

Adrian Himberg

**Technischer, wirtschaftlicher und
ökologischer Variantenvergleich für den
Neubau eines Bettenhauses der Waldklinik
Jesteburg unter Berücksichtigung des
Bestandes**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau - Energie und Anlagensysteme
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
Planungsgruppe M+M AG
Abteilung Mechanik
Frankenstraße 18b
20097 Hamburg

Erstprüferin: Prof. Dr. Heike Frischgesell
Zweitprüfer : Dipl.-Ing. Jens Baethke

Abgabedatum: 17.05.2018

Zusammenfassung

Adrian Himberg

Thema der Bachelorarbeit

Technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Variantenvergleich für den Neubau eines Bettenhauses der Waldklinik Jesteburg unter Berücksichtigung des Bestandes.

Stichworte

Variantenvergleich, Regenerative Wärmeerzeugung, Nutzenergiebedarfsrechnung, Wirtschaftlichkeitsberechnung

Kurzzusammenfassung

Als Entscheidungsgrundlage für den Bauherrn wurde ein Variantenvergleich zur Wärmeversorgung eines Bettenhauses unter Berücksichtigung des Bestandsbaus erstellt. Auf Basis des Nutzenergiebedarfs des Neubaus und des Bestandsgebäudes wurden sechs Varianten diskutiert. Die Varianten aus verschiedenen Kombinationen von Wärmeerzeugungssystemen sind nach dem Stand der Technik erstellt worden. Als Ergebnis des wirtschaftlichen und ökologischen Vergleichs der Varianten wird die Anschaffung eines Blockheizkraftwerkes zur Wärmeversorgung des gesamten Klinikums empfohlen.

Adrian Himberg

Bachelor Thesis title

Technical, economical and ecological comparison of heat generating systems for the new construction of a ward block for the Waldklinik Jesteburg, considering the existing building.

Keywords

Variant comparison, regenerative heat generation, utility energy requirements
Accounting, profitability calculation

Abstract

Six variants were prepared and discussed for the heat supply of a new construction of a ward block. The connecting comparison of the variants helps the client to take a decision about the heat generation system. As the basis of the comparison conduces the demand of final energy combining the new and existing building. The variants are different combinations of heat generation systems according to the state of the art. The economical and ecological comparison leads into a recommendation for a purchase of a combined heat and power plant for the heat supply of the entire hospital.

Danksagung

Für die Unterstützung bei der Bearbeitung der Bachelorthesis möchte ich mich bei meinen Arbeitskollegen bei der Planungsgruppe M+M AG, meiner Familie und Freunden bedanken.

Ein besonderer Dank gebührt Prof. Dr. Heike Frischgesell für die Betreuung der Arbeit.

Ebenso verdient Dipl.-Ing. Jens Baethke eine besondere Erwähnung, der mir die Möglichkeit gegeben hat, die Bachelorarbeit bei PGMM durchzuführen und für alle Rückfragen zur Verfügung stand.

Für die Bereitstellung von qualitativ hochwertigem Material und allzeit fachlicher Unterstützung bedanke ich mich bei meinem Kollegen Ma.-Ing. Daniel Baur.

Zu guter Letzt gilt ein herzlicher Dank meiner Freundin Joana für die mentale Unterstützung während der Bearbeitung und die regelmäßige konstruktive Kritik.

Aufgabenstellung

für die Bachelorthesis

von Herrn Adrian Himberg

Matrikel-Nummer 2169012

Thema:

Technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Variantenvergleich für den Neubau eines Bettenhauses der Waldklinik Jesteburg unter Berücksichtigung des Bestandes.

Schwerpunkte:

- Berücksichtigung gesetzlicher Rahmenbedingungen
- Nutzenergiebedarfsberechnung
- Synergieeffekt zwischen dem Neubau und dem Bestandsbau
- Variantenerstellung auf Basis der gesetzlichen Richtlinien
- Wirtschaftlichkeitsberechnung unter Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	ii
Danksagung	iii
Aufgabenstellung	iv
Inhaltsverzeichnis	v
Symbolverzeichnis	vii
Nomenklatur.....	ix
Tabellenverzeichnis	x
Abbildungsverzeichnis.....	xi
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Geothermie	3
2.1.1 Erdwärmekollektor	7
2.1.2 Erdwärmesonde	8
2.2 Blockheizkraftwerk	9
2.3 Solarthermie	11
2.3.1 Flachkollektoren	13
2.3.2 Vakuumröhrenkollektoren.....	15
3 Projekt	18
3.1 Beschreibung des Bauvorhaben	18
3.2 Bedarfsermittlung	20
3.2.1 Bestandsbau	20
3.2.2 Neubau.....	22
3.3 Variantenauswahl	26
3.3.1 Variante 0	27
3.3.2 Variante 1	28
3.3.3 Variante 2	31
3.3.4 Variante 3	33
3.3.5 Variante 4	35
3.3.6 Variante 5	38
3.3.7 Variante 6	39
4 Variantenvergleich	41

4.1	Ökonomischer Vergleich.....	41
4.1.1	Energieverbräuche.....	42
4.1.2	Betriebskosten.....	44
4.1.3	Kapitalkosten.....	46
4.1.4	Wirtschaftlichkeit.....	47
4.2	Ökologischer Vergleich.....	49
5	Systemauswahl.....	54
5.1	Grundlast.....	54
5.2	Spitzenlast.....	55
6	Zusammenfassung.....	56
	Literaturverzeichnis.....	57
	Anhang.....	xii
A.1	Wirtschaftlicher Variantenvergleich.....	xii
A.2	Ökologischer Variantenvergleich.....	xv
A.3	BHKW.....	xvi
A.4	Solarthermie.....	xvii
A.5	Photovoltaik.....	xvii
A.6	Splitkälte.....	xvii
A.7	Energiepreise.....	xviii
A.8	Eigenstromproduktion.....	xviii
A.9	Zinssatz.....	xviii
	Eidesstattliche Versicherung.....	xix

Symbolverzeichnis

Abkürzung	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Fläche
JAZ	–	Jahresarbeitszahl
n	–	Anzahl
P	W	Leistung
q	kJ/kg	spezifische Wärmeenergie
\dot{q}	W/m ²	spezifische Wärmeleistung
Q	kJ; Wh/a	Wärmeenergie
\dot{Q}	W	Wärmeleistung
W	kJ; Wh/a	Energie
ε	–	Leistungszahl
η	–	Wirkungsgrad

Indizes	Bedeutung
B	Betten
BGF	Bruttogrundfläche
Br	Brutto
$el.$	elektrisch
End	End-
$ges.$	gesamt- /gesamte
$Ges.$	Gesundheitswesen
$H.$	Heiz- /Heizung
K	Kollektor
KH	Krankenhaus
$Nutz$	Nutz -

<i>Pers.</i>	Personen
<i>Umdl.</i>	Umkleiden
<i>Verd.</i>	Verdampfungs-/ Verdampfer
<i>WWB</i>	Warmwasserbereitung

Nomenklatur

Abkürzung	Bedeutung
BHKW	Blockheizkraftwerk
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CPC	Compound Parabolic Concentrators
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
JAZ	Jahresarbeitszahl
JDL	Jahresdauerlinie
KWK	Kraftwärmekopplung
NLBL	Niedersächsisches Landesamt für Bau und Liegenschaften
PGMM	Planungsgruppe M+M AG
PV	Photovoltaik
WP	Wärmepumpe
WWB	Warmwasserbereitung

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Nutzenergiebedarfswerte verschiedener Gebäude (in Anlehnung an [8])	23
Tabelle 3.2: Energiebedarf zur Warmwasserbereitung verschiedener Gebäude (in Anlehnung an [11]).....	24
Tabelle 3.3: Übersicht über den Wärmebedarf	26
Tabelle 4.1: Übersicht über die Varianten	42
Tabelle 4.2: Energieverbräuche der Varianten	43
Tabelle 4.3: Energiepreise (in Anlehnung an [1] [9] [35] [36] [37]).....	44
Tabelle 4.4: Betriebskosten der Varianten.....	45
Tabelle 4.5: Kapitalkosten der Varianten	47
Tabelle 4.6: Wirtschaftlichkeit der Varianten.....	48
Tabelle 4.7: Stoffdaten Energieträger [20] [22] [27].....	49
Tabelle 4.8: ökologischer Vergleich	51
Tabelle 4.9: Ergebnis des Variantenvergleichs.....	52
Tabelle A.1: wirtschaftlicher Variantenvergleich.....	xii
Tabelle A.2: ökologischer Variantenvergleich	xv
Tabelle A.3: Daten BHKW [39]	xvi
Tabelle A.4: Daten Solarthermie	xvii
Tabelle A.5: Daten Photovoltaik	xvii
Tabelle A.6: Daten Splitkälte [18].....	xvii
Tabelle A.7: Energiepreise	xviii
Tabelle A.8: Daten Eigenstromproduktion.....	xviii
Tabelle A.9: Zinssatz [10]	xviii

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Aufbau einer Sole-/ Wasser-Wärmepumpe [12]	4
Abbildung 2.2: Zustandsänderung im ph-Diagramm (in Anlehnung an [23])	5
Abbildung 2.3: Schematische Darstellung eines Erdwärmekollektors [26]	7
Abbildung 2.4: Jahresgang der Temperatur in verschiedenen Tiefen [21]	8
Abbildung 2.5: Sondenarten [21]	8
Abbildung 2.6: Effizienzvergleich BHKW zu konventioneller Erzeugung [42]	10
Abbildung 2.7: Aufbau eines BHKW [14]	11
Abbildung 2.8: Aufbau einer solarthermischen Anlage zur Heizungsunterstützung [44]	12
Abbildung 2.9: Schematischer Aufbau eines Flachkollektors [33]	13
Abbildung 2.10: Wärmeübertragungen am Kollektor im Schema [31]	14
Abbildung 2.11: Wirkungsgrad eines Flachkollektors in Abhängigkeit zur Temperaturdifferenz [39]	15
Abbildung 2.12: Aufbau eines Vakuumröhrenkollektors [34]	16
Abbildung 2.13: Aufbau einer Röhre eines Heat-Pipe-Kollektors [39]	17
Abbildung 2.14: Wirkungsgrad eines Vakuumröhrenkollektors in Anhängigkeit zur Temperaturdifferenz [39]	17
Abbildung 3.1: Lageplan Walklinik Jesteburg [32]	18
Abbildung 3.2: Jahresdauerlinie des Bestandsbaus (in Anlehnung an [13])	22
Abbildung 3.3: Jahresdauerlinie des Neubaus (in Anlehnung an [13])	25
Abbildung 3.4: Schema der Variante 0	28
Abbildung 3.5: Schema der Variante 1	29
Abbildung 3.6: Jahresdauerlinie der Variante 1 (in Anlehnung an [13])	31
Abbildung 3.7: Schema der Variante 2	31
Abbildung 3.8: Tagesgänge der Wärmelast einer Wohnsiedlung [3]	33
Abbildung 3.9: Schema Variante 3	34
Abbildung 3.10: Vergleich Wärmebedarf und Wärmeertrag durch Solarthermie (in Anlehnung an [19])	35
Abbildung 3.11: Schema Variante 4	36
Abbildung 3.12: Jahresdauerlinie der Variante 4 (in Anlehnung an [13])	38
Abbildung 3.13: Schema Variante 5	39
Abbildung 3.14: Schema Variante 6	39
Abbildung 3.15: Jahresdauerlinie Variante 6 (in Anlehnung an [13])	40

1 Einleitung

Bei der Projektierung von Neubauten ist in Deutschland auf die Einhaltung diverser Richtlinien und Gesetze zu achten. Bei der Planung der Energieversorgung sind in erster Linie die Energieeinsparverordnung (EnEV), das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) zu beachten.

Langfristige Zielsetzung dieser Vorschriften ist die Schonung der Ressourcen fossiler Brennstoffe und die Verringerung von Kohlenstoffdioxid (CO₂)-Emissionen zum Klimaschutz. Das Ziel soll durch den vermehrten Einsatz regenerativer Energiesysteme, sowie die Steigerung der energetischen Qualität von Gebäuden erreicht werden. Darunter ist zu verstehen, dass der Endenergiebedarf für die Nutzung von Gebäuden, z.B. durch erhöhte Wärmeisolierung, gesenkt wird.

Die EnEV dient der Einsparung von Energieträgern zu Versorgung von Gebäuden. Die Verordnung schreibt vor Neubauten so auszuführen, dass der Primärenergiebedarf zur Unterhaltung des Gebäudes einen aktuellen Standard nicht überschreitet. Der Primärenergiebedarf steht in direktem Zusammenhang zum Nutzenergiebedarf für die Beheizung, Warmwasserbereitung (WWB), Kühlung, Belüftung und Stromversorgung des Gebäudes. Der Nutzenergiebedarf wird maßgeblich von der Nutzung des Gebäudes und von der Qualität der Gebäudehülle beeinflusst. Die Höhe des Nutzenergiebedarfs wird durch die Wahl der technischen Anlagen nicht beeinflusst.

Durch den Einsatz von Anlagen mit einem hohen Wirkungsgrad oder Anlagen, die regenerative Energien nutzen, ist es hingegen möglich den Primärenergiefaktor und somit den Primärenergiebedarf zu senken. In der EnEV wird außerdem die Menge an erzeugtem Strom aus regenerativen Energien dem Primärenergiebedarf gegengerechnet. Zur Einhaltung der EnEV ist eine enge Zusammenarbeit zwischen den Planern des Hochbaus und der Gebäudetechnik erforderlich.

Das EEWärmeG fordert einen Anteil der Energie für die Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden aus erneuerbaren Energien bereitzustellen. Der Bauherr ist dazu verpflichtet die Nutzenergie zu Teilen aus Strahlungsenergie, Umweltenergie wie Energie aus der Erde oder der Luft, aus Biomasse oder Kraftwärmekopplung (KWK) bereitzustellen. Das Gesetz führt damit zu einem Anstieg an regenerativen Wärmeerzeugungsanlagen, wie Solarthermie-, Geothermie-, und Kraftwärmekopplungsanlagen, sowie deren Weiterentwicklung.

Das EEG soll Anreize zur Erzeugung und zum Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien geben. Das Gesetz regelt unter Anderem den Anschluss der regenerativen Anlagen an das öffentliche Netz. Von großer Bedeutung für den Bauherren und die Planer

ist die Vergütung des Stroms aus erneuerbaren Energien. Wird mehr Strom generiert als im eigenen Netz genutzt werden kann, wird dieser zu einem festgelegten Preis vergütet. Die Einsparung der Stromkosten durch Eigennutzung des Stroms ist in der Regel jedoch höher.

Aus den beschriebenen Vorschriften resultiert bereits in der Anfangsphase der Planung eines Neubaus die Ausrichtung auf eine nachhaltige Energiebereitstellung. Beim Neubau des Bettenhauses für die Waldklinik Jesteburg ist die Energiebereitstellung entsprechend der Gesetze zu planen. Grundlage für die Auswahl eines geeigneten Systems zur Energiebereitstellung bildet dabei ein sogenannter Variantenvergleich.

Beim Variantenvergleich werden verschiedene Systeme zur Bereitstellung der Nutzenergie dargestellt. Als Dienstleistungsunternehmen für Planung und Beratung ist die Planungsgruppe M+M AG (PGMM) mit der Planung der gesamten Gebäudetechnik für den Neubau des Bettenhauses beauftragt. Am Beginn der technischen Planung steht die Energieversorgung des Gebäudes. Aufgabe von PGMM ist dafür die Aufstellung von Varianten, die auf einen wirtschaftlichen und nachhaltigen Betrieb ausgerichtet sind. Die Varianten werden anschließend unter ökonomischen und ökologischen Aspekten verglichen. Als Ergebnis des Vergleichs wird eine Empfehlung für eine Variante abgegeben. Letztendlich obliegt dem Bauherrn die Entscheidung über die Auswahl des Energieerzeugungssystems. [4] [5] [6]

2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die theoretischen Grundlagen erläutert, die zur Projektierung notwendig sind. Für den späteren Vergleich werden die physikalischen Arbeitsweisen von regenerativen Anlagen zur Energiebereitstellung beschrieben.

2.1 Geothermie

Eine Geothermie-Anlage bezeichnet ein System zur Nutzung der Erdwärme durch Umwandlung der Wärmeenergie aus dem Erdreich in nutzbare Heizwärme oder Strom. Für die Bereitstellung von Heizwärme für Gebäude wird die Nutzung der oberflächennahen Erdwärme betrachtet. Hierzu besteht das System aus einer Wärmequellenanlage und einer Wärmepumpe (WP).

Dem oberflächennahen Erdreich wird Wärmeenergie auf einem Temperaturniveau von durchschnittlich etwa 10 °C entzogen. Um die Energie, die im Erdreich gespeichert ist, für die Beheizung von Gebäuden bzw. der Warmwasserbereitung nutzbar zu machen, wird das Temperaturniveau mittels Wärmepumpe angehoben. In diesem Zusammenhang wird nachfolgend die Sole-/Wasser-WP untersucht.

Die Sole-Wasser-WP ist ein Niedertemperatur-Energieerzeugungssystem. Der Aufbau der Anlage ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Das Wärmepumpensystem besteht aus dem Solekreislauf (1), dem Wärmepumpen- oder Kältekreislauf und dem Heizungskreislauf (5). Nachfolgend wird besonders auf den Wärmepumpenkreislauf eingegangen. Der Wärmepumpenkreislauf ist jeweils über einen Wärmetauscher mit dem Solekreislauf (2) und dem Heizungskreislauf (4) thermisch verbunden. Weitere Bestandteile sind der Kompressor (3) und das Entspannungsventil (6).

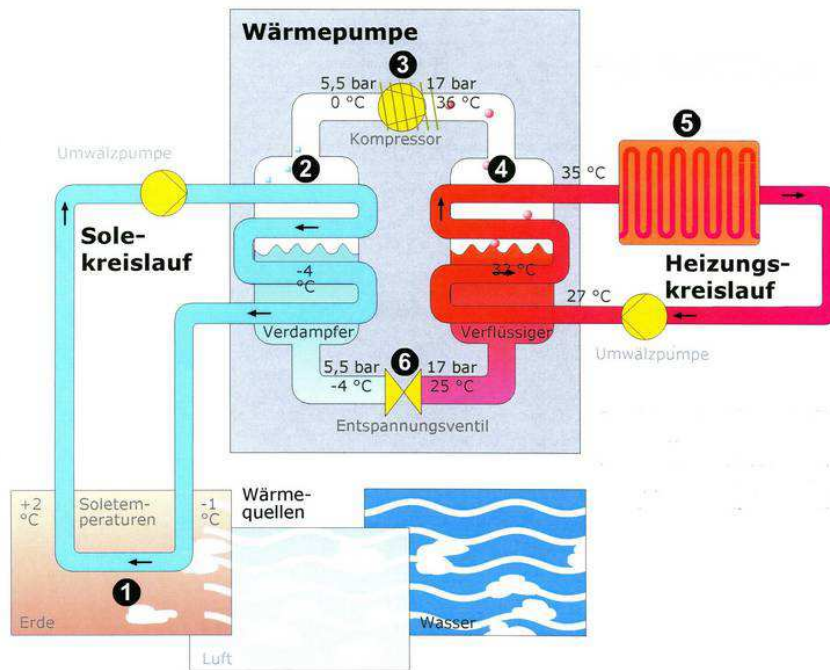


Abbildung 2.1: Aufbau einer Sole-/ Wasser-Wärmepumpe [12]

Im Solekreislauf wird ein Wasser-Glykol-Gemisch, die sogenannte Sole, als Wärmeträger genutzt. Als Wärmequelle wird in dieser Arbeit das Erdreich betrachtet, aus dem die Sole Wärmeenergie aufnimmt. Eine Pumpe befördert die Sole zum Wärmetauscher. Im Wärmetauscher wird Wärmeenergie aus dem Solekreislauf auf den Kältemittelkreislauf übertragen. Die Sole fließt anschließend zurück in die Rohrleitungen im Erdreich, in denen sie Wärmeenergie aufnimmt.

Als Wärmeträger im Wärmepumpenkreislauf wird ein Kältemittel verwendet. Kältemittel definieren sich darüber, dass sie eine niedrige Siedetemperatur aufweisen. Durch Wärmeübertragung der Sole auf das Kältemittel verdampft das Kältemittel im Wärmetauscher. Aus diesem Grund wird der Wärmetauscher auch Verdampfer genannt. Das gasförmige Kältemittel wird anschließend im Kompressor verdichtet. Im zweiten Wärmetauscher überträgt das Kältemittel Wärmeenergie an den Heizkreis. Da die Temperatur des Kältemittels dabei den Taupunkt erreicht und das Kältemittel kondensiert, wird der Wärmeübertrager als Verflüssiger oder Kondensator bezeichnet. Durch die Kondensation wird Wärmeenergie an den Wasserkreislauf übertragen. Das Kältemittel wird daraufhin im Entspannungsventil in den Ausgangszustand gebracht.

Im Heizungskreislauf zirkuliert das Wasser des Heizkreises. Das Heizwasser wird von den Wärmenutzern zum Wärmetauscher gefördert. Im Kondensator nimmt das Wasser Wärmeenergie aus dem Wärmepumpenkreislauf auf und die Temperatur erhöht sich. Das Heizwasser wird nun für die Beheizung oder Warmwasserbereitung verwendet.

