	ALPHA2 32-60 180	3 - 34
Grundfos	UPS 25-60 180	40 – 100	ALPHA2 25-60 180	5 - 45
Grundfos	UPE 32-80 180	40 – 250	MAGNA3 32-80	9 - 144
Grundfos	UPS 25-80 180	140 – 245	MAGNA3 25-80	9 - 124
	Summe	600 – 2075		79 - 1222

Tabelle 11 Recherche Heizungspumpen

Die Austauschmodelle wurden mit dem *Replacment Tool* von Grundfos ermittelt.
 Quelle 5.1.2016: <http://product-selection.grundfos.com/replacement.html>

Recherche Leuchtmittel

	Modell, vorhanden	Leistung in W	Austauschmodell	Leistung in W
1	FT8/58 W/840 (T8)	58	Narva DioTronic DT-T8 28,5 W COLOONLINEUX plus	28,5
2	LT/18 W/840 (T8)	18	Narva DioTronic DT-T8 11,5 W COLOONLINEUX plus	11,5
3	S 11W/830	11	Greenlight-LED 502143	8
4	F/36 W/830 (T8)	36	Philips LEDtube Value T8 HO 18-36W 840 - 120cm	18
5	FH/35 W/840 HE (T5)	35	Narva DioTronic DT-T8 28,5 W COLOONLINEUX plus	28,5

Tabelle 12 Recherche Leuchtmittel

Quellen 12.12.2015:

1. <http://narva-bel.de/ressourcen/datenblaetter/Datenblatt%20DT-T8%2030%20W%20840%20NARVA.pdf>
2. http://www.narva-bel.de/ressourcen/datenblaetter/35312T8_0001_DABL.pdf
3. http://www.amazon.de/Lampe-Neutralwei%C3%9F-Lumen-RETROFIT-LED-Kompakt-Lampe/dp/B00C5HUCUE/ref=sr_1_2?s=lighting&ie=UTF8&qid=1453719962&sr=1-2
4. <https://www.leuchtmittelkaufen.de/philips-ledtube-value-t8-ho-18-36w-840-120cm-starter-incl>
5. <http://www.narva-bel.de/ressourcen/datenblaetter/Datenblatt%20DT-T8%2028,5%20W%20865%20NARVA.pdf>