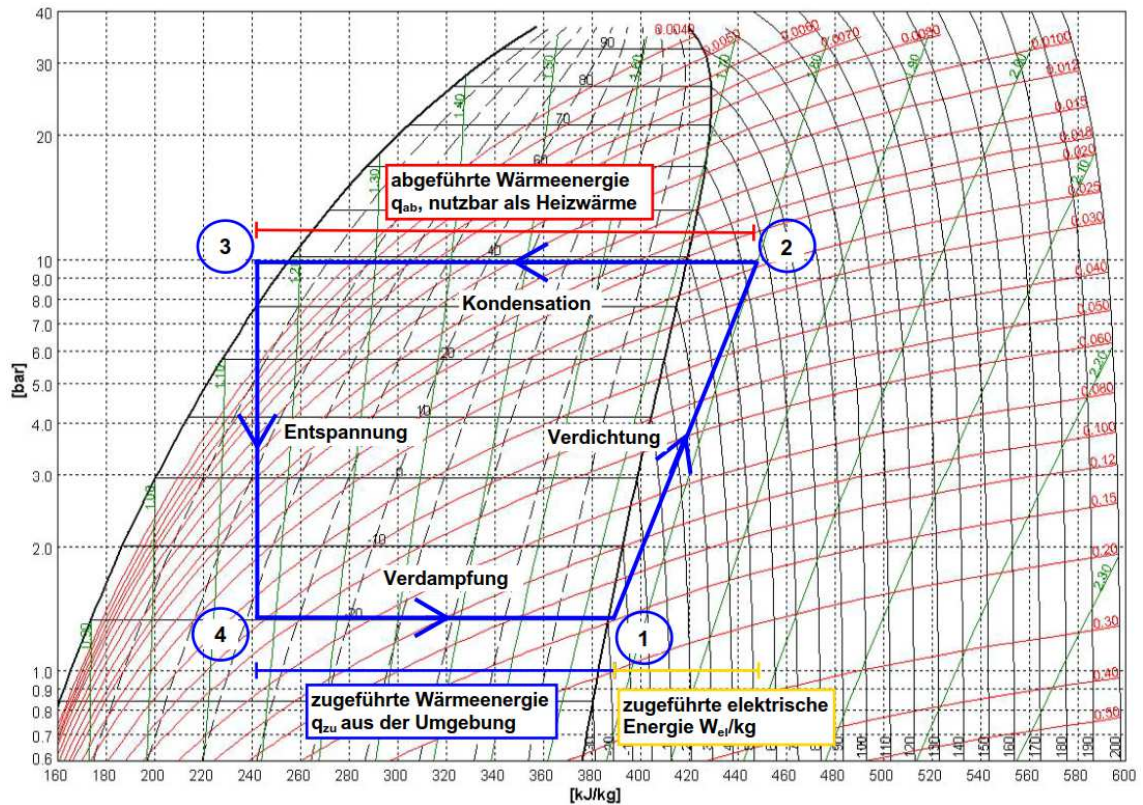


Abbildung 2.2: Zustandsänderung im ph-Diagramm (in Anlehnung an [23])

In Abbildung 2.2 sind die Zustandsänderungen des Kältemittels im Wärmepumpenkreislauf im ph-Diagramm zu erkennen. Die Zustandsänderungen sind exemplarisch im ph-Diagramm für das Kältemittel R134a eingetragen. Auf der Abszisse ist die spezifische Enthalpie in kJ/kg aufgetragen. Die Ordinate beziffert den Druck im System in bar. In Punkt 1 ist das Kältemittel vollständig im gasförmigen Zustand. Anschließend wird das Kältemittel im Kompressor verdichtet. Da der Kompressor nur gasförmige Medien verdichten sollte, ist darauf zu achten, dass sich das Kältemittel am Austritt aus dem Verdampfer vollständig im gasförmigen Zustand befindet. Während der Verdichtung des Kältemittels erhöht sich dessen Druck. Gleichzeitig erhöht sich auch der Wert der Temperatur. Bei der Verdichtung des Kältemittels wird von einer Anhebung des Temperaturniveaus gesprochen, die im Diagramm durch die positive Verschiebung auf der Ordinate gekennzeichnet ist.

Ab Punkt 2 gibt das Kältemittel im Kondensator Wärmeenergie an den Heizkreislauf ab und der Wert der Temperatur verringert sich. Währenddessen erreicht das Kältemittel die Taupunkttemperatur. Das Kältemittel beginnt zu kondensieren. Während der Kondensation bleibt die Temperatur konstant. Durch den Wechsel des Aggregatzustandes wird ohne Temperaturänderung eine hohe Energiemenge als Kondensationswärme an das Heizwasser übertragen. Am Austritt des Kondensators ist das Kältemittel vollständig im flüssigen Zustand (3).

Im Entspannungsventil wird das Temperaturniveau wieder gesenkt. Dazu wird der Druck abgebaut und der Wert der Temperatur sinkt. Während des Vorgangs beginnt das Kältemittel zu verdampfen, weil sich der Zustand ins Nassdampfgebiet verschiebt (4). Der Energiegehalt ändert sich dabei im Idealfall nicht. Im Wärmetauscher wird Wärmeenergie aus dem Solekreislauf auf das Kältemittel übertragen, wodurch dieses verdampft. Damit die Verdampfung einsetzt werden Kältemittel mit einer Siedetemperatur im negativen Grad-Celsiusbereich verwendet.

Während der Wärmeübertragung sinkt auch die Temperatur der Sole in den negativen Bereich. Damit der Wärmeträger nicht einfriert, wird ein Wasser-Glykol-Gemisch verwendet. Je nach Mischungsverhältnis kann der Gefrierpunkt der Sole bis zu -50 °C betragen. Durch die Verdampfung werden erneut hohe Energiemengen übertragen, ohne dass sich die Temperatur des Kältemittels erhöht. Am Austritt aus dem Verdampfer ist das Kältemittel vollständig im gasförmigen Zustand (1).

Die Stärke der Wärmepumpe besteht darin, dass der Großteil der aufgewendeten Energie aus der Umwelt entnommen wird. Die Umweltenergie wird durch Anhebung des Temperaturniveaus nutzbar gemacht. Dafür muss dem Kompressor elektrische Energie als Hilfsenergie bereitgestellt werden. Zum Vergleich von WP wird das Verhältnis aus Nutzen zu Aufwand als Leistungszahl definiert.

Die Leistungszahl ε einer Wärmepumpe beschreibt nach Gleichung 2.1 das Verhältnis von abgegebener Heizleistung \dot{Q}_H zu eingesetzter Verdichterleistung P_{el} . Wird die Leistungszahl über das Jahr betrachtet, ergibt sich die Jahresarbeitszahl (JAZ). Die JAZ ist nach Gleichung 2.2 der Wert des Quotienten aus dem Heizenergieertrag Q_{Heiz} und der eingesetzten elektrischen Energie W_{el} . Die Jahresarbeitszahl wird zur Beurteilung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit von WP herangezogen. Das EEWärmeG fordert für Sole-Wasser-WP Jahresarbeitszahlen von mindestens 3,8.

$$\varepsilon = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\dot{Q}_H}{P_{el}} = 1 + \frac{\dot{Q}_{Verd.}}{P_{el}} \quad (2.1)$$

$$JAZ = \frac{Q_{Heiz}}{W_{el}} = 1 + \frac{Q_{Verd.}}{W_{el}} \quad (2.2)$$

Im Betrieb wird stetig Wärmeenergie vom Erdreich an die Soleleitungen abgegeben. Aufgrund des Wärmeentzugs kühlt sich das Erdreich ab, das an die Rohrleitungen grenzt. Durch den entstehenden Temperaturunterschied im Erdreich wird Wärmeenergie vom umliegenden Erdreich in Richtung Rohrleitungen übertragen. Daher setzt die ökonomische und ökologische Nutzung einer Sole-/Wasser-WP voraus, dass vom Erdreich ausreichend Wärmeenergie nachgeführt wird.

Für die Übertragung von Wärmeenergie aus dem Boden auf die Sole werden Rohre in das Erdreich eingebracht. Die beiden geläufigsten Varianten werden nachfolgend beschrieben. [16] [21]

2.1.1 Erdwärmekollektor

Eine Möglichkeit des Wärmeentzugs aus dem Boden ist der Erdwärmekollektor. Als Erdwärmekollektoren werden horizontal verlegte Wärmeüberträgerrohre bezeichnet. Die Rohrleitungen des Solekreislaufes werden hierbei in einer Tiefe von 1-1,5 Meter horizontal in unbebautem Erdreich verlegt. In Abbildung 2.3 ist ein Erdwärmekollektor schematisch dargestellt.

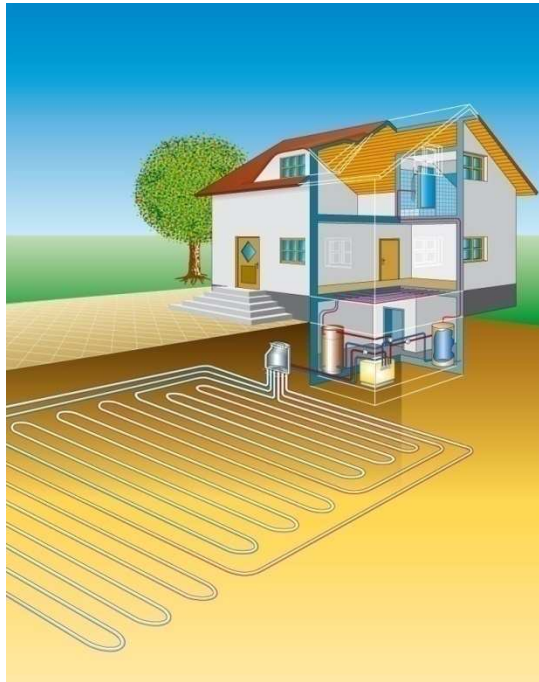


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung eines Erdwärmekollektors [26]

Bei großflächigen und hohen Gebäuden ist der Einsatz von Erdwärmekollektoren jedoch nicht möglich, weil der Freiflächenbedarf zu groß ist.

In Abbildung 2.4 ist der Verlauf der Temperatur des Erdreichs in verschiedenen Tiefen über das Jahr dargestellt. Daraus ist abzulesen, dass der Wert der Temperatur im Bereich der Kollektoren über das Jahr starken Schwankungen unterliegt. Das Kurvenprofil ergibt sich aus den Einflüssen der Lufttemperatur und der Strahlungsintensität, welche abhängig von der Jahreszeit sind. Die Abhängigkeit von den Außenbedingungen führt dazu, dass der Wert der Temperatur des Erdreichs im Winter geringer ist und die Wärmeübertragung auf die Sole verringert wird. Mit Blick auf Gleichung 2.1 führt die Verringerung der aufgenommenen Wärmeenergie zu einer geringeren Heizleistung oder zu einer niedrigeren Leistungszahl der WP.

Der Nachteil der Erdkollektoren liegt folglich in den verschlechterten Bedingungen während der Bedarf am höchsten ist. Für die Wärmeübertragung vom Erdreich auf die Sole ist außerdem eine große Fläche notwendig. Vorteil dieser Variante sind jedoch die

geringen Investitionskosten. Erdwärmekollektoren kommen aus diesen Gründen überwiegend zur Beheizung von Einfamilienhäusern zur Anwendung. [16] [21]

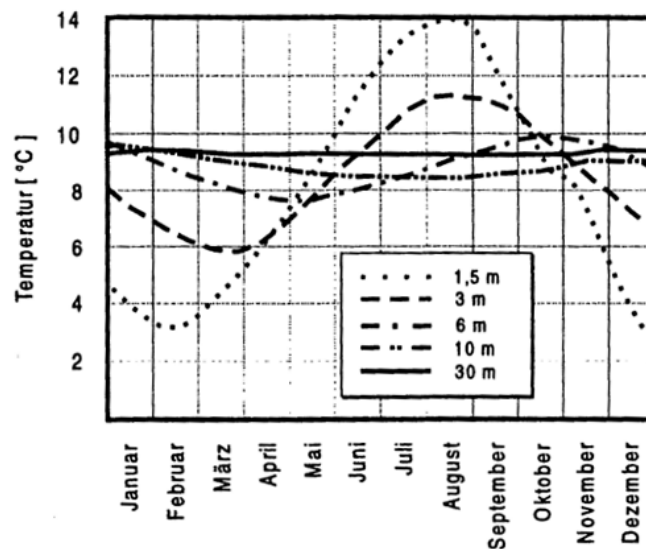


Abbildung 2.4: Jahresgang der Temperatur in verschiedenen Tiefen [21]

2.1.2 Erdwärmesonde

Zu den vertikalen Wärmeübertragern gehören die Erdwärmesonden. Wie in Abbildung 2.5 zu erkennen, wird zwischen zwei Arten der Einbringung unterschieden. Zum einen werden die Sonden in ein Bohrloch, zum Teil über 100 Meter tief, ins Erdreich eingebracht und verpresst. Zum anderen werden etwa 30 Meter tiefe, kleine Bohrungen schräg ausgeführt. Bei weichem Untergrund werden Stahlsonden bis zur selben Tiefe in den Boden gerammt. Am Häufigsten werden gebohrte Sonden ausgeführt.

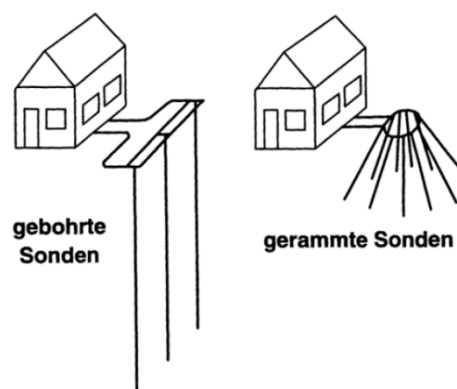


Abbildung 2.5: Sondenarten [21]

Vorteil der Erdwärmesonden ist die konstante Temperatur im tieferen Erdreich und die damit verbundene gleichbleibende Wärmeleistung. Dadurch bleibt die Leistungszahl

über das Jahr konstant und die Jahresarbeitszahl erhöht sich. Darüber hinaus ist die entzogene Leistung je Meter bei Sonden höher als bei Kollektoren. Bei der Dimensionierung der Sonden ist deshalb im Besonderen darauf zu achten, dass dem Boden nicht zu viel Wärmeenergie auf zu kurzer Länge entzogen wird. [16] [21]

2.2 Blockheizkraftwerk

Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) ist eine KWK-Anlage zur Umwandlung chemischer Energie aus einem Brennstoff in elektrische und thermische Energie. Zur dezentralen Energieversorgung werden in der Regel Ottomotoren eingesetzt, die mit Erdgas betrieben werden. Im Unterschied zum Einsatz im Kraftfahrzeug wird die Bewegungsenergie der Welle in einem Generator in elektrische Energie umgewandelt, anstatt zur Fortbewegung genutzt zu werden.

Der Motor wird bei der Energiebereitstellung als KWK-Anlage betrieben. Der größere Teil der Energie, der durch die Verbrennung des Brennstoffes freigesetzt wird, wird in Wärmeenergie umgewandelt. Im BHKW wird die Wärmeenergie zur Erwärmung von Heizwasser genutzt. Durch die KWK erreichen BHKW Gesamtwirkungsgrade von über 90 %. Der energetische Vergleich zur konventionellen Energiebereitstellung ist in Abbildung 2.6 abgebildet. Durch den Einsatz eines BHKW verringert sich die eingesetzte Primärenergie aufgrund des hohen Gesamtwirkungsgrades um mehr als 35 %. Im Vergleich zu modernen Anlagen der konventionellen Art ist der Vorteil jedoch geringer.

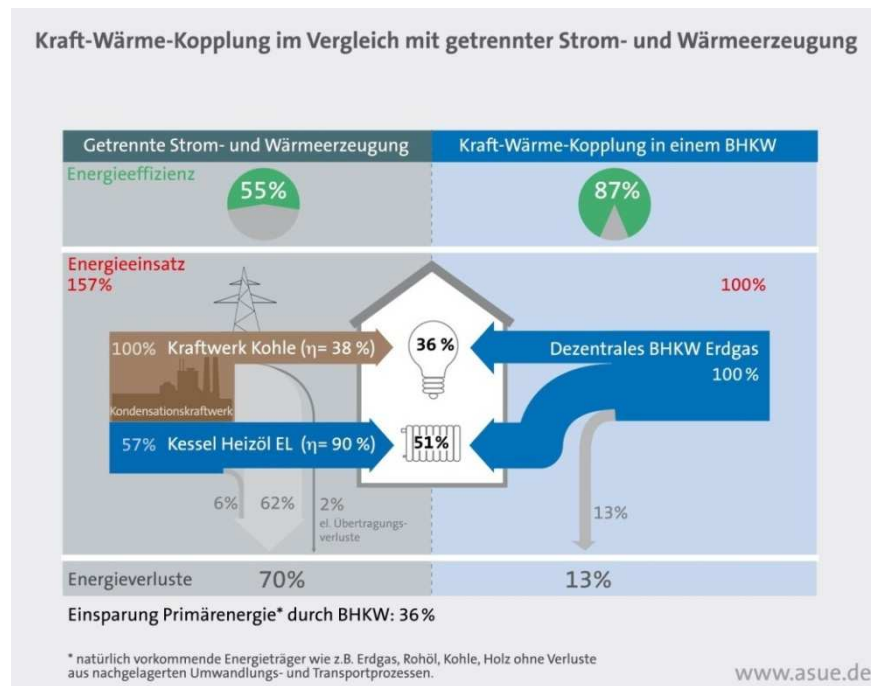


Abbildung 2.6: Effizienzvergleich BHKW zu konventioneller Erzeugung [42]

In Abbildung 2.7 ist der Aufbau und die Funktionsweise eines Motoren-BHKW dargestellt. Auf der linken Seite der Abbildung wird der Motor als Kolben symbolisiert. Brennstoff tritt in den Kolben ein und wird verbrannt. Der Druck, der durch die Verbrennung entsteht, schiebt den Kolben im Zylinder nach unten. Der Kolben ist über die Pleuelstange mit der Kurbelwelle verbunden, welche durch die Bewegung des Kolbens in Rotation versetzt wird. Der Motor arbeitet wie gewöhnlich im Viertaktbetrieb. Die Rotationsenergie der Welle wird in einem Generator in elektrische Energie umgewandelt.

Der Betrieb eines BHKW wird als KWK bezeichnet, weil auch die Wärmeenergie genutzt wird, die bei der Verbrennung entsteht und im Abgas enthalten ist. Wie im gewöhnlichen Ottomotor wird Wärmeenergie von dem Kolben an das Kühlwasser übertragen. Das Wasser wird nachfolgend im Abgaswärmetauscher weiter erwärmt, indem Wärmeenergie aus dem Abgas abgegeben wird. Das Kühlwasser wird durch einen Wärmetauscher vom Heizkreislauf getrennt. In dem Wärmetauscher überträgt das Kühlwasser Wärmeenergie an das Heizwasser. Die Wärmeenergie wird schließlich im Heizkreis an den Heizflächen abgegeben oder an das Brauchwasser übertragen. BHKW werden üblicherweise bei Temperaturen im Heiznetz von 90 °C im Vorlauf und 70 °C im Rücklauf betrieben. Die Vorlauf-Temperatur des Kühlwassers darf 70 °C nicht überschreiten, damit die Kühlung des Motors gewährleistet ist.

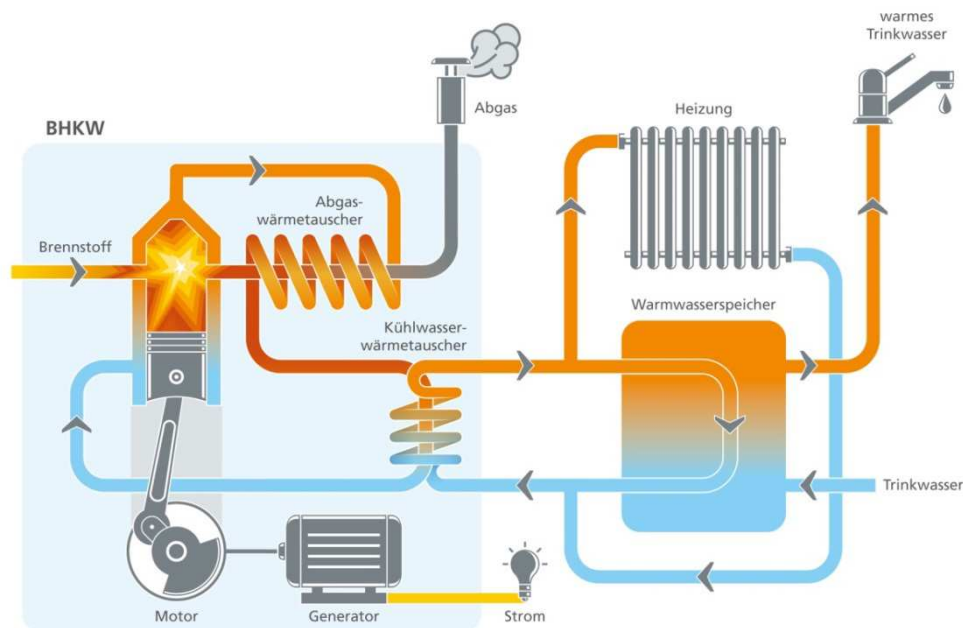


Abbildung 2.7: Aufbau eines BHKW [14]

Blockheizkraftwerke können Strom- oder Wärmegeführt betrieben werden. Ist die Betriebsweise des BHKW stromgeführt, wird vorrangig Strom nach Bedarf bereitgestellt. Stromgeführt werden in erster Linie große Anlagen betrieben, die Strom in das öffentliche Netz einspeisen. Die anfallende Wärmeenergie wird bei stromgeführten Anlagen in das Fernwärmenetz eingespeist. Neben Kraftwerken sind stromgeführte BHKW ebenso für Betriebe mit hohem Strombezug sinnvoll.

Dient die Anlage nicht als Kraftwerk, wird sie meistens wärmegeführt betrieben. Das BHKW wird dabei auf den Wärmeenergiebedarf des Objektes ausgelegt. In diesem Fall wird der generierte Strom im eigenen Netz verwendet und der Überschuss ins öffentliche Netz eingespeist. [40]

2.3 Solarthermie

Solarthermische Anlagen sind Wärmeerzeugungsanlagen aus erneuerbaren Energien, welche die Strahlungsenergie der Sonne in Wärmeenergie umwandeln. Die Umwandlung der Strahlungsenergie in Wärmeenergie wird als Absorption bezeichnet. Die Wärmeenergie wird anschließend zur Warmwasserbereitung oder Beheizung verwendet.

In Abbildung 2.8 ist eine solarthermische Anlage zur Heizungsunterstützung dargestellt. In einem Kollektor wird die Solarenergie absorbiert und an den Wärmeträger übertra-

gen. Um ein Einfrieren bei geringen Außentemperaturen zu verhindern, wird in kälteren Regionen wie Deutschland ein Wasser-Glykol-Gemisch als Wärmeträger verwendet. Durch die Verwendung von Glykol muss der Kollektorkreislauf vom Heizkreis getrennt werden. Über einen Wärmetauscher im Pufferspeicher wird die Wärmeenergie an das Heizwasser übertragen. Der Wärmeträger wird mittels einer Pumpe zurück zum Kollektor gefördert. Das Wasser aus dem Pufferspeicher wird direkt zum Heizen entnommen. Zur WWB wird Wärmeenergie des Heizwassers mittels zusätzlichen Wärmetauschers an das Brauchwasser übertragen.

Zur Ausführung kann ebenso ein getrennter Speicher innerhalb des Pufferspeichers kommen, aus dem das Brauchwasser entnommen wird. In längeren sonnenfreien Zeiten oder bei zu geringer Leistung der solarthermischen Anlage wird das Heizwasser über einen Kessel erwärmt. Möglich ist außerdem eine elektronische Nachheizung.

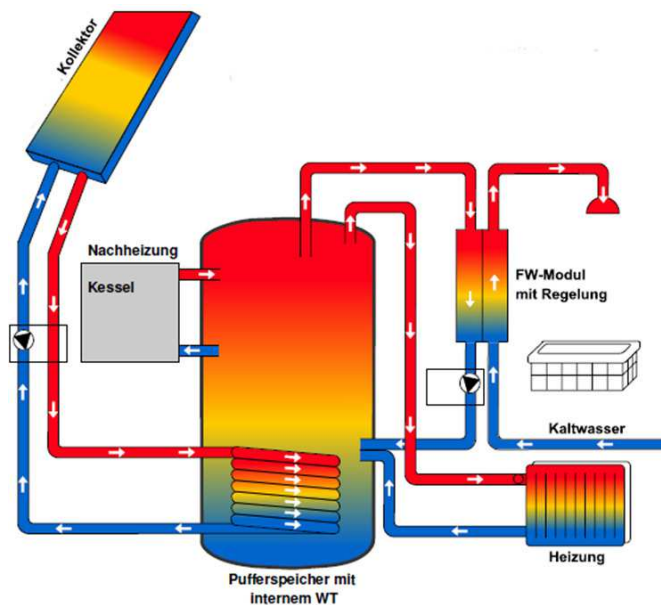


Abbildung 2.8: Aufbau einer solarthermischen Anlage zur Heizungsunterstützung [44]

Wird die solarthermische Anlage lediglich zur Erwärmung des Brauchwassers eingesetzt, wird die Wärmeenergie in einem Pufferspeicher gespeichert, aus dem das Brauchwasser direkt entnommen wird.

Zur Wärmebereitstellung für Gebäude werden lediglich solarthermische Anlagen ohne Konzentration der Strahlung eingesetzt. Zur Absorption der Strahlung kommen hauptsächlich zwei Kollektortypen zum Einsatz. In diesem Zusammenhang werden nachfolgend der Flach- und der Vakuumröhrenkollektor beschrieben. [15]

2.3.1 Flachkollektoren

Der Aufbau eines Flachkollektors ist in Abbildung 2.9 schematisch dargestellt. An der unteren Seite befinden sich die Rohrleitungsanschlüsse. Die Wärmeträgerrohre eines Flachkollektors sind in eine Absorberfläche eingebettet oder aufgeschweißt. Der Sonne zugewandt ist eine Glasscheibe als lichtdurchlässige Abdeckung eingebaut. Hinter der Absorberfläche befindet sich die Isolierung. Die Konstruktion ist in ein Gehäuse aus Aluminium eingebaut.

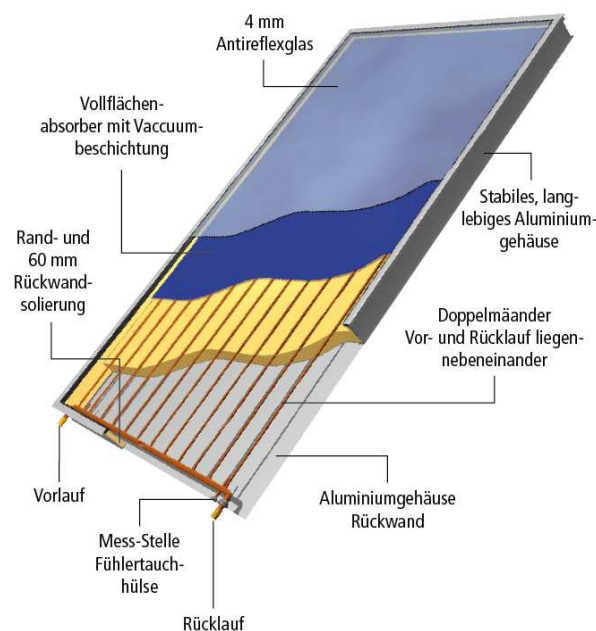


Abbildung 2.9: Schematischer Aufbau eines Flachkollektors [33]

In Abbildung 2.10 sind die Wärmeübertragungen an den Bauteilen des Solarkollektors schematisch abgebildet. Die Strahlung trifft zunächst auf die Glasscheibe. Ein geringer Anteil der Strahlungsenergie wird direkt an der Scheibe reflektiert und von ihr absorbiert. Der Großteil der Strahlungsenergie transmittiert jedoch durch das Glas. Um die Absorption des Glases zu minimieren, wird eisenarmes Glas verwendet. Das Glas wird entspiegelt und eine Antireflexbeschichtung aufgetragen, um die Reflexion der Strahlungsenergie zu verringern. Zusätzlich können infrarotdurchlässige Schichten aufgedampft werden.

Die transmittierte Strahlungsenergie wird zum Großteil am Absorber absorbiert. Eine schwarze Beschichtung erhöht den Absorptionsgrad. Eine selektive Beschichtung kann zusätzlich den vom Absorber emittierten Anteil verringern. Der emittierte Anteil beschreibt jenen Anteil der Strahlung, der von dem Absorber wieder abgestrahlt wird.

Die Energieverluste, die anfallen bis die Strahlungsenergie auf der Absorberoberfläche in Wärme umgewandelt wird, werden als optische Verluste bezeichnet. Den größeren Anteil haben die Energieverluste, die über Konvektion und Strahlung an die Umgebung abgegeben werden. Eine Isolierung im Gehäuse und die Frontscheibe verringern die Konvektionswärmeverluste.

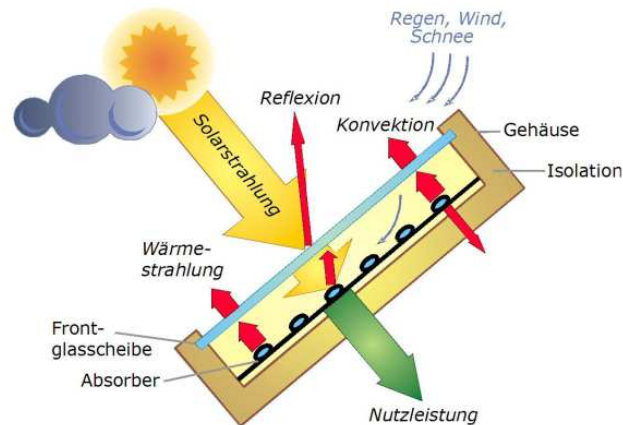


Abbildung 2.10: Wärmeübertragungen am Kollektor im Schema [31]

Der optische Wirkungsgrad von Flachkollektoren erreicht bis zu 88 %. Der Verlauf des Wirkungsgrades bei verschiedenen Strahlungsintensitäten ist Abbildung 2.11 zu entnehmen. Mit zunehmender Erwärmung und damit einhergehender Temperaturdifferenz des Kollektors zur Umgebung, verringert sich der Wirkungsgrad. Je größer die Strahlungsintensität, desto geringer sinkt der Wirkungsgrad mit der Erhöhung des Temperaturunterschiedes. Wird eine Einstrahlung von 800 W/m^2 und einer Temperaturdifferenz von 70 K angenommen, beträgt der Wirkungsgrad etwa 33 %. Die Temperaturdifferenz ergibt sich beispielsweise bei einer Vorlauftemperatur des Heizsystems von $90 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer Umgebungstemperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$

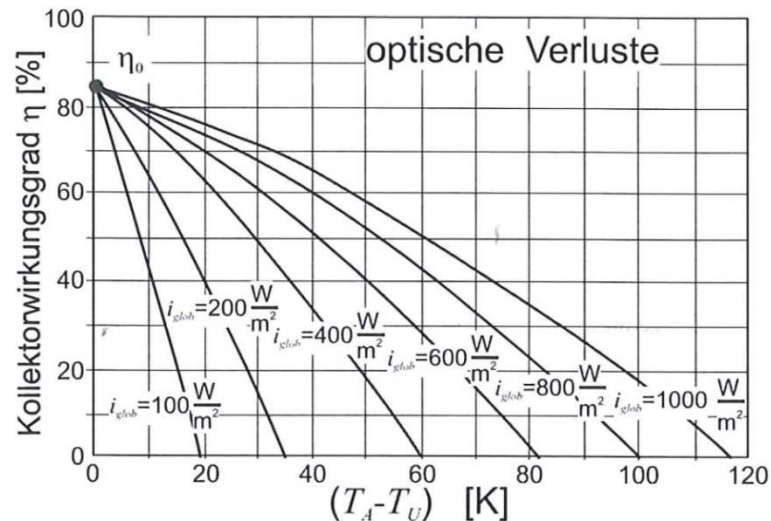


Abbildung 2.11: Wirkungsgrad eines Flachkollektors in Abhängigkeit zur Temperaturdifferenz [39]

Aufgrund des geringeren Wirkungsgrades bei hohen Temperaturdifferenzen eignen sich Flachkollektoren vor allem zur Brauchwassererwärmung oder zur Heizungsunterstützung bei Niedertemperaturheizungen. [15] [39]

2.3.2 Vakuumröhrenkollektoren

Bei Vakuumröhrenkollektoren werden zwei Bau- und Funktionsarten unterschieden. Es werden direkte Systeme verwendet, bei denen der Wärmeträger direkt erwärmt wird oder indirekte Systeme mit Heat-Pipe-Prinzip genutzt.

In Abbildung 2.12 ist ein Kollektor mit direkter Wärmeübertragung dargestellt. Die Wärmeträgerrohre werden von den Sammelleitungen (5) am oberen Rand in die einzelnen Röhren geführt. Die Röhren (2) bestehen aus zwei ineinanderlegenden Glasröhren, die miteinander verschweißt sind. Der Zwischenraum zwischen den Glasröhren ist evakuiert, sodass die Energieverluste durch konvektive Wärmeabgabe stark minimiert werden.

Die innere Glasröhre ist mit einer Absorberschicht versehen, an der die Strahlungsenergie in Wärmeenergie umgewandelt wird. Die Wärmeenergie wird über Wärmeleitbleche an die innenliegenden Wärmeträgerrohre (3) übertragen. Bei der Durchströmung der Wärmeträgerrohre wird die Wärmeenergie auf den Wärmeträger übertragen. Die Strahlung die zwischen den Röhren auf der Rückseite einfällt wird über Compound Parabolic Concentrators (CPC)-Spiegel (4) auf die Röhre gebündelt. Bei Vakuumröhrenkollektoren spielen die Energieverluste durch emittierte Wärmestrahlung eine größere Rolle, da die Konvektionswärmeverluste durch das Vakuum zwischen den Glasröhren gering sind. Der Emissionskoeffizient wird durch eine selektive Beschichtung verringert.

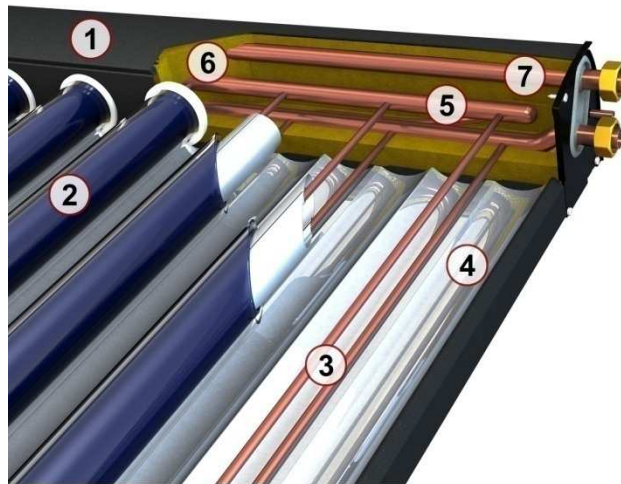


Abbildung 2.12: Aufbau eines Vakuumröhrenkollektors [34]

Kollektoren nach Heat-Pipe-Prinzip, wie in Abbildung 2.13 dargestellt, bestehen aus einer doppelwandigen Glasröhre, die evakuiert ist. Innerhalb der Röhre befindet sich das Wärmeträgerrohr. Als Wärmeträger wird ein Fluid mit geringer Taupunkttemperatur eingesetzt, damit es bereits bei geringer Strahlungsintensität verdampft. Das gasförmige Fluid steigt in der Folge nach oben zum Wärmetauscher auf, in dem es Wärmeenergie an das Wärmeträgermedium überträgt und kondensiert. Das Kondensat fließt am Boden des Rohres zurück. Die Wärmeträgerrohre sind in eine Absorberplatte eingebettet, an der die Solarstrahlung an beiden Seiten absorbiert wird. Die Absorptionsflächen sind wie bei Flachkollektoren beschichtet. Um die Effizienz zu steigern sind hinter den Röhren Spiegel angeordnet. Durch zwei getrennte Kreisläufe hat das Heat-Pipe-Prinzip Vorteile gegenüber direkten Systemen. Durch die Entkopplung ist ein einfacher Austausch einzelner Röhren möglich, der Druckverlust ist geringer und die Alterung des Glykol-Gemisches durch Überhitzung wird vermieden. Der Preis der Kollektoren ist allerdings höher als bei direkten Systemen.

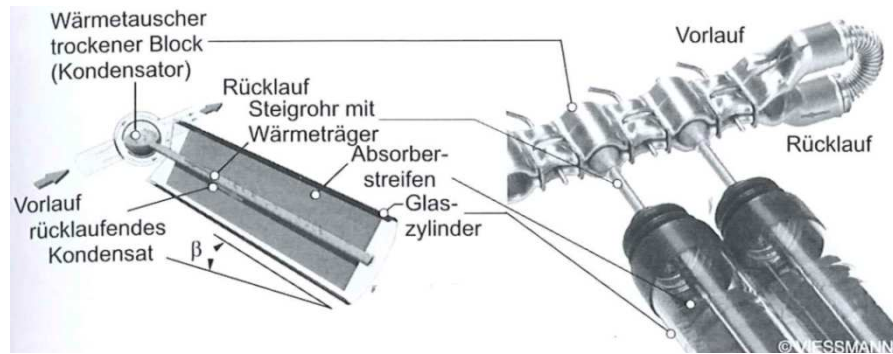


Abbildung 2.13: Aufbau einer Röhre eines Heat-Pipe-Kollektors [39]

Vakuumpipenkollektoren erreichen etwas geringere optische Wirkungsgrade von bis zu 85 %. Aufgrund der besseren Isolierung sinkt der Wirkungsgrad mit zunehmender Temperaturdifferenz nicht so stark wie bei Flachkollektoren. Dadurch können auch Temperaturen von bis zu 150 °C erreicht werden. Der Verlauf des Wirkungsgrades ist Abbildung 2.14 zu entnehmen. Anders als beim Flachkollektor beträgt der Wirkungsgrad eines Röhrenkollektors bei Einstrahlung von 800 W/m² und einer Temperaturdifferenz von 70 K noch etwa 57 %. Aufgrund des höheren Wirkungsgrades bei hohen Temperaturdifferenzen eignen sich Vakuumpipenkollektoren zur Heizungsunterstützung auch bei hohen Systemtemperaturen. Durch den komplexeren Aufbau liegen die Investitionskosten jedoch höher als bei Flachkollektoren. [15], [39], [41]

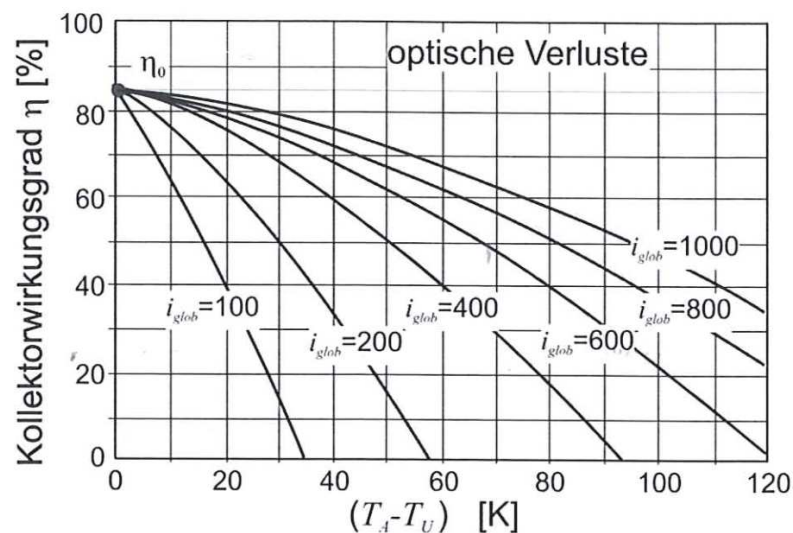


Abbildung 2.14: Wirkungsgrad eines Vakuumpipenkollektors in Abhängigkeit zur Temperaturdifferenz [39]

3 Projekt

3.1 Beschreibung des Bauvorhaben

Bei der Waldklinik in Jesteburg handelt es sich um eine neurologische Rehabilitationsklinik. Auf einer Brutto-Grundfläche von etwa 16.300 m² verfügt der Bestandsbau über 172 Betten zur Unterbringung und Betreuung von Patienten. Aufgrund steigenden Bettenbedarfs plant die Klinik den Anbau eines Bettenhauses an den Bestandsbau. Der Neubau ist im Lageplan des Klinikgeländes in Abbildung 3.1 in rot dargestellt.

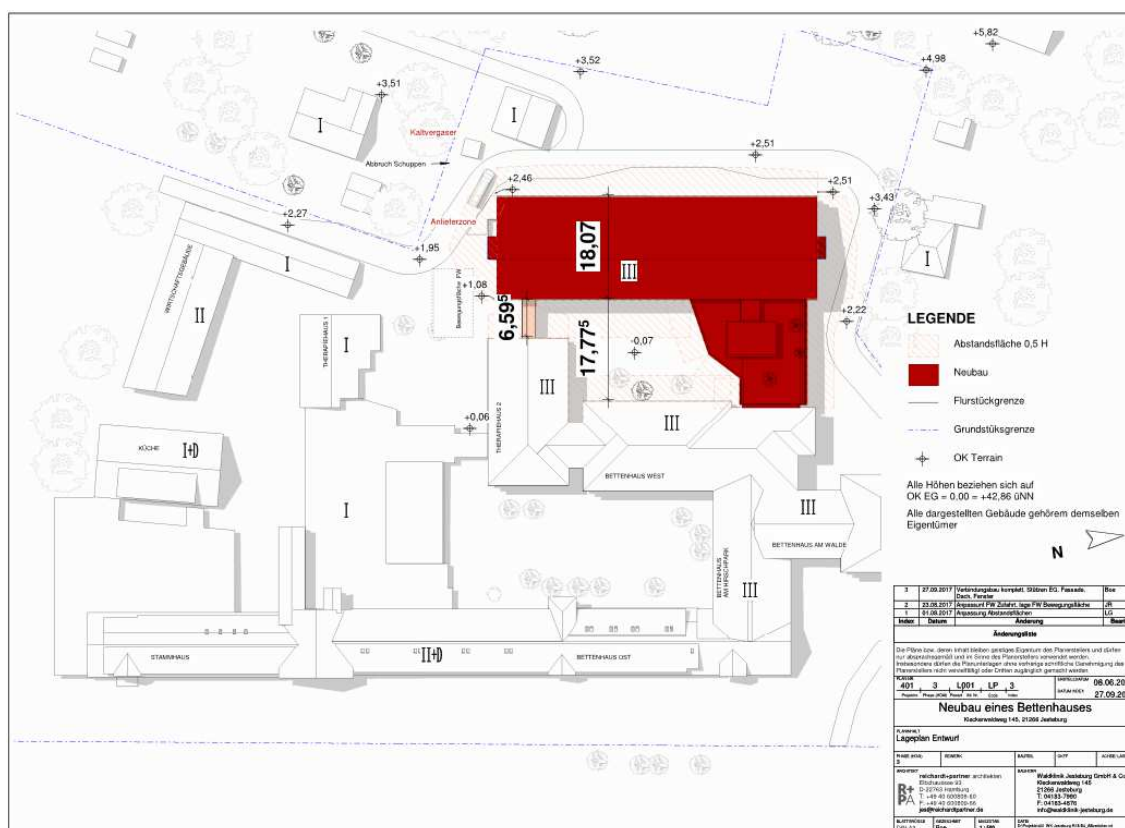


Abbildung 3.1: Lageplan Walklinik Jesteburg [32]

Die Unterbringung der Patienten ist auf vier Stationen aufgeteilt. Auf den Stationen A und B werden Menschen mit schweren neurologischen Schäden versorgt. Diese Stationen werden durch ihre Nutzung dem Bereich Krankenhaus zugeordnet. Auf den Stationen C und D sind Patienten mit Therapiebedarf nach leichten Ausfällen oder fortgeschrittener Heilung untergebracht. Dieser Bereich wird der Rehabilitation zugeordnet.

Der Neubau erweitert etagenweise die vorhandenen Stationen aus dem Bestand. Geplant ist ein viergeschossiges Gebäude mit 4.465 m² Brutto-Grundfläche. Nach aktuellem

Planstand wird der Neubau Ein- und Zweibettzimmer zur Aufnahme von 63 Patienten enthalten.

Da die Personalumkleiden durch mehrere Anbauten im Bestand verteilt sind, werden im Erdgeschoss des Neubaus zentrale Umkleideräume entstehen, welche die bestehenden Räume für das Pflegepersonal ersetzen. Ferner werden neue Serverräume eingerichtet, welche die bisherigen Serverräume ersetzt. Hierfür wird in jeder Etage ein Serverraum entstehen. Die Technikräume mit den notwendigen Hausanschlüssen und Anlagen zur Versorgung des Gebäudes befinden sich im Erdgeschoss.

Lediglich die RLT-Anlagen werden im Dachgeschoss aufgestellt, um den verfügbaren Platz optimal zu nutzen. In der übrigen Fläche im Erdgeschoss werden Material- und Therapieräume, sowie drei Bettzimmer entstehen. In den oberen drei Etagen sind überwiegend die Bettzimmer zu finden. Es entstehen zudem stationsspezifische Arzt-, Therapie-, und Aufenthaltsräume für das Personal und die Patienten und ihre Gäste.

Die Planungsgruppe M+M AG ist zunächst mit den Leistungsphasen 1-3 nach Honorarordnung für Architekten und Ingenieure für die Kostengruppen 400-480 beauftragt. Die Planung des Bettenhauses beinhaltet folglich die Beheizung, Kühlung, Belüftung und Beleuchtung des Gebäudes sowie die Versorgung mit Trinkwasser, die Medizintechnik, die Elektrotechnik, die Installation der Aufzüge und die Gebäudeautomatisierung.

Während der Vorplanung gilt es die Versorgungsanlagen zu dimensionieren und die Medienversorgung zu planen. Der Bestandsbau wird von der Heizungsanlage in einem Heizhaus mit Wärmeenergie versorgt. Nach Absprache mit dem Bauherrn, der Waldklinik Jesteburg Aldag GmbH, wird auch eine Analyse des bestehenden Heizsystems der Klinik erfolgen. Darauf aufbauend wird untersucht, ob eine Modernisierung der bestehenden Heizungsanlage im Zuge der Baumaßnahme Sinn ergibt. Für die Untersuchung werden verschiedene Varianten zur Bereitstellung der Wärmeenergie, gesondert für den Neubau und als Modernisierung und Erweiterung der Heizungsanlage, erstellt. Als Grundlage für die Variantenerstellung und deren Vergleich wird in Kapitel 3.2 der Nutzenergiebedarf für die Wärmeversorgung des Neubaus und des Bestandsbaus ermittelt. Die Varianten werden in Kapitel 3.3 beschrieben. In Kapitel 4 werden die Varianten unter wirtschaftlichen und ökologischen Aspekten miteinander verglichen. Sowohl der Bauherr als auch das Niedersächsische Landesamt für Bau und Liegenschaften (NLBL) haben ein Interesse an einer ökologischen und ökonomischen Anlage.

Da ein Großteil des Neubaus dem Bereich Krankenhaus zugeordnet wird, unterstützt das Bundesland Niedersachsen den Bauherrn anteilig mit finanziellen Mitteln. Dabei ist es die Aufgabe des NLBL die Planung zu begleiten und Verbesserungen durch fachliche Kritik anzuregen. Letztlich prüft und bewertet das NLBL die Planung bezüglich der fachgerechten Nutzung, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit. Auf Grundlage der Bewertung werden Gelder von der zuständigen Landesverwaltung bewilligt. Im Rahmen

zweier Vorgespräche beim NLBL in Hannover wurde die Nachhaltigkeit der Heizungsanlage betont und ebenfalls der Einbezug des Bestandsbaus befürwortet. Bei der Beurteilung der Varianten sind einerseits die Nachhaltigkeit und andererseits die Interessen des Bauherrn einzubeziehen. Um die anteiligen Investitionskosten für die Waldklinik Jesteburg Aldag GmbH zu begrenzen sind die Kosten für die Baumaßnahme in einem angemessenen Rahmen zu halten.

3.2 Bedarfsermittlung

Bezüglich der Versorgung des Neubaus mit Wärmeenergie werden zwei grundsätzliche Maßnahmen diskutiert. Zum einen besteht die Möglichkeit die bestehende Heizungsanlage um einen oder mehrere weitere Wärmeerzeuger zu erweitern, die den Neubau versorgen. Zum anderen kann die bestehende Anlage um Wärmeerzeuger erweitert werden, sodass die gesamte Anlage den Bestandsbau und den Neubau gleichermaßen mit Wärmeenergie versorgt. Als Grundlage für die Dimensionierung der Wärmeerzeuger und den Vergleich der Varianten wird nachfolgend der Nutzenergiebedarf für die Wärmeversorgung des Neubaus und des Bestandsbaus ermittelt.

3.2.1 Bestandsbau

Die Fläche des Bestandsbaus beträgt 16.300 m². Nach Planungsunterlagen zum letzten Anbau beträgt die Heizlast derzeit 960 kW. Die Heizlast wird durch einen Gas-Brennwertkessel mit 478 kW Nennleistung und einen 500 kW Öl-Niedertemperaturkessel gedeckt. Die Heizkessel sind in der Heizzentrale im Westen des Geländes aufgestellt. Bei ausreichender Solarstrahlung wird außerdem Wärmeenergie durch eine solarthermische Anlage bereitgestellt.

Der Gaskessel deckt derzeit den Großteil des jährlichen Wärmebedarfs. Nach Angaben der Klinikleitung ist der Ölkessel nur bei sehr geringen Außentemperaturen für wenige Stunden im Jahr in Betrieb.

Um den Jahreswärmebedarf zu ermitteln, wurde der Gasbezug beim Gasversorger angefragt. Nach dessen Auskunft hat die Klinik im Jahr 2016 1.925,6 MWh Gas bezogen. Bei einem Wirkungsgrad des Gaskessels von 95 % wurden 1.829,3 MWh Wärmeenergie durch den Gaskessel bereitgestellt.

Die Daten der Wärmeerzeugung der solarthermischen Anlage werden auf der Internetseite der Klinik veröffentlicht. Im Jahr 2017 hat die Anlage mit einer Aperturfläche von 242 m² 80 MWh zur Wärmebedarfsdeckung beigetragen.

Die Waldklinik ist nicht in der Lage belastbare Zahlen zum Heizölverbrauch anzugeben. Zur Abschätzung des Deckungsanteils des Ölkessels ist die Jahresdauerlinie (JDL) des Wärmeenergiebedarfs des Bestandsbaus erstellt worden.

Die JDL ist auf Basis der minimalen und maximalen Heizlast und einem Faktor für Altgebäude ermittelt worden. Die minimale Heizleistung, ist jene Leistung, welche für die Warmwasserbereitung benötigt wird, während das Gebäude nicht beheizt werden muss. Für die minimal benötigte Heizleistung wurde angenommen, dass etwa 30 % des jährlichen Wärmebedarfs für die WWB benötigt werden. Nach einem iterativen Vorgehen bei der Erstellung der JDL wird die jährlich benötigte Wärmeenergie $Q_{ges.}$ mit 1.950 MWh abgeschätzt. Unter der Annahme, dass der Energiebedarf zur WWB sich gleichmäßig auf die 8.760 Stunden im Jahr verteilt, ergibt die Gleichung 3.1 66,8 kW für die Heizleistung für die Warmwasserbereitung \dot{Q}_{WWB} .

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} \equiv \dot{Q}_{WWB} = \frac{Q_{WWB}}{8760} = \frac{0,3 Q_{ges.}}{8760} = 66,8 \text{ kW} \quad (3.1)$$

In Abbildung 3.2 ist die Jahresdauerlinie mit den Vollastlinien der beiden Bestandskessel dargestellt. Auf der Abszisse ist die Zeit in Stunden aufgetragen. Die Ordinate bildet die benötigte Heizleistung ab. Die JDL wird aus der Zuordnung der Heizleistung zu der Anzahl der Stunden ermittelt, die die jeweilige Heizleistung benötigt wird.

Aus der Simulation der JDL ergeben sich 3997 Vollaststunden des Gaskessels. Mittels Umformung der Gleichung 3.1 lässt sich eine Wärmebereitstellung von etwa 1.910 MWh/a ermitteln. Weil die solarthermische Anlage in der Jahresdauerlinie nicht berücksichtigt wird, sind die 80 MWh/a Wärmebereitstellung abzuziehen. Der Gaskessel deckt somit einen Wärmebedarf von 1.830 MWh/a. Weil der Wert nur gering vom realen Wert abweicht, wird davon ausgegangen, dass die JDL die Realität sehr gut wiedergibt. Aus den 79 Vollaststunden pro Jahr wird eine jährliche Wärmebereitstellung durch den Ölkessel von aufgerundet 40 MWh ermittelt. Der Wärmeenergiebedarf des Bestandsbaus summiert sich auf 1.950 MWh/a.

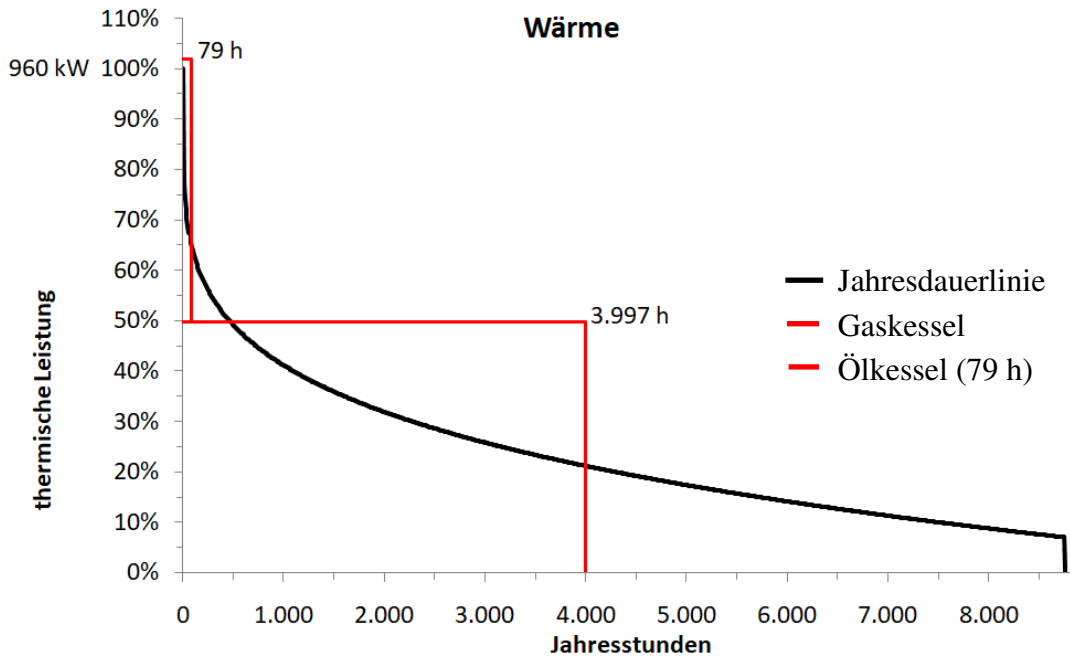


Abbildung 3.2: Jahresdauerlinie des Bestandsbaus (in Anlehnung an [13])

Im südwestlichen Teil des Geländes befinden sich die Trafostation mit einer Leistung von 400 kVA für die Versorgung der Klinik mit Spannung, sowie ein Notstromgenerator mit 150 kVA, der bei Stromausfall die Sicherheitsstromversorgung bereitstellt.

Der Strombezug der Liegenschaft ist beim Netzbetreiber angefragt worden. Im Jahr 2016 hat das Klinikum nach den Angaben des Versorgers 880 MWh elektrische Energie bezogen. Maximal wurde eine Leistung von 215 kW benötigt. Der Trafo hat demnach noch eine freie Kapazität von 185 kVA, die zur Stromversorgung des Neubaus genutzt wird. Die Notwendigkeit einer Erweiterung des Notstromgenerators wird in der weiteren Planung untersucht.

3.2.2 Neubau

Die maximale Wärmeleistung zur Abdeckung der Heizlast des Neubaus im Auslegungsfall wird mit der spezifischen Heizlast von 40 W/m^2 abgeschätzt. Dieser Wert ist ein Erfahrungswert der Planungsgruppe M+M AG aus den Projekten der letzten Jahre. Nach der Gleichung 3.2 lässt sich die maximal benötigte Wärmeleistung \dot{Q}_H aus dem Produkt aus spezifischer Wärmeleistung \dot{q}_H und Bruttogrundfläche A_{BGF} errechnen. Für den Neubau wird eine maximale Wärmeleistung von aufgerundet 180 kW benötigt.

$$\dot{Q}_H = \dot{q}_H A_{BGF} = 40 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} 4465 \text{ m}^2 = 178,6 \text{ kW} \quad (3.2)$$

Zur Auslegung und wirtschaftlichen Betrachtung von Energieerzeugungssystemen, wird der Nutzenergiebedarf des Neubaus ermittelt. Anhand der Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebe-

stand wird der Nutzenergiebedarf abgeschätzt. In Tabelle 3.1 sind die zur Berechnung herangezogenen Werte abgebildet.

Tabelle 3.1: Nutzenergiebedarfswerte verschiedener Gebäude (in Anlehnung an [8])

Gebäudekategorie	Flächenanteil [m ²]	Wärmebedarf [kWh/m ² *a]	Strombedarf [kWh/m ² *a]
Krankenhaus/Bettenhaus	1200	250	125
Gebäude des Gesundheitswesens	3015	135	50
Umkleidegebäude	250	135	30

Durch die hohen spezifischen Bedarfswerte würde eine Einordnung des Neubaus im gesamten als Bettenhaus zu einer Überdimensionierung des Wärmebedarfs und der Heizungsanlage führen. Aus diesem Grund wird der Neubau in drei Nutzungsbereiche unterteilt. Der gesamte Wärmeenergiebedarf $Q_{H,ges.}$ wird nach Gleichung 3.3 aus der Summe der jeweiligen Produkte der spezifischen Energiebedarfswerte q_{KH} , $q_{Ges.}$, $q_{Umk.}$ und den dazugehörigen Flächenanteilen A_{KH} , $A_{Ges.}$, $A_{Umk.}$ der Nutzungen errechnet. Analog dazu wird der elektrische Energiebedarf $W_{el,ges.}$ nach Gleichung 3.4 mithilfe der spezifischen elektrischen Energiebedarfswerten w_{KH} , $w_{Ges.}$, $w_{Umk.}$ ermittelt. Die Bettzimmer werden der Kategorie Krankenhaus zugeordnet, während die Umkleiden im Erdgeschoss und die Sanitärbereiche als Umkleidegebäude und die Therapie-, Arzt- und Technikräume als Gebäude des Gesundheitswesens eingeordnet werden. Für den Gesamtwärmeenergiebedarf wird ein Wert von 740,8 MWh/a ermittelt. Der Strombedarf beläuft sich auf 308,3 MWh/a

$$Q_{H,ges.} = A_{KH} * q_{KH} + A_{Ges.} * q_{Ges.} + A_{Umk.} * q_{Umk.} = 740,8 \frac{MWh}{a} \quad (3.3)$$

$$W_{el,ges.} = A_{KH} * w_{KH} + A_{Ges.} * w_{Ges.} + A_{Umk.} * w_{Umk.} = 308,3 \frac{MWh}{a} \quad (3.4)$$

Bezogen auf die Fläche des Neubaus beträgt der spezifische Wärmebedarf 166 kWh/m²*a. Im Vergleich dazu liegt der Wert des jährlichen spezifischen Wärmebedarfs für den Bestandsbau bei 119,6 kWh/m²*a. Weil der Neubau durch eine bessere Wärmeisolierung jedoch geringere Wärmeverluste aufweisen wird, ist davon auszugehen, dass der Wärmeenergiebedarf für den Neubau im Vergleich zum Bestandsbau geringer sein muss. Da keine weiteren Richtwerte zur Verfügung stehen wird der Energiebedarf des Neubaus mithilfe des spezifischen Energiebedarfs des Bestandsbaus errechnet. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass die unterschiedlichen Heizungssysteme später besser zu vergleichen sind. Für den Neubau wird ein jährlicher Wärmebedarf von 534 MWh errechnet.

Der errechnete spezifische Strombezug des Neubaus liegt 28 % über dem des Bestandsbaus. Zum besseren Vergleich wird der Bedarf an elektrischer Energie für den Neubau ebenfalls anhand des spezifischen Bedarfswerts des Bestandes errechnet. Für den Bedarf an elektrischer Energie wird ein Wert von 241,1 MWh/a ermittelt.

Für die Bewertung der verschiedenen Erzeugersysteme ist ebenso von Bedeutung, wie häufig verschiedene Wärmeleistungen benötigt werden. Daher ist für den Neubau ebenfalls die Jahresdauerlinie zu erstellen. Die Erstellung der Jahresdauerlinie erfordert die Kenntnis über die minimale Heizleistung. Die ermittelte Heizlast von 180 kW wird bei sehr geringen Außentemperaturen im Winter benötigt. Im Sommer hingegen gibt es Zeiten in denen keine Leistung zur Beheizung des Gebäudes erforderlich ist. Die dennoch benötigte Wärmeleistung entspricht der Leistung zur Warmwasserbereitung im Neubau.

Tabelle 3.2: Energiebedarf zur Warmwasserbereitung verschiedener Gebäude (in Anlehnung an [11])

Gebäudekategorie	Nutzungsabhängiger Nutzenergiebedarf für Warmwasser [kWh/p*d]	Personen
Krankenhaus/Bettenhaus	8	63
Umkleidegebäude	1,5	113,5

Die durchschnittliche Leistung zur Warmwasserbereitung wird über den jährlichen Nutzenergiebedarf für die WWB errechnet. Der Energiebedarf zur Brauchwassererwärmung im Neubau über ein Jahr wird mittels DIN EN 12831-3 abgeschätzt. Der Energiebedarf wird, ähnlich zur Abschätzung des Gesamtwärmeenergiebedarfs, aus den nutzungsbezogenen Bedarfswerten Q_{KH} und $Q_{Umk.}$ errechnet. In Tabelle 3.2 sind die Werte zur Berechnung abgebildet. Der Bedarf für die Versorgung und Pflege der Patienten wird auf die Bettenzahl n_B bezogen, während für die Waschmöglichkeiten angenommen wird, dass diese täglich von der Hälfte des Personals $n_{Pers.}$ genutzt werden.

Nach Gleichung 3.5 wird der Wärmeenergiebedarf für die Warmwasserbereitung $Q_{WWB,ges.}$ ermittelt, indem die Summe der Produkte aus Personenzahlen und Bedarfswerten mit 365 Tagen multipliziert wird. Der Wert des Energiebedarfs beträgt 246,1 MWh/a. Da der Bedarf an warmem Brauchwasser unabhängig von den Außentemperaturen jeden Tag in etwa der gleiche ist, wird die Leistung mittels Gleichung 3.6 als Quotient des jährlichen Energiebedarfs zur WWB zu 8760 Stunden abgeschätzt. Dabei wird außer Acht gelassen, dass die erforderliche Leistung über den Tag starken Schwankungen unterliegt, durch einen entsprechenden Pufferspeicher werden allerdings Bedarfs-

senken und Bedarfsspitzen ausgeglichen. Die durchschnittlich minimal erforderliche Leistung beträgt 28,1 kW

$$Q_{WWB,ges.} = (n_B qn_B + n_{Pers.} qn_{Pers.}) 365 = 246,1 \frac{MWh}{a} \quad (3.5)$$

$$\dot{Q}_{WWB} = \frac{Q_{WWB,ges.}}{Jahresstunden} = \frac{246,1 \frac{MWh}{a}}{8760 \frac{h}{a}} = 28,1 \text{ kW} \quad (3.6)$$

Durch die großen Umkleideräume ist ein hoher Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung und somit eine vergleichsweise hohe durchschnittliche Wärmeleistung zu erklären. Durch die bessere Wärmeisolierung von Neubauten ist der Anteil der WWB am Gesamtwärmebedarf außerdem größer als bei Altbauten.

Die ermittelten Werte werden als Grundlage für die Erstellung der Jahresdauerlinie herangezogen. In Abbildung 3.3 ist die Jahresdauerlinie dargestellt. Das Profil der JDL des Neubaus hat einen flacheren Verlauf als beim Bestandsbau, weil die Wärmeverluste durch die Gebäudehülle geringer sind.

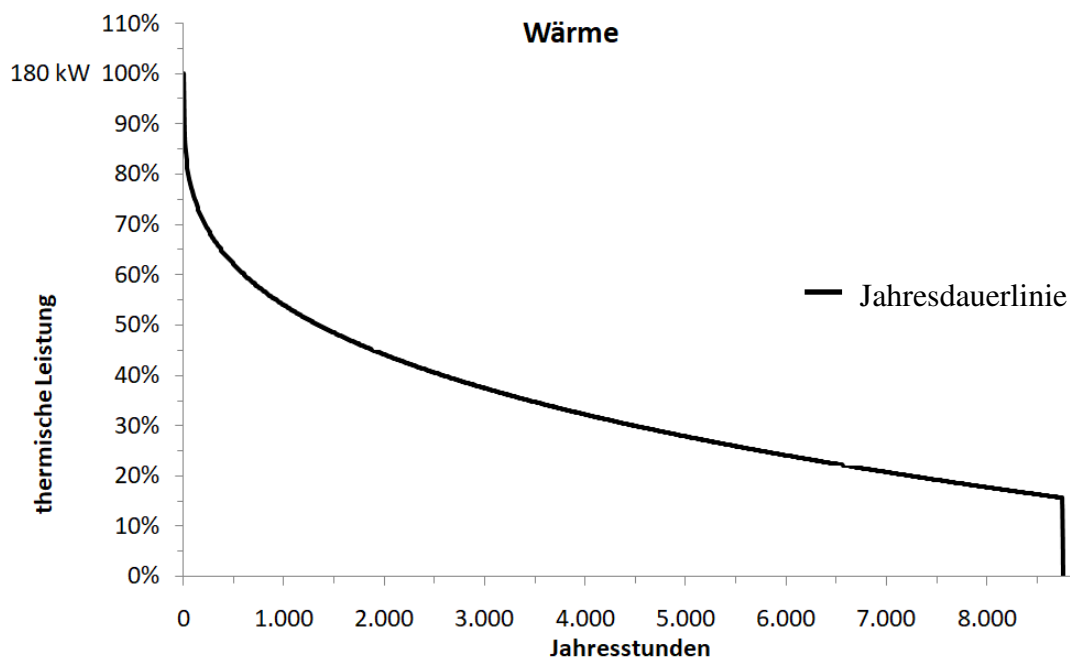


Abbildung 3.3: Jahresdauerlinie des Neubaus (in Anlehnung an [13])

Bei der Auslegung der Energieerzeuger spielt die Jahresdauerlinie eine große Rolle. Die Leistung und die Betriebsstunden der Anlagen, genauso wie die Zusammenstellung des Heizungssystems werden auf den Verlauf der Linie ausgerichtet.

Die jeweiligen Werte für das spätere Gesamtgebäude werden aus der Summe der Werte für den Neubau und den Bestandsbau ermittelt. Die wichtigsten Bedarfswerte des Neu-, Bestands- und Gesamtbaus sind in Tabelle 3.3 aufgelistet.

Die Gesamtheizlast wird aus der Heizlast für den Neubau und dem Wert für den Bestandsbau ermittelt und beträgt 1140 kW. Für die Summe der Wärmeleistung zur WWB werden nur zwei Drittel der Leistung des Neubaus zu der Leistung des Bestandsbaus addiert, weil ein Teil der Leistung durch die Umstrukturierung der Umkleideräume schon im derzeitigen Bestandsbau enthalten ist. Darauf aufbauend ist auch der jährliche Nutzenergiebedarf des Gesamtbaus geringer als die Summe der Werte für Bestandsbau und Neubau.

Anhand der Bedarfsanalyse und unter Berücksichtigung des Bestandssystems werden in Kapitel 3.3 Varianten zur Erweiterung des Heizsystems im Rahmen der Baumaßnahme entwickelt.

Tabelle 3.3: Übersicht über den Wärmebedarf

	Neubau	Bestandsbau	Gesamtbau
Bruttogrundfläche [m ²]	4.465	16.300	20.765
Jährlicher Nutzenergiebedarf [MWh/a]	534	1.950	2.400
Heizlast [kW]	180	960	1140
Leistung zur WWB [kW]	28,1	67,1	85,8

Zusätzlich zum Wärmebedarf besteht auch ein Bedarf für die Kühlung der Servereinheiten. Die Kühlleistung wird für den Gesamtbau auf etwa 12 kW geschätzt. Dabei werden 9 kW im derzeitigen Bestand benötigt. Dadurch, dass die Serverschränke ununterbrochen in Betrieb sind, ist die Kälte das ganze Jahr über erforderlich. Über das Jahr beträgt der Kälteenergiebedarf des Gesamtbaus 105,1 MWh.

3.3 Variantenauswahl

Nachfolgend werden verschiedene Varianten zur Energiebereitstellung beschrieben. Es werden sowohl Varianten zur separaten Versorgung des Neubaus als auch zur Modernisierung des Bestandsbaus mit Einbezug des Neubaus betrachtet. Dabei wird näher auf die Auslegung und den Betrieb der in Kapitel 2 beschriebenen Anlagen eingegangen.

Nachdem das Bestandssystem erneut kurz dargestellt wird, werden drei Varianten zur Energieversorgung des Neubaus beschrieben, die das Bestandssystem nicht verändern.

Bei der Zusammenstellung und der Dimensionierung der Heizungsanlage wird auf die Erfüllung des Erneuerbare Energien Wärme Gesetzes und die Wirtschaftlichkeit geachtet. Diesbezüglich bestehen die Varianten jeweils aus einer Anlage zur Deckung der Grundlast in Kombination mit einem Spitzenlastkessel. Die Wärmegrundlast bezeichnet den Bedarf an Wärmeleistung der zu jeder Zeit benötigt und nicht unterschritten wird.

Anschließend werden drei weitere Varianten vorgestellt, in denen das Bestandssystem einbezogen wird. Die bereitgestellte Wärme wird gleichermaßen im Neu- und Bestandsbau genutzt. Weiterhin wird auf die Gesetzgebung und die Wirtschaftlichkeit geachtet. Im Interesse des Auftraggebers sind die Investitionskosten, gering zu halten.

Um dem EEWärmeG gerecht zu werden, wird in den Varianten zur Modernisierung und Erweiterung eine Anlage zur Grundlastabdeckung mit regenerativer Technik vorgesehen. Dabei wird auch die bestehende solarthermische Anlage berücksichtigt. Aufgrund der Erfahrung, dass der Ölkessel selten in Betrieb ist, soll bei einer Modernisierung kein neuer Wärmeerzeuger installiert werden. Außerdem befinden sich noch eine große Menge Öl im Tank.

3.3.1 Variante 0

Variante 0 beschreibt das bestehende Heizungssystem, welches für die Beurteilung der erstellten Varianten als Referenzsystem herangezogen wird. Der Vergleich zu Variante 0 lässt die Einsparmöglichkeiten der neuen Varianten erkennen. Das Schema der Energieversorgung ist in Abbildung 3.4 abgebildet.

In der Abbildung sind der Bestandsbau und die Heizzentrale schematisch als Draufsicht dargestellt. Die wichtigsten Energieflüsse der Liegenschaft sind über Pfeile nachgebildet.

Das System zur Wärmebereitstellung besteht aus einem Gas-Brennwertkessel in Kombination mit einem Öl-Niedertemperaturkessel. Die Kessel sind in der Heizzentrale installiert. Aus der Heizzentrale wird der Bestandsbau über Nahwärmeleitungen mit Heizwasser zur Lastdeckung versorgt. Zur Vereinfachung ist im Bestandsbau nur eine Unterstation dargestellt. Die Unterstation im rechten Teil des Gebäudes dient der Darstellung der Nutzung der Solarwärme. Das Kollektorfeld aus Vakuum-Röhrenkollektoren ist auf mehrere Dächer aufgeteilt. Zunächst wird die Solarwärme im letzten Neubau für die Warmwasserbereitung und die Beheizung genutzt. Bei erhöhtem Wärmeertrag im Sommer wird die Wärme über die Heizungszentrale in der gesamten Liegenschaft genutzt.

Wie oben aufgeführt hat der Gaskessel eine Nennleistung von 478 kW und die Nennleistung des Ölkessels beträgt 500 kW. Der Gaskessel deckt zusammen mit der solar-

thermischen Anlage die Grundlast des Bestandsbaus. Der Ölkessel wird lediglich hinzu geschaltet, wenn die benötigte Wärmeleistung, z.B. bei geringen Außentemperaturen, die Leistung der beiden Anlagen übersteigt. Von dem Wärmeenergiebedarf von 1.950 MWh/a deckt der Gaskessel 93,8 %. Die solarthermische Anlage deckt weitere 4,1 % und der Ölkessel deckt die restlichen 2,1 % des Jahreswärmebedarfs. Die elektrische Energie wird aus dem öffentlichen Netz bezogen.

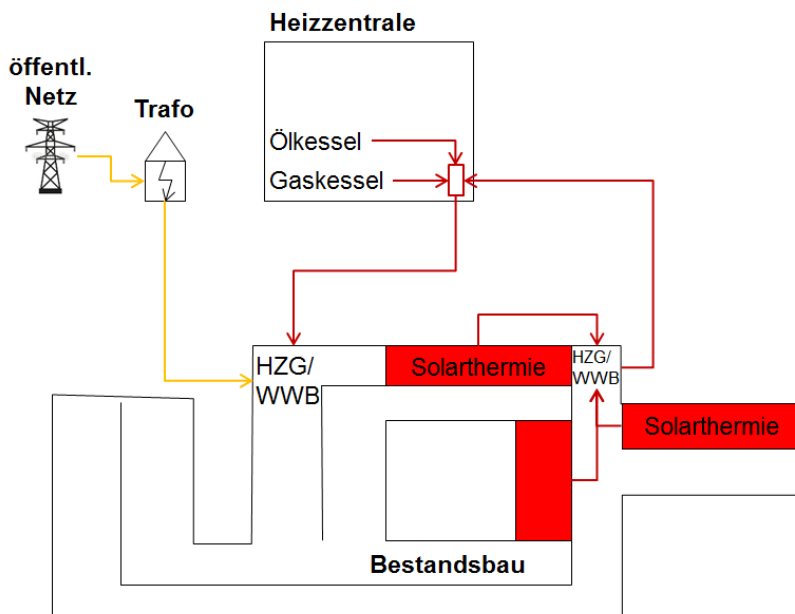


Abbildung 3.4: Schema der Variante 0

3.3.2 Variante 1

Die ersten drei Varianten beschreiben Erzeugersysteme zur Deckung des Energiebedarfs des Neubaus. Das bestehende Heizungssystem bleibt in diesen Varianten unverändert.

Das Schema der Variante 1 ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Zur Vereinfachung ist der Neubau in der Abbildung getrennt vom Bestand dargestellt.

Zur Wärmelastdeckung wird eine Geothermie-Anlage in Kombination mit einem Gaskessel verwendet. Die Anlagen werden in der Heizzentrale aufgestellt. Zusätzlich werden auf der Dachfläche Photovoltaik (PV)-Kollektoren installiert, die elektrische Energie generieren. Zusätzlich benötigter Strom wird aus dem öffentlichen Netz bezogen. Über eine Grundleitung wird das Heizwasser zum Neubau befördert. Dort wird es auf die Heizkreise und die dezentrale WWB aufgeteilt.

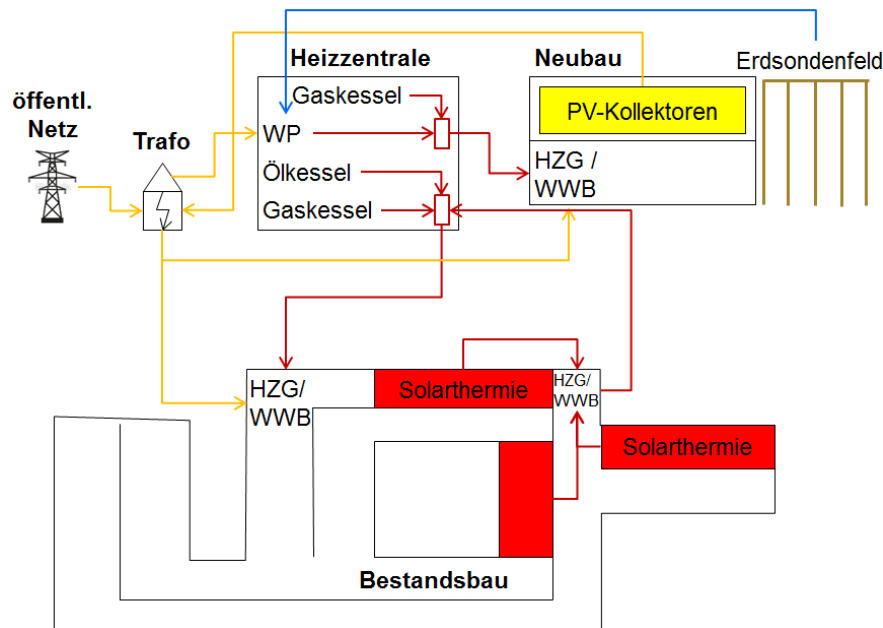


Abbildung 3.5: Schema der Variante 1

Der Aufbau und die Funktionsweise einer Geothermie-Anlage werden in Kapitel 2.2 erläutert. Damit die Anschaffung und der Betrieb der Wärmepumpe wirtschaftlich sind, wird die Wärmepumpe auf möglichst viele Betriebsstunden ausgelegt. Bei modernen Inverter-WP kann die Kompressordrehzahl gedrosselt werden, wodurch ein wirtschaftlicher Teillastbetrieb möglich ist. Ein durchgehender Betrieb mit wenig Start- und Stoppvorgängen ist außerdem schonend für die Bestandteile der Anlage. Um viele Betriebsstunden zu erreichen wird die Geothermie-Anlage daher meist als Anlage zur Grundlastabdeckung betrieben.

Eine Wärmepumpe, die erneuerbare Energien als Wärmequelle nutzt kann die Bestimmungen des EEWärmeG erfüllen. Ist die Wärmepumpe im Heizungssystem die einzige Anlage mit regenerativer Technik sind mindestens 50 % des jährlichen Heiz- und Kälteenergiebedarfes mit der Wärmepumpe zu decken. Die Wärmepumpe wird anhand des wirtschaftlichen Betriebs und der Gesetzesvorgabe dimensioniert.

Die Wärmegrundlast des Neubaus beträgt 28,1 kW. Würde die Wärmepumpe das ganze Jahr in Betrieb sein, erreichte sie 8760 Betriebsstunden. Unter diesen Arbeitsbedingungen würde jährlich eine Wärmeenergie von 246,1 MWh bereitgestellt werden. Zur Erfüllung des EEWärmeG sind bei einem Nutzenergiebedarf zur Deckung der Heiz- und Kühllasten von 560 MWh/a jedoch 280 MWh/a bereitgestellte Wärmeenergie nötig.

Die Wärmepumpe muss folglich auf die Erfüllung des EEWärmeG dimensioniert werden. Mit einem Deckungsgrad des Wärmeenergiebedarfs von 55 % werden die Vorgaben des Gesetzes erfüllt. Die Wärmeenergie die durch die Wärmepumpe bereitgestellt wird beträgt in dem Fall ca. 295 MWh/a.

In Abbildung 3.6 ist die Jahresdauerlinie des Neubaus mit den Vollaststunden der Energieerzeuger der Variante 1 dargestellt. Für die Wärmepumpe wurde angenommen, dass sie etwa 7500 Betriebsstunden im Jahr erreicht. Bei einer jährlich zu erzielenden Menge an Wärmeenergie von 295 MWh ist eine Leistung von aufgerundet 40 kW erforderlich. Nach der Jahresdauerlinie erreicht die WP bei dieser Nennleistung über 8400 Betriebsstunden. Im weiteren Verlauf wird jedoch mit 7500 Betriebsstunden kalkuliert, weil die reale Jahresdauerlinie erfahrungsgemäß flacher verläuft und z.B. nachts weniger Wärmebedarf besteht, wodurch die Vollaststunden sinken. Außerdem werden Wartungszeiten berücksichtigt. Das EEWärmeG wird durch den Betrieb einer Wärmepumpe mit einer Wärmeleistung von 40 kW bei 7500 Vollaststunden erfüllt.

Anhand der Abbildung ist zu erkennen, dass die Wärme der Wärmepumpe jedoch nicht immer direkt abgenommen wird. Einen Teil der Zeit wird die WP in Teillast betrieben oder die Wärme wird durch häufige Lastwechsel bereitgestellt. Die Wärmepumpe ist in Betrieb bis die maximale Systemtemperatur erreicht ist, wenn im Gebäude nicht genug Wärmeenergie abgenommen wird. Zu diesem Zeitpunkt wird die Anlage abgeschaltet bis die Temperatur im System wieder sinkt. Durch die Start-Stopp-Vorgänge wird der Grundbedarf bei geringer Heizlast gedeckt. Durch die Wahl eines Pufferspeichers in geeigneter Größe wird die Laufzeit erhöht und die Schaltvorgänge werden reduziert. Außerdem wird die Häufigkeit des kurzfristigen Betriebs einer zusätzlichen Anlage bei Lastspitzen verringert.

Übersteigt der Heizbedarf 40 kW über einen längeren Zeitraum wird die Heizlast durch einen Gas-Brennwertkessel gedeckt. In Zusammenhang mit einem Grundlasterzeuger ist der Einsatz eines Heizkessels zur Spitzenlastabdeckung die Regel. Zur Deckung der zusätzlichen Heizlast wird der Gaskessel überwiegend in Teillast betrieben. Der Gaskessel wird auf die vollständige Heizlast von 180 kW ausgelegt, damit die gesamte Wärmeerzeugung bei Stillstand der Wärmepumpe übernommen werden kann. Der Gaskessel stellt jährlich 241,6 MWh Wärmeenergie bereit.

Für die Installation der PV-Anlage steht die gesamte, nach Westen ausgerichtete Dachfläche von etwa 704 m² zur Verfügung. Es wird davon ausgegangen, dass sich die nutzbare Fläche durch einen Randabstand und Lüftungselemente auf ca. 600 m² verringert. Eine PV-Anlage aus polykristalinem Silizium erreicht eine elektrische Leistung von 0,135 kWp/m². Bei einem spezifischen Ertrag von 950 kWh/kWp wird ein jährlicher Stromertrag von 64.000 kWh errechnet. [29] [43]

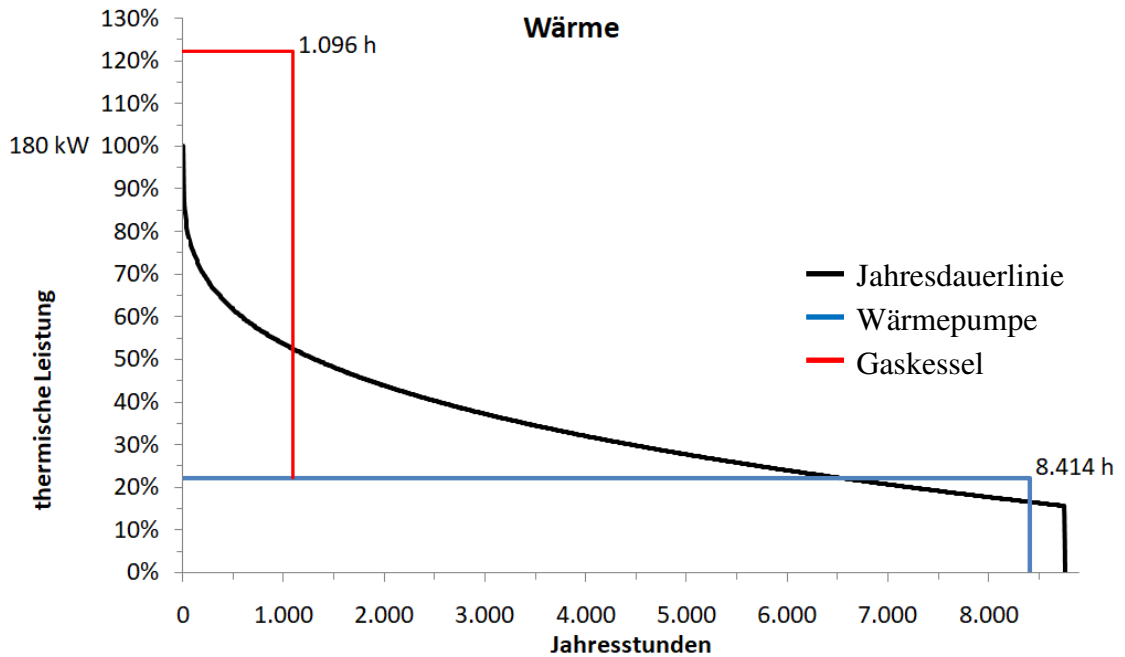


Abbildung 3.6: Jahresdauerlinie der Variante 1 (in Anlehnung an [13])

3.3.3 Variante 2

Variante 2 unterscheidet sich zur ersten Variante darin, dass statt der Wärmepumpe ein BHKW eingesetzt wird. Das Schema der Energiebereitstellung von Variante 2 ist in Abbildung 3.7 ersichtlich. Als zweiter Wärmeerzeuger wird erneut ein Gaskessel eingesetzt. In dieser Variante wird elektrische Energie vom BHKW bereitgestellt, die im eigenen Netz genutzt wird. Zusätzlicher Strombedarf wird vom öffentlichen Netz gedeckt.

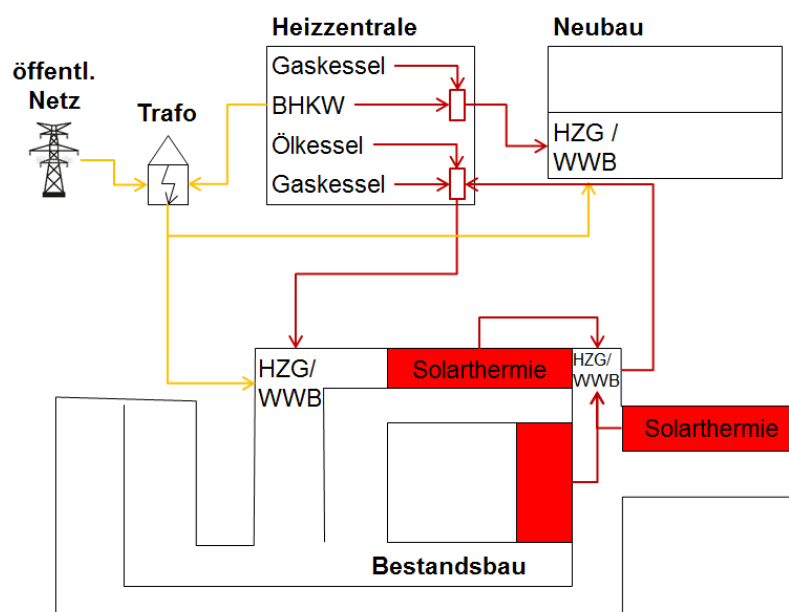


Abbildung 3.7: Schema der Variante 2

Der Hauptbestandteil eines BHKW, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, ist der Motor. Der Motor ist auf einen Betriebspunkt ausgelegt in dem der Gesamtwirkungsgrad am höchsten ist. Bis etwa 60 % der Nennleistung bleibt der Wirkungsgrad des BHKW meistens weitestgehend konstant. Wird die Leistung weiter gedrosselt, sinkt der Wirkungsgrad jedoch stark ab und die Schadstoffbelastung im Abgas nimmt stark zu. Außerdem sollte häufiges Ein- und Ausschalten vermieden werden, weil die Anzahl der Schaltvorgänge den Verschleiß der mechanischen Teile erhöhen. Das BHKW wird deshalb auf hohe Betriebszeiten ausgelegt. Ebenso wie die Wärmepumpe dient es als Anlage zur Grundlastabdeckung. Zur Erfüllung des EEWärmeG wird ein BHKW als Ersatzmaßnahme akzeptiert, wenn 50 % des Heiz- und Kälteenergiebedarfs gedeckt werden.

Die Dimensionierung der Wärmepumpe hat ergeben, dass eine Anlage mit einer Leistung von 40 kW und 7500 Betriebsstunden die Bedingungen des EEWärmeG erfüllt. Analog zur Wärmepumpe wird für das BHKW deshalb eine thermische Leistung 40 kW angesetzt. Die Jahresdauerlinie des Heizungssystems ist dadurch identisch zur Variante 1. Für das BHKW ergeben sich ähnliche Voraussetzungen für den Betrieb der Anlage. Wie die Wärmepumpe wird auch das BHKW bei geringer Heizlast zunächst in Teillast betrieben bevor es abgeschaltet wird. Beim BHKW sind jedoch die Wartungszeiten eine höher als bei der WP. Zusätzlich werden Bedarfsspitzen und Bedarfssenken durch einen Pufferspeicher ausgeglichen.

In Abbildung 3.8 sind beispielhaft Tagesgänge der Wärmelast einer Wohnsiedlung dargestellt. Das Diagramm lässt erkennen, dass morgens und abends Lastspitzen auftreten und besonders in der Nacht kaum Wärmebedarf besteht. Durch eine ähnliche Regelung der Heizung und die Nutzung der sanitären Einrichtungen werden die Lastprofile des Bettenhauses ähnlich verlaufen. Während des geringen Heizbedarfes in der Nacht kann der Pufferspeicher z.B. aufgeladen werden und bei erhöhtem Bedarf am morgen entladen werden. Dadurch wird erreicht, dass Wärmeerzeuger in der Nacht seltener abgeschaltet oder am Tag zugeschaltet werden.

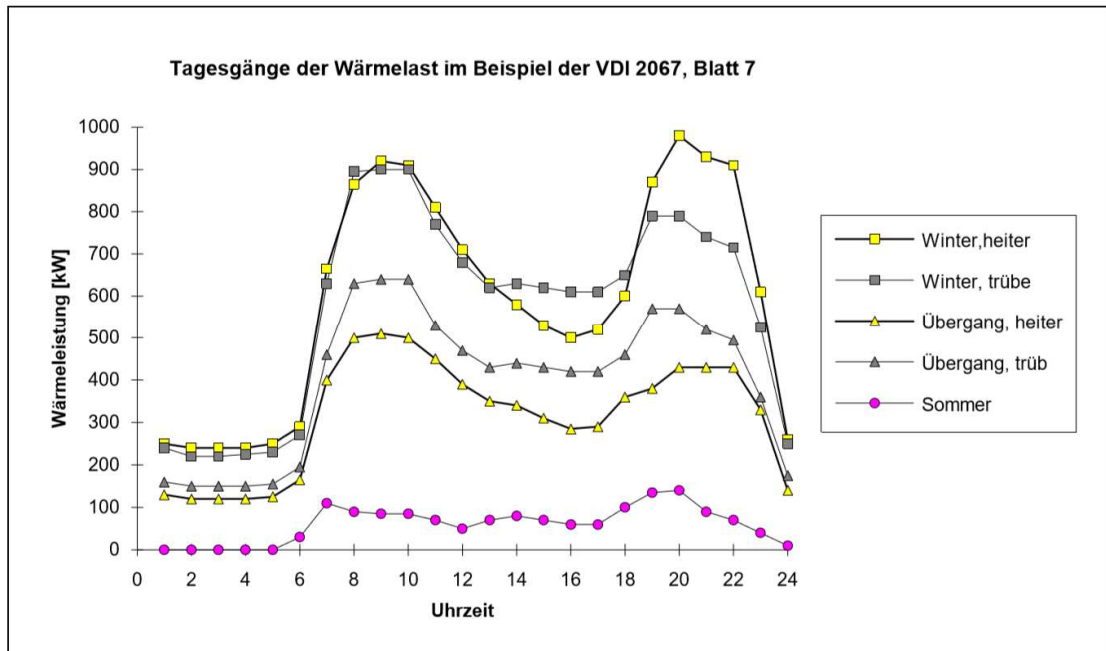


Abbildung 3.8: Tagesgänge der Wärmelast einer Wohnsiedlung [3]

Bei erhöhtem Wärmebedarf wird die zusätzliche Wärmeleistung ebenfalls durch einen Gaskessel bereitgestellt. Der Gaskessel ist in seiner Leistung mit 180 kW redundant ausgeführt um die Wärmelast bei Wartung oder eventuellem Ausfall des BHKW decken zu können.

Die elektrische Energie, die während des Betriebs generiert wird, wird zunächst in der Liegenschaft genutzt. Ob zeitweilig Überschüsse generiert werden, die ins öffentliche Netz eingespeist werden, wird im weiteren Planungsverlauf geklärt. Derzeit wird damit kalkuliert, dass die elektrische Energie komplett selbst genutzt wird. [40]

3.3.4 Variante 3

In Variante 3 wird eine solarthermische Anlage als regeneratives System erschlossen. Das Schema ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Das Warmwasser aus der solarthermischen Anlage wird direkt in den Neubau gefördert und dort zur Heizungsunterstützung genutzt. Die solarthermische Anlage wird durch einen Gaskessel aus dem Heizhaus unterstützt. Die benötigte elektrische Energie wird komplett aus dem öffentlichen Netz bezogen.

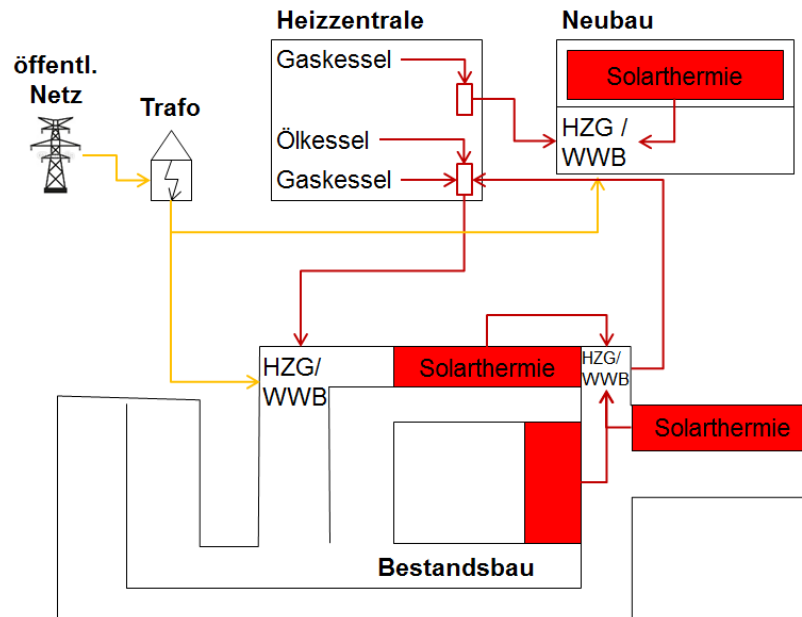


Abbildung 3.9: Schema Variante 3

Wie in Kapitel 2.4 ausgeführt, wird bei solarthermischen Anlagen in der Praxis zwischen zwei Kollektoren unterschieden. Für den Neubau des Bettenhauses soll die solarthermische Anlage zur Heizungsunterstützung verwendet werden. Aufgrund der hohen Vorlauftemperatur, welche für die geplanten Heizkörper benötigt wird, liegt auch die Kollektortemperatur in einem hohen Bereich. Da der Wirkungsgrad von Vakuumröhrenkollektoren bei hohen Kollektortemperaturen höher ist und sich damit besser zur Heizungsunterstützung eignet, wird die Verwendung dieses Kollektortyps bevorzugt.

Um möglichst viel Betriebskosten einzusparen, ohne dass die Anlage überdimensioniert wird, wird die Größe der Solaranlage an den geringsten Wärmebedarf angepasst. Bei solarthermischen Anlagen ist dies über die Jahresdauerlinie nicht praktikabel, weil der Wärmeertrag durch Tag-/Nachtwechsel und die Jahreszeiten unterschiedlich ist und stark schwankt. Stattdessen wird der monatliche solare Ertrag auf den minimalen monatlichen Wärmebedarf dimensioniert.

Der Vergleich zwischen dem monatlichen Wärmebedarf und dem monatlichen Wärmeertrag durch Solarthermie ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Die Linie des solaren Ertrags ergibt einen jährlichen Ertrag von 115,5 MWh. Aus der Abschätzung der Kollektorfläche als Quotient aus dem jährlichen Ertrag und dem flächenspezifischen Ertrag nach Gleichung 3.7 wird eine Bruttokollektorfläche $A_{K,B}$ von 530 m² ermittelt. Der spezifische Ertrag von 218 kWh/a*m² ist aus den Daten der Bestandsanlage ermittelt worden. Die verfügbare Dachfläche von etwa 704 m² ist für die Installation der Kollektoren ausreichend.

$$A_{K,B} = \frac{115,5 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}}{218 \frac{\text{kWh}}{\text{a} \cdot \text{m}^2}} = 530 \text{ m}^2 \quad (3.7)$$

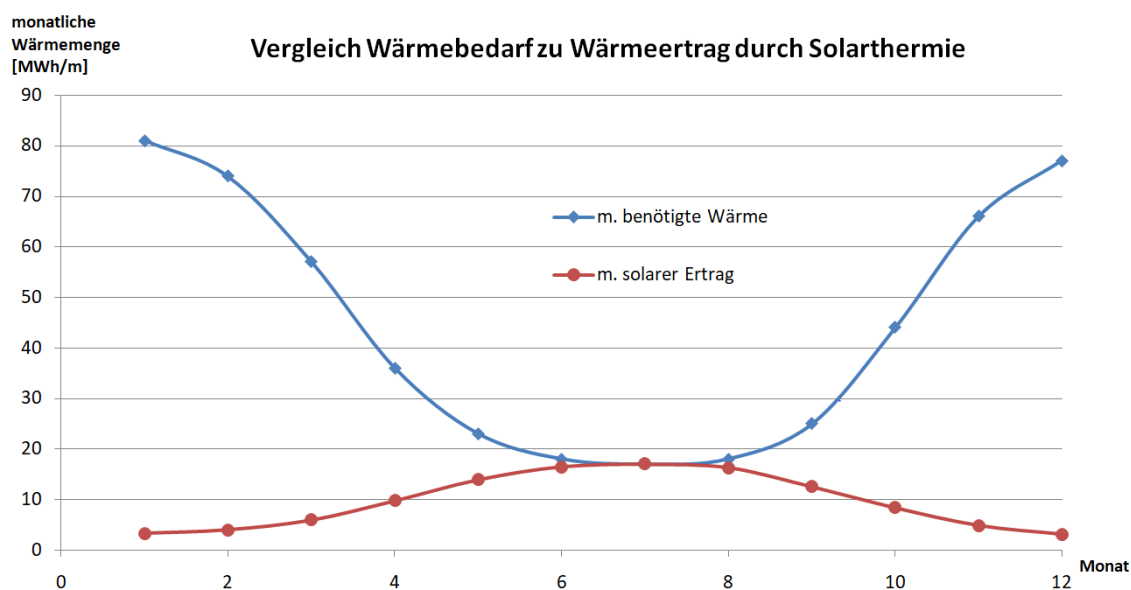


Abbildung 3.10: Vergleich Wärmebedarf und Wärmeertrag durch Solarthermie (in Anlehnung an [19])

Mit dem solaren Ertrag von 115,5 MWh/a werden 21,8 % des Wärmebedarfes gedeckt. Durch diese Dimensionierung werden die Vorschriften des EEWärmeG zu 138 % erfüllt. Bei der Wärmebereitstellung durch eine solarthermische Anlage fordert das Gesetz eine Deckung des Heiz- und Kühlbedarfs von 15 %.

Mit einer spezifischen Leistung von 0,49 kW/m² bezogen auf die Aperturfläche bei geplanter Ausrichtung erzielt die Anlage bei optimalen Bedingungen eine Leistung von 171 kW. Die Leistung ist damit im Sommer um ein Vielfaches höher als der Bedarf. Gerade wenn die maximale Leistung zur Verfügung steht, wird nur wenig Wärmeleistung benötigt. Um die Wärmeenergie zu einem späteren Zeitpunkt zu nutzen sind große Speicher erforderlich.

Die Speicher werden darauf dimensioniert den Mehrertrag aus dieser Zeit aufzunehmen und über einige Tage zu speichern, bis der Ertrag sinkt. In ertragsarmer Zeit wird der Speicher entladen. Der Pufferspeicher gleicht außerdem Schwankungen durch den Tag-Nachtwechsel aus. Aus dem Vergleich zur bestehenden solarthermischen Anlage ergibt sich ein Speichervolumen von ca. 22 m³.

Ist der Ertrag aus der solarthermischen Anlage zu gering, deckt ein Gaskessel mit einer Leistung von 180 kW den Wärmebedarf. [39] [41]

3.3.5 Variante 4

Variante 4 ist die erste Variante zur Modernisierung des Heizsystems. In Abbildung 3.11 ist das Schema der Energieversorgung abgebildet. Das Heizwasser wird gleicher-

maßen auf den Neubau und den Bestandsbau verteilt. Die Variante beinhaltet ebenso wie Variante 1 eine Geothermie-Anlage mit Sole-/Wasser-WP. Die Sole-/Wasser-Wärmepumpe wird darauf dimensioniert die Grundlast des gesamten Klinikums zu decken. Des Weiteren bleiben die Heizkessel aus dem Bestand in Betrieb. Der Gaskessel wird zur Mittellast- und der Ölkessel zur Spitzenlastdeckung eingesetzt. Auf dem Dach des Neubaus wird eine PV-Anlage installiert. Darüber hinaus benötigte elektrische Energie wird aus dem öffentlichen Netz bezogen.

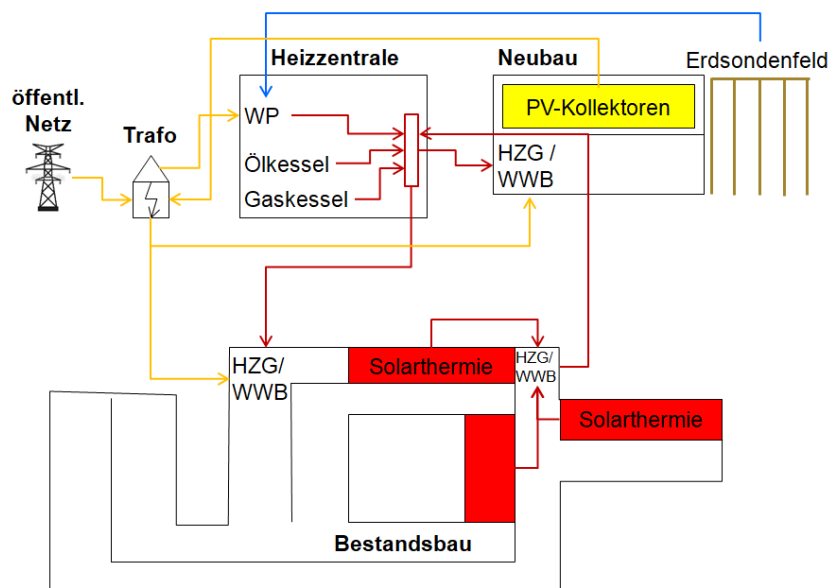


Abbildung 3.11: Schema Variante 4

Wie in Variante 1, ist in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit und Langlebigkeit darauf zu achten, dass die Wärmepumpe hohe Betriebszeiten erreicht. Da im Sommer bereits Wärme von der solarthermischen Anlage bereitgestellt wird, ist in dieser Zeit nicht sichergestellt, dass während einer langen Zeit ein großer Bedarf an weiterer Wärmeenergie vorliegt. Die Wärmepumpe wird daher auf die Erfüllung des EEWärmeG dimensioniert. Ein weiterer Vorteil der minimalen Dimensionierung sind die minimalen Investitionskosten, die der Bauherr aufzubringen hat.

Durch den Eingriff in das Bestandssystem mit dem Einbezug der Wärmepumpe in die Versorgung des Bestandsbaus ergibt sich, zusätzlich zum Neubau, eine erhöhte Anforderung des EEWärmeG an den Deckungsanteil des Wärme- und Kälteenergiebedarfs durch eine regenerative Anlage. Bei Modernisierungen von Heizungssystemen wird gefordert, dass 15 % des Nutzenergiebedarfs für die Wärme- und Kälteversorgung des Altbaus durch ein regeneratives System oder ersatzweise durch eine KWK-Anlage bereitgestellt wird. Zu der Nutzenergie von 280 MWh/a für die Anforderungen an den Neubau werden zusätzlich 304 MWh/a für den die Modernisierung des Bestandsbaus

addiert, die durch eine regenerative Anlage gedeckt werden müssen. Von der Summe der Nutzenergie von 584 MWh/a werden außerdem die 80 MWh/a abgezogen, die von der solarthermischen Anlage bereitgestellt werden.

Aufgrund der vergleichsweise geringen Anforderung kann davon ausgegangen werden, dass mehr Vollaststunden erreicht werden. Daher wird mit 8.000 Vollaststunden der Wärmepumpe kalkuliert. Zur Erfüllung der Gesetzesvorgaben ist eine Leistung von 63 kW erforderlich. Bei einer minimal erforderlichen Leistung des späteren Gesamtgebäudes von 85,5 kW ist sichergestellt, dass die bereitgestellte Wärme abgenommen wird. Um den wirtschaftlichen Nutzen zu erhöhen wird die Leistung der Wärmepumpe auf 80 kW festgelegt. Gemäß der Jahresdauerlinie, die in Abbildung 3.12: Jahresdauerlinie der Variante 4 dargestellt ist, kann die Anlage das ganze Jahr betrieben werden. Da in der Sommerzeit während der Nacht ein geringer Wärmebedarf besteht, kann es vorkommen, dass die Wärmepumpe stillsteht. Daher wird weiterhin mit 8.000 Betriebsstunden kalkuliert. Die Wärmepumpe mit den genannten Daten wird 640 MWh/a Wärmeenergie bereitstellen.

Bei zusätzlichem Heizbedarf wird der bestehende Gaskessel zugeschaltet. Der Ölkessel dient lediglich der Spitzenlastabdeckung. Mit einer Gesamtleistung von 1.058 kW deckt das System nicht die komplette Heizlast ab. Die Erfahrung mit der geringen Laufzeit des Ölkessels ist jedoch ein Indiz dafür, dass die reale Heizlast geringer ist, als angenommen und noch freie Leistung zur Verfügung steht. Außerdem können die wenigen Stunden im Jahr in denen die maximale Heizlast anfällt durch den Pufferspeicher abgedeckt werden.

Die Deckungsanteile der Heizkessel am Jahreswärmebedarf werden anhand der Jahresdauerlinie aus Abbildung 3.12: Jahresdauerlinie der Variante 4 ermittelt. Damit keine Energiemenge des Bedarfes unterschlagen wird, wird der Ölkessel mit einer Leistung von 582 kW angegeben. Bei einer Vollaststundenzahl von 102 werden jährlich 59,4 MWh Wärmeenergie durch den Ölkessel bereitgestellt. Zur Ermittlung der Energiemenge, die der Gaskessel bereitstellt, werden vom Bedarfswert die bereits gedeckten Anteile abgezogen. Vom Gesamtwärmeenergiebedarf von 2.400,6 MWh/a bleiben, nach Abzug von 640 MWh/a, 80 MWh/a und 59,4 MWh/a, 1.621,2 MWh/a, die vom Gaskessel bereitgestellt werden.

Analog zu Variante 1 wird auf dem westlichen Dach eine PV-Anlage auf einer Fläche von 600 m² installiert. Die Anlage generiert jährlich 64.000 kWh elektrische Energie.

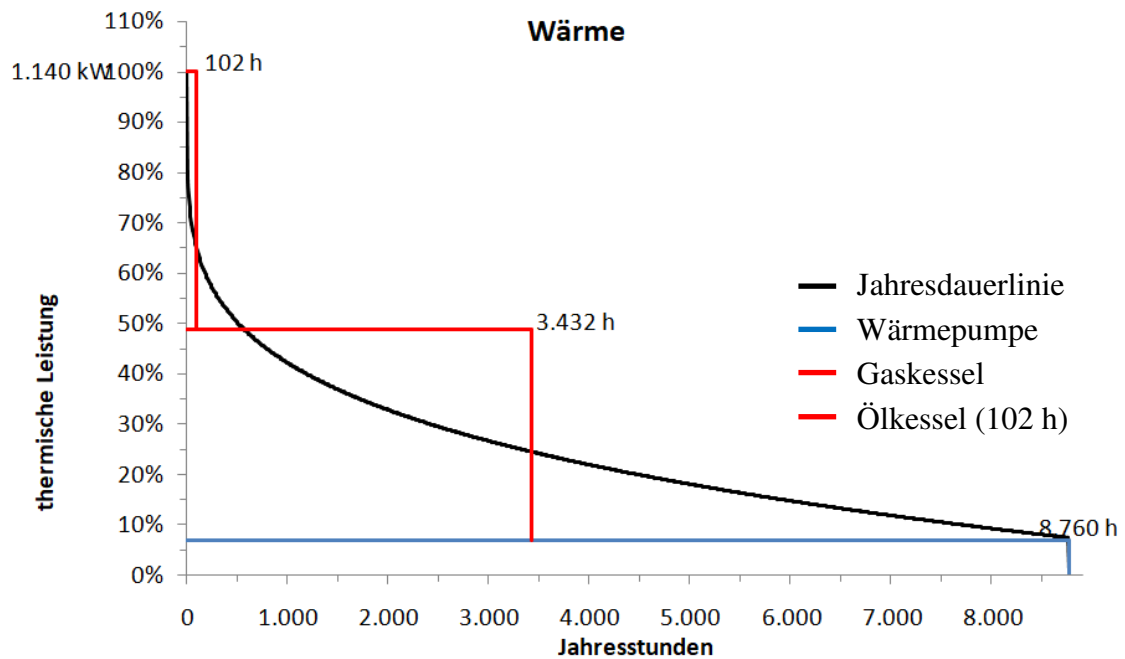


Abbildung 3.12: Jahresdauerlinie der Variante 4 (in Anlehnung an [13])

3.3.6 Variante 5

In Abbildung 3.13 ist das Schema der Variante 5 abgebildet. In Variante 5 wird ein BHKW zur Grundlastabdeckung betrieben. Wie in Variante 4 werden die Bestandskessel zur Mittel- und Spitzenlastabdeckung zugeschaltet. Das BHKW generiert im Betrieb elektrische Energie, die vom Klinikum selbst genutzt wird. Zusätzlicher Bedarf wird durch das öffentliche Netz gedeckt.

Das BHKW wird analog zur Wärmepumpe in Variante 4 auf eine Vollaststundenzahl von 8.000 Stunden pro Jahr ausgelegt. Das BHKW wird ebenfalls auf eine thermische Leistung von 80 kW dimensioniert, sodass jährlich 640 MWh an Wärmeenergie bereitgestellt werden. Durch die identische Heizlastdeckung der einzelnen Anlagen ergeben sich die gleichen Deckungsanteile des jährlichen Wärmeenergiebedarfes.

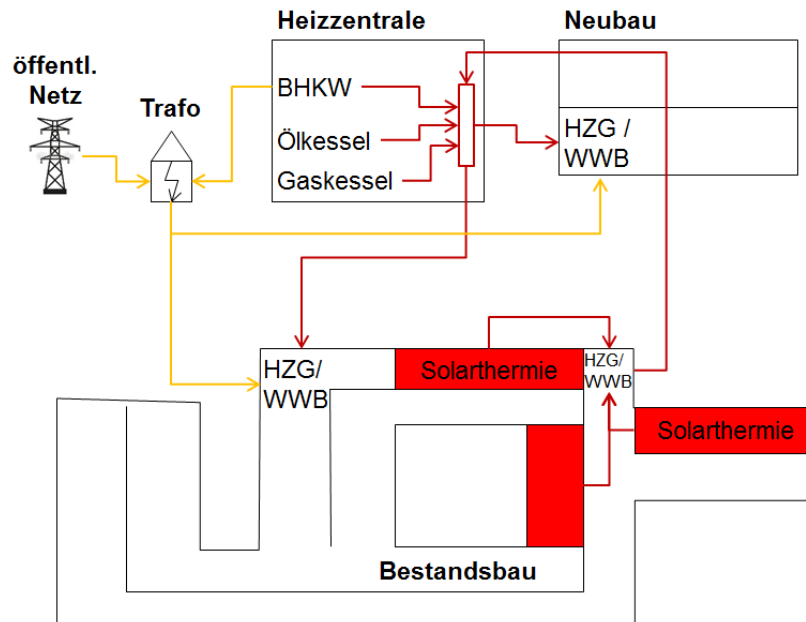


Abbildung 3.13: Schema Variante 5

3.3.7 Variante 6

In Abbildung 3.14 ist das Schema der Variante 6 zu erkennen. Ein Biomassekessel wird zur Grundlastdeckung installiert. Die Mittel-, bzw. Spitzenlast wird durch bestehenden Gas- und Ölkessel gedeckt. Der Strom der gesamten Liegenschaft wird durch das öffentliche Netz gedeckt.

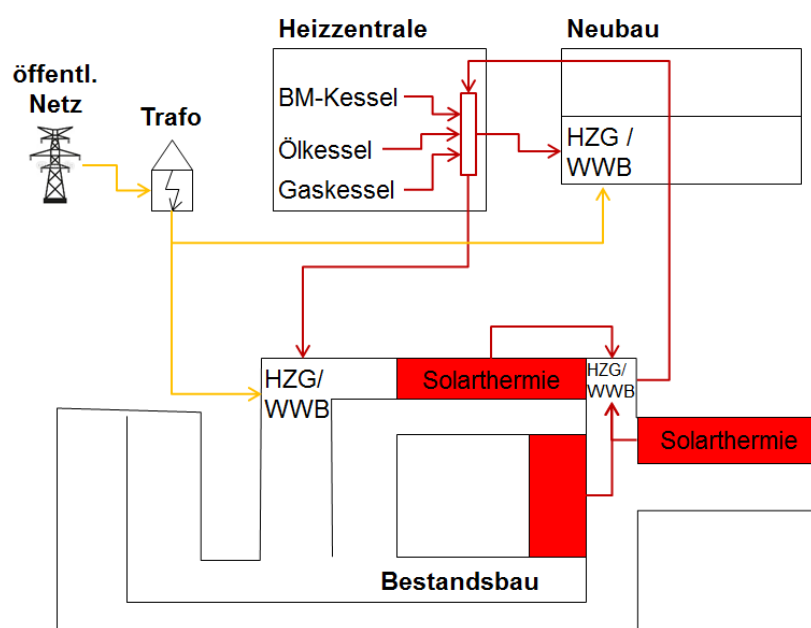


Abbildung 3.14: Schema Variante 6

Aufgrund des guten Teillastverhaltens des Biomassekessels und keine Verschleißerhöhung wird er etwas größer als das BHKW und die WP dimensioniert. Es wird jedoch auf einen Kessel mit hoher Leistung verzichtet, weil hohen Investitionskosten nicht erwünscht sind. Durch die Vergasung des Holzes und den benötigten Speicher ist eine Biomasseanlage vergleichsweise kostenintensiv in der Anschaffung. Biomassekessel nutzen Holz-Hackschnitzel oder Holz-Pellets als Brennstoff. Weil die Energiedichte der Holz-Brennstoffe gering ist, sind zur Bevorratung ein großer Speicher und häufige Anlieferungen notwendig.

Das EEWärmeG fordert die Deckung von 50 % des Wärme- und Kältebedarfs durch Biomasse. Ein Biomassekessel mit einer Leistung von 100 kW erreicht nach der JDL, die in Abbildung 3.15 dargestellt ist, 8.722 Vollaststunden. Der Wert des daraus errechneten Wärmebedarfes jährliche Wärmeenergieertrag des Biomassekessels berechnet sich zu etwa 870 MWh. Da die solarthermische Anlage in der Jahresdauerlinie nicht berücksichtigt ist werden die 80 MWh jährlicher solarer Ertrag davon abgezogen. Die Wärmeenergie, die der Biomassekessel bereitstellt beträgt demnach 790 MWh. Bei einer Leistung von 100 kW wird der Kessel 7.900 Vollaststunden erreichen. Anhand der Vollaststundenwerte Kessel, lassen sich die jeweiligen Wärmeenergieerträge errechnen. Der Gaskessel mit einer Nennleistung von 478 kW stellt jährlich in 3.096 Vollaststunden 1.480 MWh Wärmeenergie bereit. Um den gesamten Energiebedarf abzudecken wird für den Ölkessel eine Leistung von 562 kW angegeben. Der Ölkessel deckt etwa 48 MWh des jährlichen Wärmebedarfs.

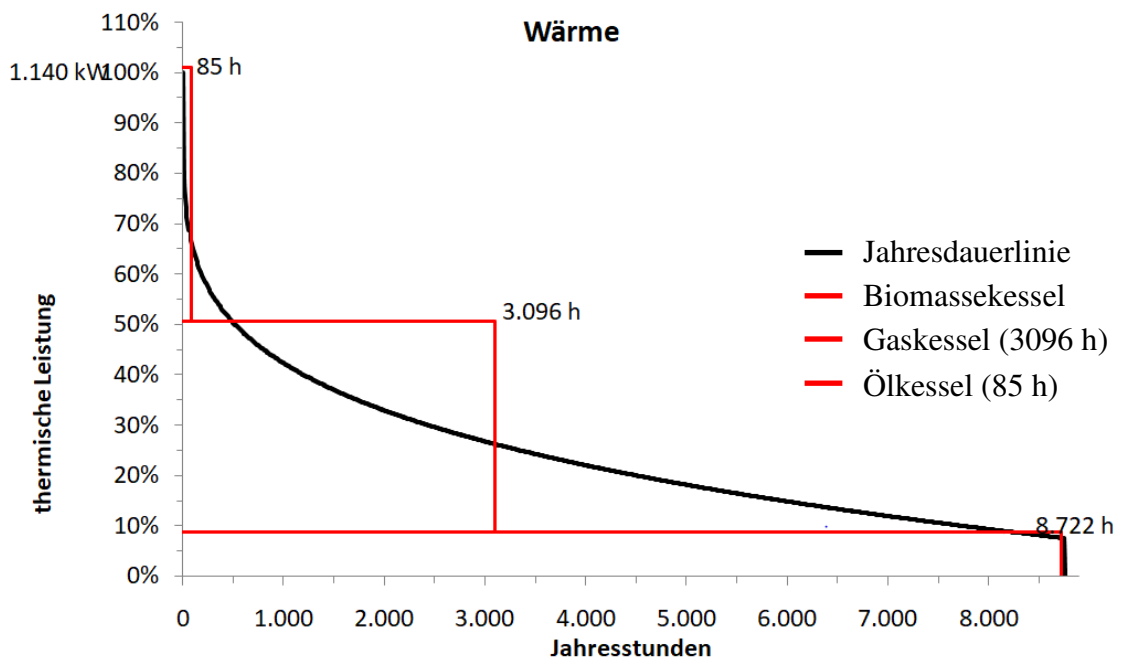


Abbildung 3.15: Jahresdauerlinie Variante 6 (in Anlehnung an [13])

4 Variantenvergleich

Die beschriebenen Varianten stellen ein Portfolio an unterschiedlichen Systemen dar. In diesem Kapitel werden diese Varianten ökonomisch und ökologisch verglichen und bewertet. Zum Abschluss des Vergleichs wird eine Empfehlung an den Bauherrn abgegeben. Der Vergleich stellt somit eine Entscheidungshilfe für die Auswahl eines Systems dar. Für den Bauherrn spielt dabei der wirtschaftliche Vergleich eine große Rolle. Die ökologische Betrachtung ist in der Wahrnehmung der ökologischen eher untergeordnet. Durch den weiteren Fortschritt des Klimawandels, wird die ökologische Verträglichkeit der Wärmebereitstellung in Zukunft eine größere Rolle einnehmen müssen. Die, in diesem Kapitel enthaltenden Tabellen sind Ausschnitte der jeweiligen Vergleichstabelle. Die vollständigen Tabellen sind dem Anhang A1 und A2 zu entnehmen.

4.1 Ökonomischer Vergleich

Wie beschrieben, ist der ökonomische Vergleich der Varianten zur Auswahl eines Systems für den Investor und späteren Betreiber entscheidend. Einerseits sind die Investitionskosten gering zu halten um den Kredit und die Zinsen für die Baumaßnahme zu minimieren. Andererseits ist ein kostengünstiger Betrieb wünschenswert um langfristig die Ausgaben zu mindern und die Investition zu amortisieren.

Grundlage für den Vergleich ist der in Kapitel 3.2 errechnete Bedarf und die Erträge der Systeme, die sich nach der Gesetzgebung und dem wirtschaftlichem Nutzen richten. Der ökonomische Vergleich bezieht die Hauptfaktoren der fixen und variablen Kosten ein. Dazu zählen die Energiekosten, Wartungskosten, sowie Investitions- und Zinskosten. Es wird ein Zeitraum von 20 Jahren betrachtet. 20 Jahre sind ein üblicher Betrachtungszeitraum, der der Mindestlebensdauer vieler Anlagen entspricht.

Zur Übersicht sind die Varianten in Tabelle 4.1 abgebildet. Die Tabelle beinhaltet die Daten der Wärme- und Kälteerzeuger, den Nutzenergiebedarf und gibt an, inwieweit das EEWärmeG erfüllt wird.

Zunächst sind die Grundlasterzeuger aufgeführt. Als Grundlasterzeuger sind regenerativen Anlagen gewählt worden, die nach dem EEWärmeG erforderlich sind. Ergänzt werden die Systeme bei der separaten Neubauversorgung durch einen Gas-Brennwertkessel zur Spitzenlastdeckung und bei den Varianten 4 bis 6 der Gas-Brennwertkessel und der Öl-Niedertemperaturkessel aus dem Bestand für die Mittel-, bzw. Spitzenlastdeckung. Die Kälte wird in allen Varianten identisch von einer Splitklimaanlage bereitgestellt.

Die Bedarfsdeckung aus regenerativen Energien zur Erfüllung des EEWärmeG für die jeweiligen Varianten ist in Kapitel 3.3 beschrieben. In der Übersicht ist ersichtlich inwieweit die Bedingungen erfüllt werden. Da die Einhaltung des Gesetzes für den Einsatz des Systems erforderlich ist, sind die Varianten darauf ausgerichtet und erfüllen dieses. Die Varianten 3 bis 6 sind aus wirtschaftlichen Gründen, im Bezug auf das EE-WärmeG, überdimensioniert.

Tabelle 4.1: Übersicht über die Varianten

		Variante 0	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	Variante 6
Variantebezeichnung		Bestandsbau Gaskessel + Ölkessel	Neubau Geothermie + Gaskessel + Photovoltaik	Neubau BHKW + Gaskessel	Neubau Solarthermie + Gaskessel	Modernisierung Geothermie + Photovoltaik	Modernisierung BHKW	Modernisierung Biomasse
Wärmeconcept - Heizlast	kW	960	180	180	180	1.140	1.140	1.140
Wärmeerzeuger 1 – Grundlast		Solarthermie	Sole-/Wasser-Wärmepumpe	BHKW	Solarthermie	Sole-/Wasser-Wärmepumpe	BHKW	Biomasse-Brennwertkessel
Wärmeerzeuger 1 – Deckungsanteil	%	12	22	22	95	7	7	9
Wärmeerzeuger 1 - Leistung	kW	119	40	40	171	80	80	100
Wärmeerzeuger 2 – Grundlast						Solarthermie	Solarthermie	Solarthermie
Wärmeerzeuger 2 – Deckungsanteil	%					10	10	10
Wärmeerzeuger 2 - Leistung	kW					119	119	119
Wärmeerzeuger 3 – Mittellast		Gas-Brennwertkessel	-	-	-	Gas-Brennwertkessel	Gas-Brennwertkessel	Gas-Brennwertkessel
Wärmeerzeuger 3 – Deckungsanteil	%	50	-	-	-	42	42	42
Wärmeerzeuger 3 - Leistung	kW	478	-	-	-	478	478	478
Wärmeerzeuger 4 - Spitzenlast		Öl-Niedertemperaturkessel, Leistung redundant	Gas-Brennwertkessel, Leistung redundant	Gas-Brennwertkessel, Leistung redundant	Gas-Brennwertkessel, Leistung redundant	Öl-Niedertemperaturkessel, Leistung redundant	Öl-Niedertemperaturkessel, Leistung redundant	Öl-Niedertemperaturkessel, Leistung redundant
Wärmeerzeuger 4 - Deckungsanteil	%	38	78	78	5	41	41	39
Wärmeerzeuger 4 - Leistung	kW	363	140	140	9	463	463	443
Wärmeerzeuger 4 - Leistung	kW	500	180	180	180	500	500	500
Kälteconcept - Kühllast	kW	9	3	3	3	12	12	12
Kälteerzeuger 1 - Grundlast		Splitkälte	Splitkälte	Splitkälte	Splitkälte	Splitkälte	Splitkälte	Splitkälte
Kälteerzeuger 1 - Deckungsanteil	%	100	100	100	100	100	100	100
Kälteerzeuger 1 - Leistung	kW	9	3	3	3	12	12	12
Normerfüllung								
EEWärmeG	%	0%	105%	105%	138%	133%	133%	160%
1. Energiebedarf								
Bruttogrundfläche	m ²	16.300	4.470	4.470	4.470	20.770	20.770	20.770
Nutzenergiebedarf Wärme inkl. WWB	kWh/a	1.950.000	530.000	530.000	530.000	2.400.000	2.400.000	2.400.000
Nutzenergiebedarf Kälte	kWh/a	79.000	26.000	26.000	26.000	105.000	105.000	105.000
Strombedarf	kWh/a	880.000	240.000	240.000	240.000	1.130.000	1.130.000	1.130.000

4.1.1 Energieverbräuche

Die Energieverbräuche bilden die Grundlage der Ermittlung der Energiekosten. Die Endenergieverbräuche Q_{End} werden nach Gleichung 4.1 aus dem Quotienten aus Nutzenergie Q_{Nutz} , die durch die jeweilige Anlage bereitgestellt wird und deren Wirkungs- bzw. Nutzungsgrad η errechnet.

$$Q_{\text{End}} = \frac{Q_{\text{Nutz}}}{\eta} \quad (4.1)$$

Die Endenergieverbräuche sind in Tabelle 4.2 dargestellt. Um die Varianten vergleichen zu können sind die Bedarfswerte auf die Grundfläche bezogen. Es ist zu erkennen, dass die Varianten 2 und 5 einen hohen Gasverbrauch aufweisen. In diesen Varianten wird die Wärmeenergie überwiegend aus der Umwandlung von Gas im BHKW und im Gas-Kessel bereitgestellt. In den Varianten 1 und 4, in denen eine Wärmepumpe eingesetzt wird, ist der Gasverbrauch dadurch gering, dass die Wärme des Erdreichs genutzt wird. Die solarthermische Anlage in Variante sorgt dafür, dass sich der Gasverbrauch leicht reduziert. Durch den Betrieb eines Biomassekessels bleibt die Summe des Endenergiebedarfs nahezu identisch zum bestehenden System. Im Unterschied dazu wird ein Teil der Menge an benötigtem Gas durch Hackschnitzel getauscht.

Der Heizölverbrauch durch den Ölkessel ist in den betreffenden Varianten sehr gering. Daran ist ersichtlich, dass ein Austausch der Ölheizung keinen großen Nutzen haben würde.

Tabelle 4.2: Energieverbräuche der Varianten

		Variante 0	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	Variante 6
2. Energieverbräuche								
2.8 kumulierter spez. Endenergiebedarf								
Gas	kWh/a*m ²	118	54	173	95	82	138	75
Hackschnitzel	kWh/a*m ²	0	0	0	0	0	0	42
Heizöl	kWh/a*m ²	3	0	0	0	3	3	3
Strom	kWh/a*m ²	56	73	55	57	64	56	56
Summe	kWh/a*m ²	177	127	228	151	150	197	176

Der Strombedarf von ergibt sich aus der allgemeinen Versorgung der Gebäude, und der Versorgung der technischen Anlagen. Der durch die BHKW generierte Strom wird an dieser Stelle noch nicht einbezogen. Zunächst weisen die BHKW durch den schlechteren thermischen Wirkungsgrad deshalb den höchsten spezifischen Gesamtendenergiebedarf auf. Durch den Bedarf an elektrischer Hilfsenergie beim Betrieb der Wärmepumpen ist der strombezug in den Varianten 1 und 4 erhöht. Der erhöhte Bedarf an elektrischer Energie soll in den Varianten durch die Eigentromversorgung durch die PV-Anlagen ausgeglichen werden. Die bereitgestellte Energie wird jedoch erst im nächsten Abschnitt in die Berechnung einbezogen. Dadurch, dass das Verhältnis der Leistung der Wärmepumpe im Vergleich zur Heizlast in Variante 1 größer als in Variante 4 ist, ist die spezifische Energieeinsparung beim Gas höher. Im Gegenzug sind die spezifischen elektrischen Energiebedarfswerte höher. Durch den Energiebezug aus dem Erdreich ist die Summe des spezifischen Endenergiebedarfs in den beiden Varianten am geringsten. Durch den hohen Nutzungsgrad der solarthermischen Anlage ist der End-

energiebedarf der Variante 3 ebenfalls gering. Der geringe Hilfsenergiebedarf ist in dem leicht erhöhten Bedarf an elektrischer Energie zu erkennen.

4.1.2 Betriebskosten

Die Betriebskosten umfassen alle laufenden Kosten bei Nutzung des Gebäudes und Betrieb der Anlagen. Zu den Betriebskosten zählen die Energiekosten aus den Brennstoff- und Stromverbräuchen. Die Erträge aus der Eigenstromerzeugung werden gegen die Energiekosten gegengerechnet. Durch eine Eigenstromproduktion können somit die Betriebskosten gesenkt werden. Neben den Energiekosten fallen Wartungskosten und Personalkosten für die Instandhaltung und Überwachung der Anlagen an.

Die Energiekosten werden maßgeblich von den Energiepreisen beeinflusst. Die Energiepreise der verschiedenen Energieträger sind in Tabelle 4.3 dargestellt. Die Preissteigerung wird erst am Ende der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einkalkuliert.

Tabelle 4.3: Energiepreise (in Anlehnung an [1] [9] [35] [36] [37])

Energieträger	Gas	Strom	Hackschnitzel	Heizöl
Energiepreis [ct/kWh]	4,50	17,20	3,17	6,41
Preissteigerung [%/a]	0,82	4,58	2,20	-1,44

Die jährlichen Energiekosten ergeben sich aus dem Produkt aus dem jährlichen Energiebedarf und dem Preis des jeweiligen Energieträgers. In Tabelle 4.4 sind die Betriebskosten der Varianten abgebildet. Beim BHKW und beim Gas-Kessel beschreiben die Energiekosten die Kosten aus dem Gasbezug. Im Fall der Wärmepumpen, Solar- und Kälteanlagen bilden die Energiekosten die Kosten der elektrischen Hilfsenergie ab. Der Biomassekessel nutzt Hackschnitzel und der Öl-Kessel Heizöl als Brennstoff. Bei jeder Variante entstehen Kosten durch den Strombezug für die allgemeine Nutzung des Gebäudes. Die Summe der Energiekosten lässt noch keine Bewertung der Varianten zu.

Im nächsten Schritt wird die Eigenstromproduktion angerechnet. Die Ersparnis aus der Eigenstromproduktion sind unter Abschnitt 3.3 der Tabelle 4.4 aufgelistet. In Variante 1 und 4 wird elektrische Energie durch PV-Module bereitgestellt. Bei den Varianten 2 und 5 generiert das BHKW elektrische Energie. Die Stromersparnisse ergeben sich aus dem verminderten Strombezug durch die Eigennutzung des erzeugten Stroms und dem damit verbundenen vermiedenen Netzentgelt. Für den erzeugten Strom wird jedoch ein Anteil der EEG-Umlage fällig. Die Anteile sind der vollständigen Tabelle in Anhang A1 zu entnehmen. Trotz der großflächigen Nutzung der Photovoltaik auf dem Dach des

Neubaus ist der jährliche Ertrag an elektrischer Energie im Vergleich zum BHKW gering.

In der Tabelle A.1 sind ebenso die einzelnen Wartungskosten der jeweiligen Anlagen aufgelistet. In Tabelle 4.4 Abschnitt 3.4 ist lediglich die Summe der Wartungskosten abgebildet. An den Wartungskosten ist zu erkennen, dass die BHKW wartungsintensive Anlagen sind. Werden die Wartungskosten auf die Anlagenleistung bezogen ist außerdem ersichtlich, dass die leistungsspezifischen Wartungskosten mit steigender Leistung der sinken. Sinkende leistungsspezifische Kosten lassen sich dadurch erklären, dass bei der Wartung feste Kosten, wie Fahrtkosten anfallen und der Aufwand der Wartung nicht linear mit dem Wert der Leistung steigt. Die Summe der Energie- und Wartungskosten abzüglich der Einsparung durch Eigenstromproduktion ergibt die Summe der Betriebskosten. Zu Vergleichszwecken sind die Betriebskosten erneut auf die Grundfläche bezogen.

Tabelle 4.4: Betriebskosten der Varianten

		Variante 0	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	Variante 6
3. Betriebskosten								
3.2 Energiekosten								
Energiekosten BHKW	€/a	0	0	23.850	0	0	52.364	0
Energiekosten Wärmepumpe	€/a	0	13.194	0	0	28.968	0	0
Energiekosten Gas-Kessel	€/a	86.708	10.952	10.952	19.033	76.761	76.761	70.119
Energiekosten Öl-Kessel	€/a	2.876	0	0	0	4.333	4.333	3.619
Energiekosten Biomasse	€/a	0	0	0	0	0	0	27.826
Energiekosten Solarthermie	€/a	688	0	0	993	688	688	688
Energiekosten Kälteerzeugung	€/a	3.882	1.278	1.278	1.278	5.160	5.160	5.160
Energiekosten Strom	€/a	151.360	41.280	41.280	41.280	194.360	194.360	194.360
Summe Energiekosten	€/a	245.500	66.700	77.400	62.600	310.300	333.700	301.800
3.3 Eigenstromerzeugung								
Summe Eigenstromerzeugung	€/a	0	-11.100	-30.300	0	-11.100	-66.600	0
3.4 Wartungskosten								
Summe Wartungskosten	€/a	11.200	8.050	10.200	9.200	14.000	24.500	13.700
Summe Betriebskosten	€/a	256.700	63.650	57.300	71.800	313.200	291.600	315.500
Betriebskosten je m ² netto	€/m ² *a	15,75	14,24	12,82	16,06	15,08	14,04	15,19
Differenzkosten zu Variante 0	€/a	0,00	-1,51	-2,93	0,31	-0,67	-1,71	-0,56
Betriebskosten je m ² brutto	€/m ² *a	18,74	16,94	15,25	19,11	17,94	16,71	18,08

Der Vergleich zu Variante 0 gibt einen Überblick über die Verringerung der flächenspezifischen Betriebskosten. Die Betrachtung der Einsparungen ist jedoch hauptsächlich bei der Modernisierung des Heizungssystems Aussagekräftig. Durch den Vergleich der spezifischen Betriebskosten können die Heizungssysteme der Varianten 1 bis 3 untereinander verglichen werden. Die Wärmebereitstellung durch ein BHKW ist für die separate Wärmeversorgung des Neubaus bezüglich der Betriebskosten die beste Variante. Die spezifischen Betriebskosten sind im Vergleich zur bestehenden Anlage um 2,9 €/m²*a geringer. Die Ersparnis resultiert daraus, dass die Eigenstromproduktion die

Betriebskosten um $6,8 \text{ €/m}^2\cdot\text{a}$ senkt. Durch den Betrieb einer Wärmepumpe in Verbindung mit einer PV-Anlage, wie in Varianten 1 lassen sich die Betriebskosten nur etwas mehr als die Hälfte im Vergleich zum BHKW senken. Die Kosteneinsparung in Variante 1 ergibt sich aber hauptsächlich aus der Eigenstromproduktion durch die PV-Anlage. Der Vorteil der Wärmepumpe, dass ein Großteil der Endenergie aus dem Erdreich genutzt wird, wird dadurch ausgeglichen, dass die elektrische Energie im gleichen Verhältnis teurer ist als Erdgas.

Mithilfe der solarthermischen Anlage lassen sich die Betriebskosten auf den ersten Blick nicht senken. Jedoch sind die höheren Betriebskosten auf die höheren Wartungskosten zurückzuführen, die bei größeren Anlagen auf die Fläche bezogen geringer sind, wie oben beschrieben.

Ein Vergleich zwischen den ersten beiden mit den letzten drei Varianten lässt allerdings erkennen, dass die Anlagen mit einer größeren Leistung in Bezug auf die Grundfläche die Betriebskosten stärker verringern als die Anlagen mit verhältnismäßig geringer Leistung.

Durch die Modernisierung des Heizungssystems lassen sich die Betriebskosten durch alle drei gewählten Anlagen mit regenerativer Technik verringern. Die Betriebskosten sind bei Betrieb eines BHKW mit Abstand am geringsten. Durch die Anschaffung eines BHKW lassen sich etwa $1,7 \text{ €/m}^2\cdot\text{a}$ an Betriebskosten sparen. Auf den Bestandsbau bezogen lässt sich eine jährliche Ersparnis von 27.700€ errechnen. Im Vergleich zum Biomassekessel betragen die Betriebskostensparnisse das Dreifache. Die starke Verringerung der Betriebskosten bei Verwendung eines BHKW ist durch die hohe Eigenstromproduktion zu erklären. Durch die Investition in eine Wärmepumpe lassen sich lediglich $0,7 \text{ €/m}^2\cdot\text{a}$ an Betriebskosten sparen. Ebenso wie bei Variante 1 resultiert die Ersparnis aus der Eigenstromproduktion und nicht aus der Nutzung der Geothermie.

4.1.3 Kapitalkosten

Die Kapitalkosten ergeben sich in erster Linie aus den Anschaffungskosten der jeweiligen Anlagenkomponenten. Es wird von einer Finanzierung durch Fremdkapital ausgegangen, dass über 20 Jahre zurückgezahlt wird. Förderprogramme zur Unterstützung bei der Finanzierung bestimmter Anlagen werden nicht berücksichtigt.

Anhand der Investitionskosten in Tabelle 4.5 ist ersichtlich, dass bei den Varianten zum Neubau jeweils der gleiche Gaskessel eingesetzt wird. Der Gaskessel wird immer Leistungsredundant ausgeführt. Bei den Varianten der Modernisierung werden die Heizkessel aus dem Bestand übernommen, sodass Kosten gespart werden. Dadurch, dass die EDV im Neubau zentralisiert werden soll, ist ein neues Kältesystem zu installieren und die Anschaffungskosten sind für alle Varianten identisch.

Von den ersten drei Varianten sind die Investitionskosten für das BHKW mit insgesamt 154.000 € am geringste. In den Kosten für die BHKW ist eine Generalüberholung nach 10 Jahren eingerechnet. Variante 1 kostet im Vergleich 93.000 € mehr. Den größten Anteil an den Kosten hat die PV-Anlage von mit Kosten von 110.000 €. Bei Variante 3 sind die Kosten für das Feld der Vakuum-Röhrenkollektoren ausschlaggebend für die hohen Kosten von 328.000 €.

Im Vergleich zu allen anderen Varianten ist der Biomassekessel in der Anschaffung am günstigsten. Durch die komplexere Technik und den großen Brennstoffspeicher sind die Investitionskosten für Biomassekessel deutlich höher als für einen Gaskessel. Im Verhältnis zu einem BHKW oder einer der Installation einer Geothermie-Anlage sind die Kosten gering und die Lebensdauer hoch. Für die Modernisierung des Heizungssystems sind Investitionskosten des BHKW ebenfalls günstiger als die Wärmepumpe und die PV-Anlage.

Tabelle 4.5: Kapitalkosten der Varianten

		Variante 0	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	Variante 6
4. Kapitalkosten								
4.1 Investition								
BHKW inkl. Abgasführung	€	0	0	84.000	0	0	156.000	0
Wärmepumpe	€	0	22.000	0	0	40.000	0	0
Sondenfeld inkl. Trasse	€	0	53.000	0	0	96.000	0	0
Gas-Kessel inkl. Abgasführung	€	0	30.000	30.000	30.000	0	0	0
Biomasse-Kessel inkl. Abgasführung	€	0	0	0	0	0	0	50.000
Biomasselager inkl. Austragung	€	0	0	0	0	0	0	25.000
Solarkollektor-Feld	€	0	0	0	220.000	0	0	0
spez. Heizraumeinrichtungen	€	0	17.000	25.000	63.000	21.000	36.000	18.000
Kleinkälte	€	0	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
Photovoltaik-Feld	€	0	110.000	0	0	110.000	0	0
Summe Investition	€, netto	0	247.000	154.000	328.000	282.000	207.000	108.000
4.2 Kapitalkosten								
jährliche Belastung (Zins+Tilgung)	€/a	0	18.175	11.332	24.135	20.750	15.231	7.947

4.1.4 Wirtschaftlichkeit

In der Tabelle 4.6 wird das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsberechnung über 20 Jahre Betrieb dargestellt. Das Ergebnis bildet die Summe aus den Betriebskosten über den Betrachtungszeitraum und den Investitionskosten mit Zinstilgung ab. In die Betriebskosten wird die Preissteigerung für die Energieträger aus Tabelle 4.3 einbezogen. Die Preissteigerung der jeweiligen Energieträger wurde aus dem Mittel der Preisentwicklung der letzten 10 Jahre ermittelt. Anhand der Größenordnung der Investitionskosten und der Betriebskosten ist ersichtlich, dass die Betriebskosten über den Betrachtungszeitraum eine größere Rolle spielen.

Zum Vergleich der Varianten sind die Gesamtkosten zwischenzeitig auf die Bruttogrundfläche bezogen. Um die Wirtschaftlichkeit der Varianten im gesamten vergleichen zu können, werden jeweils die Betriebskosten für das gesamte Klinikum errechnet und auf die Gesamtfläche bezogen. Für die Varianten 1 bis 3 werden die Betriebskosten der des Bestandsbaus aus Variante 0 zu den Betriebs- und Investitionskosten für den Neubau addiert.

Es ist ersichtlich, dass ein BHKW mit Abstand die wirtschaftlichste Anlage ist. Die geringeren Betriebskosten durch die hohe Eigenstromproduktion geben hierbei den Ausschlag. Durch die größere Leistung des BHKW in der Variante 5 betragen die Kostenvorteile gegenüber Variante 2 als Variante mit den zweitgeringsten Kosten nach 20 Jahren fast 900.000 €. Im Vergleich zum nächst wirtschaftlichen System, dem Biomassekessel beträgt der Vorteil über 1 Mio. €.

Die Modernisierung schneiden im Allgemeinen besser ab. Wie oben erklärt sind bestimmte Betriebskosten bei Anlagen mit einer höheren Leistung im Vergleich zu gleichen Anlagen mit geringerer Leistung niedriger. Die übrigen Varianten unterscheiden sich geringfügig. Anhand der beiden Varianten, die den Betrieb einer Geothermie-Anlage vorsehen, ist ebenfalls ersichtlich, dass die Modernisierung des Heizungssystems gegenüber der separaten Versorgung des Neubaus wirtschaftlicher ist. In den beiden Varianten werden die Kosten durch die Eigenstromnutzung durch die PV-Anlage verringert. Die Nutzung der Erdwärme schafft keinen Vorteil bezüglich der Betriebskosten im Vergleich zur herkömmlichen Wärmebereitstellung. Neben den bereits bestehenden großen Preisunterschieden von Strom zu Gas ist der stärkere Anstieg des Strompreises im Vergleich zum Gas- oder Heizölpreis ein weiterer Grund für das moderate Abschneiden der Geothermie.

Tabelle 4.6: Wirtschaftlichkeit der Varianten

		Variante 0	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	Variante 6
5. Wirtschaftlichkeit								
Betrachtungszeitraum/Laufzeit	a	20						
Energiekosten inkl. Preissteigerung über Laufzeit	€, netto	9.337.714	2.115.165	1.789.127	2.380.446	11.379.491	10.155.887	11.478.107
Betriebskosten (Energie+Wartung) über Laufzeit	€, netto	9.561.714	2.276.165	1.993.127	2.564.446	11.659.491	10.591.676	11.752.107
Zins + Tilgung über Laufzeit	€, netto	0	363.494	226.632	482.696	415.001	304.628	158.937
Gesamtkosten über Betrachtungszeitraum	€, netto	9.561.714	2.639.659	2.219.759	3.047.143	12.074.492	10.896.304	11.911.044
Gesamtkosten je m ²	€, netto/m ²	587	591	497	682	581	525	573
Gesamtkosten Liegenschaft über 20 Jahre	€, netto	9.561.714	12.201.373	11.781.473	12.608.857	12.102.566	10.896.304	11.911.044
Gesamtkosten Liegenschaft je m ²	€, netto/m ²	587	587	567	607	581	525	573
Rang			5	2	6	4	1	3

Aus dem Vergleich der spezifischen Gesamtkosten zur Variante 0 ist erkennbar das sich nur das System mit der solarthermischen Anlage nicht amortisiert. Durch den geringen Deckungsanteil der Solarthermie am Wärmebedarf können die erhöhten Wartungskosten der Anlage nicht ausgeglichen werden. Zusätzlich zum geringen wirtschaftlichen Nutzen sind die Investitionskosten für eine solarthermische Anlage im Vergleich zu anderen Systemen sehr hoch.

Aus der Wirtschaftlichkeitsberechnung sticht die Variante 5 mit dem BHKW zur Grundlastabdeckung des gesamten Klinikum heraus. Anhand des Kriteriums der Wirtschaftlichkeit wird eine Empfehlung für die Anschaffung eines solchen BHKW ausgesprochen.

4.2 Ökologischer Vergleich

Der ökologische Vergleich wird als Werkzeug genutzt um die Auswirkung der Varianten auf die Umwelt zu ermitteln. Als Vergleichswerte werden die jährlichen CO₂-Emissionen herangezogen. Anhand der Höhe der CO₂-Emissionen wird auf die Nachhaltigkeit der Varianten geschlossen.

Der Tabelle A.2 sind die Grundlagen des ökologischen Vergleichs zu entnehmen. Grundlage bildet der Nutzenergiebedarf der Gebäude. Zur Bereitstellung der Nutzenergie ist ein bestimmter Endenergiebedarf notwendig, wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben. Der Endenergiebedarf der Anlagen wird auf jeweiligen Energieträger bezogen. Der Endenergiebedarf der verschiedenen Energieträger wird anschließend aufsummiert. In Tabelle 4.8 sind die Endenergiebedarfswerte der Energieträger und die daraus resultierenden CO₂-Emissionen der Varianten dargestellt.

Tabelle 4.7: Stoffdaten Energieträger [20] [22] [27]

	Erdgas	Heizöl	Hackschnitzel	Strommix	Ökostrom
Brennwert/Heizwert	1,11	1,06	1,08	-	-
Spez. CO ₂ -Emissionen [kg/kWh*a]	0,250	0,319	0,024	0,565	0,040

Der Endenergiebedarf der Wärmeträger, der in Abschnitt 2.9 der Tabelle abgebildet ist, wird auf den Brennwert bezogen. Die Brennwert-Heizwert-Verhältnisse sind in Tabelle 4.7 angegeben. Die CO₂-Emissionen der jeweiligen Energieträger ergeben sich aus dem Produkt aus Endenergiebedarf und spezifischen CO₂-Emissionen der Energieträger aus Tabelle 4.7. Der Wert für den Strom ergibt sich aus dem Strom-Mix in Deutschland aus regenerativen Energien und konventionellen Kraftwerken und deren Wirkungsgraden.

Die spezifischen CO₂-Emissionen des Ökostroms sind hauptsächlich auf die Herstellung der Anlagen zurückzuführen. Grundlage für den Wert ist die derzeitige Zusammensetzung des Ökostromes aus Wind- Wasser- und Solarenergie. Die jährlichen CO₂-Emissionen der Energieträger werden in Abschnitt 3 der Tabelle 4.8 kumuliert und zu Vergleichszwecken auf die Grundfläche bezogen. Damit die Varianten in der Gesamtheit auf Vergleichbar sind, werden CO₂-Emissionen des Bestandsbaus und die Werte für den Neubau in den Varianten 1 bis 3 summiert.

Die Varianten werden in zwei verschiedenen Szenarien verglichen. Zum einen werden die CO₂-Emissionen mit den spezifischen CO₂-Emissionen des gegenwärtigen Strommixes in Deutschland errechnet. Zum Anderen werden die Mengen an CO₂ ermittelt, die emittiert werden, wenn der Strom zu regenerativ 100 % generiert wird. Die Bewertung der Varianten ist anhand der Emissionswerte mit dem gegenwärtigen Strommix erstellt worden.

Die Variante mit Wärmebereitstellung durch eine Hackschnitzelheizung stellt sich in dem Vergleich als die Variante mit den geringsten CO₂-Emissionen heraus. Die geringen CO₂-Emissionen ergeben sich aus der niedrigen CO₂-Äquivalents von Hackschnitzeln. Der geringe Wert ist darauf zurückzuführen, dass Holz ein CO₂-neutraler Brennstoff ist. Holz wird als CO₂-neutral bezeichnet, weil bei der Verbrennung CO₂ freigesetzt wird, zur Entstehung des Energieträgers Holz allerdings CO₂ aus der Luft entnommen und umgewandelt wird. Die spezifischen CO₂-Emissionen ergeben sich aus dem Transport des Energieträgers. Die CO₂-Emissionen in Varianten 6 werden hauptsächlich durch die Verbrennung von Erdgas und die Stromversorgung verursacht.

Nach dem Biomassekessel sind die CO₂-Emissionen bei Variante 5 am geringsten. Der Vorteil ergibt sich durch die Eigenstromproduktion mittels BHKW. Die Emissionen aus der Gasverbrennung sind höher als in den anderen Varianten. Durch den verminderten Strombedarf werden Emissionen eingespart. Durch den hohen spezifischen Emissionswert wird das Ergebnis stark vom Strombedarf beeinflusst. Die hohen Emissionswertwerte der BHKW-Varianten beim Ökostrombezug sind dadurch zu erklären, dass der thermische Wirkungsgrad der Anlagen gering ist und dass bei der Eigenstromnutzung durch die Erdgas-Verbrennung mehr CO₂ emittiert wird, als dies beim Ökostrom der Fall ist.

Für die Variante 4 wird nur ein geringfügig höherer Wert an CO₂-Emissionen ermittelt. Die Wärmepumpen sparen durch die regenerative Technik im Vergleich zum Bestand ebenfalls Emissionen ein. Die Einsparungen sind auf den geringeren Erdgasbedarf zurückzuführen. Bei aktuellem Strommix ist der hohe Bezug elektrischer Energie jedoch von Nachteil. Wird Ökostrom bezogen ergeben sich andererseits geringe Emissionen.

Von den ersten drei Varianten werden durch Variante 1 mit Betrieb der Wärmepumpe die geringsten CO₂-Emissionen verursacht. Die Einsparungen durch die Geothermie in

Verbindung mit der Verringerung des Strombezugs durch die PV-Anlage sind größer als durch das BHKW in Variante 2.

Die solarthermische Anlage verringert ebenfalls die CO₂-Emissionen. Weil der Anteil der regenerativ erzeugten Wärme gering ist, sind die Einsparungen ebenso niedrig. Im Vergleich zu den anderen Varianten wird mehr Wärmeenergie durch die Gaskessel bereitgestellt.

Tabelle 4.8: ökologischer Vergleich

		Variante 0	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	Variante 6
2. Endenergiebedarf								
2.9 kumulierter Bedarf								
Brennwert/Heizwert Erdgas	-	1,11						
Brennwert/Heizwert Heizöl	-	1,06						
Brennwert/Heizwert Hackschnitzel	-	1,08						
Erdgas	kWh/a	1.735.894	219.250	696.727	381.044	1.536.747	2.585.068	1.403.793
Heizöl	kWh/a	42.346	0	0	0	63.786	63.786	53.280
Hackschnitzel	kWh/a	0	0	0	0	0	0	812.757
Strom	kWh/a	906.571	260.139	72.529	253.204	1.268.421	780.000	1.164.000
3. CO₂-Emissionen								
spez. CO ₂ -Emissionen Erdgas	kg/kWh*a	0,250						
spez. CO ₂ -Emissionen Heizöl	kg/kWh*a	0,319						
spez. CO ₂ -Emissionen Hackschnitzel	kg/kWh*a	0,024						
spez. CO ₂ -Emissionen Strommix	kg/kWh*a	0,565						
spez. CO ₂ -Emissionen Ökostrom	kg/kWh*a	0,040						
CO ₂ Emission Erdgas	t/a	434,0	54,8	174,2	95,3	384,2	646,3	350,9
CO ₂ Emission Öl	t/a	13,5	0,0	0,0	0,0	20,3	20,3	17,0
CO ₂ Emission Biomasse	t/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,5
CO ₂ Emission Strommix	t/a	512,2	147,0	41,0	143,1	716,7	440,7	657,7
CO ₂ Emission Ökostrom	t/a	36,3	10,4	2,9	10,1	50,7	31,2	46,6
CO ₂ Emission kumuliert	t/a	959,7	201,8	215,2	238,3	1.121,2	1.107,3	1.045,1
CO ₂ Emission kumuliert (Öko)	t/a	483,7	65,2	177,1	105,4	455,3	697,8	434,0
CO ₂ Emission Liegenschaft kumuliert	t/a	1.222,9	1.161,5	1.174,9	1.198,0	1.121,2	1.107,3	1.045,1
CO ₂ Emission Liegenschaft kumuliert (Öko)	t/a	616,4	549,0	660,8	589,1	455,3	697,8	434,0
CO₂ Emission je m²	kg/m²*a	58,9	55,9	56,6	57,7	54,0	53,3	50,3
CO₂ Emission je m² (Öko)	kg/m²*a	29,7	26,4	31,8	28,4	21,9	33,6	20,9
Rang			4	5	6	3	2	1

Generell stellen sich die Varianten zur Modernisierung des Heizsystems als nachhaltiger gegenüber der Versorgung des Neubaus heraus. Durch den höheren Deckungsanteil der regenerativen Anlagen des Gesamtenergiebedarfs werden die CO₂-Emissionen in den Varianten 4 bis 6 stärker reduziert.

Bei gegenwärtiger Stromerzeugung ist der Betrieb eines BHKW umweltfreundlicher als konventionelle Heizkessel. Durch den Einsatz eines BHKW werden jedes Jahr 115 t CO₂ im Vergleich zum bestehenden System eingespart.

Durch den Ausbau der regenerativen Technik in der Stromerzeugung wird spezifische Emissionswert des Strommix in Deutschland immer weiter sinken. Dadurch verringern sich auch die CO₂-Einsparungen, die durch ein BHKW gegenwärtig erreicht werden.

Dadurch, dass zur Wärmeversorgung mittels Geothermie-Anlagen die Erdwärme genutzt werden Fossile Brennstoffe eingespart. Da für den Betrieb elektrische Energie benötigt wird sind die CO₂-Emissionen im Vergleich zu anderen Techniken gegenwärtig relativ hoch. Mit zunehmender Nachhaltigkeit in der allgemeinen Stromversorgung werden die Vorteile der Geothermie in Zukunft ihnen den Vorteil in das sehr geringe CO₂-Mengen emittiert werden, wenn der Strom nachhaltiger generiert wird.

Aus ökologischer Sicht ist der Einsatz eines Biomassekessels zu bevorzugen. Unabhängig von den Emissionswerten durch den Strombedarf, sind die CO₂-Emissionen durch einen hohen Deckungsanteil des Kessels und der geringen spezifisch Emissionen von Holz sehr gering. Bezüglich des geringen Emissionswertes ist darauf zu achten, dass für den Einsatz in Heizkessel Holzabfälle oder nachhaltig beforstetes Holz verwendet werden. Wird mehr Wald zu Befuerung gerodet als nachwachsen kann, ist die CO₂-Neutralität nicht mehr gegeben.

Tabelle 4.9 stellt die Übersicht der Ergebnisse aus dem ökonomischen und ökologischen Vergleich der Varianten dar. Durch die Mittelwertbildung aus der Platzierung des wirtschaftlichen und es ökologischen Vergleichs werden beide Disziplinen gleichstark gewichtet. Außerdem spielt Differenz zwischen den Rängen der einzelnen Vergleiche keine Rolle.

Tabelle 4.9: Ergebnis des Variantenvergleichs

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	Variante 6
Ökonomischer Vergleich	5	2	6	4	1	3
Ökologischer Vergleich	4	5	6	3	2	1
Durchschnitt	4,5	3,5	6	3,5	1,5	2
Ergebnis	5	3	6	3	1	2

Die Variante 5 stellt sich als Ergebnis beider Vergleiche sinnvollste Variante heraus. Die zweite BHKW-Variante liegt hingegen noch hinter dem Biomassekessel. Daraus ist erkennbar, dass der Einbezug des Bestandsbaus durch eine Modernisierung des bestehenden Heizungssystems, sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch von Vorteil gegenüber der Einzelbetrachtung des Neubaus ist. Zusätzlich wird die Argumentation durch die Platzierung der Varianten 1 und 4 mit Wärmepumpen unterstützt.

Bei reinem Vergleich der Wärmeerzeugersysteme, ist die Ausführung einer größeren Anlage bei Modernisierung von Vorteil. Ein BHKW ist im Vergleich zur Wärmepumpe durch die Eigenstromproduktion derzeit sowohl ökonomischer als auch ökologischer. Der ökologische Variantenvergleich hat herausgestellt, dass die Geothermie bei voranschreitender regenerativer Stromerzeugung ebenfalls nachhaltiger wird. Damit in Zukunft häufiger in Geothermie-Anlagen investiert wird, wird es auch darauf ankommen die Betriebskosten der Anlage zu senken. Durch den hohen Strompreis ist der Einsatz einer Wärmepumpe derzeit nicht so wirtschaftlich wie z.B. ein BHKW.

Der Biomassekessel erzielt ein gutes Ergebnis, weil die Technik einfach und somit die Anschaffung verhältnismäßig günstig ist. Außerdem ist der Betrieb nicht nur ökologisch, sondern durch geringe Kosten für Hackschnitzel auch ökonomisch ist. Der Einsatz einer Solarthermischen Anlage stellt sich im Vergleich weder als wirtschaftlich noch ökologisch heraus. Der Nachteil der Solarthermischen Anlage besteht darin, dass der regenerative Anteil an der Bedarfsdeckung gering ist und mehr fossile Energieträger benötigt werden. Außerdem ist eine Anlage in der benötigten Größenordnung mit hohen Investitionen verbunden.

5 Systemauswahl

Aufgrund der erheblichen Vorteile in ökonomischer Hinsicht hat sich die Waldklinik Jesteburg Aldag GmbH für die Investition in ein BHKW zur Grundlastdeckung des Wärmebedarfs des gesamten Klinikums entschieden. Die Baumaßnahme des Anbaus des Bettenhauses soll zur Modernisierung des Heizsystems genutzt werden. Deshalb wird die Anlage für die Beheizung der gesamten Liegenschaft geplant. Dadurch, dass die Betriebskosten stark reduziert werden und die Bestandskessel weiter in Betrieb bleiben sind die Investitionskosten angemessen.

5.1 Grundlast

Die Grundlastabdeckung wird durch das BHKW übernommen. Wie in Kapitel 3.3 beschrieben ist die Grundlastabdeckung der sinnvollste Einsatzbereich eines BHKW. Das BHKW ist auf lange Betriebszeiten dimensioniert worden, indem die Leistung unterhalb der durchschnittlichen minimalen Wärmelast liegt. Lange Laufzeiten begünstigen die Wirtschaftlichkeit des BHKW zusätzlich dahingehend, dass viel elektrische Energie generiert wird und die Kosten des Strombezugs sinken. Die Grundlast besteht in erster Linie aus dem Warmwasserbedarf, weil es Zeiten gibt in denen keine Heizleistung erforderlich ist. Als zusätzliche Wärmelast im Bestandsbau erfordert das Wasser des Klinik-Schwimmbeckens stetig Wärmezufuhr. Teil der Grundlast sind in der Praxis ebenso Wärmeverluste des Pufferspeichers und der Rohrleitungen.

Ein Teil der Grundlast wird ebenfalls durch die solarthermische Anlage des Bestandes gedeckt. Bei hohem Ertrag wird die bereitgestellte Wärme im gesamten Klinikum genutzt. Bei geringem Wärmebedarf und in solar ertragreichen Zeiten wird die Wärme des BHKW nicht abgenommen und die Anlage wird abgeschaltet.

Es ist jedoch davon auszugehen, dass das BHKW hohe Betriebszeiten erreicht. Kurzfristige Bedarfssinken und -spitzen werden ausgeglichen, indem ein Pufferspeicher bei geringem Wärmebedarf mit überschüssiger Energie geladen wird und bei erhöhtem Wärmebedarf entladen wird. Geringer Bedarf tritt z.B. in den Nachstunden auf. Der Pufferspeicher sollte so dimensioniert sein, dass die überschüssige Energie während der Nacht aufgenommen werden kann. Bei kurzzeitigem Mehrbedarf z.B. bei erhöhtem Warmwasserbedarf in den Morgenstunden wird der Speicher wieder entladen. Der Pufferspeicher erhöht somit die Betriebsstunden des BHKW und verringert die Betriebszeit des Spitzenlastkessels dadurch das kurzfristige Bedarfsspitzen abgedeckt werden.

5.2 Spitzenlast

Steigt jedoch der Wärmebedarf im Klinikum langfristig über die Leistung des BHKW, decken der Gas-Brennwertkessel und der Öl-Niedertemperaturkessel den Wärmebedarf. Der Gaskessel wird als Mittellastkessel zuerst in Betrieb genommen. Erhöhter Bedarf besteht in der Regel in Zeiten mit geringen Außentemperaturen von Herbst bis zum Frühjahr oder bei kurzfristigem Mehrbedarf, z.B. durch viele Waschvorgänge, den der Pufferspeicher nicht ausgleichen kann. Durch ein gutes Teillastverhalten deckt der Gaskessel ein breites Leistungsspektrum ab. Bei Stillstand des BHKW, z.B. während der Wartung übernimmt der Gaskessel die Wärmebereitstellung.

Der Ölkessel wird lediglich bei Spitzenwärmebedarf in Betrieb genommen. Die Spitzenlast tritt bei geringen Außenlufttemperaturen im Winter auf. Daraus resultieren geringe Betriebszeiten und ein geringer Anteil an der Bedarfsdeckung.

6 Zusammenfassung

Der Vergleich der Varianten zur Wärmebereitstellung des Neubaus eines Bettenhauses für die Waldklinik in Jesteburg hat den Einsatz verschiedener Anlagen zur Wärmebereitstellung im Zusammenhang zur Gebäudeversorgung betrachtet. Die Auswahl der Varianten spiegelt das vielfältige Repertoire an Systemvariationen wieder. Außerdem ist der Einfluss des EEWärmeG auf die Dimensionierung der Anlagen deutlich geworden.

Bei der Erstellung der Varianten haben die Vorgaben des Gesetzes dazu geführt, dass die Leistung und der gedeckte Anteil des Wärmebedarfes erhöht werden. Anhand der CO₂-Einsparungen der regenerativen Anlagen und des BHKW ist der positive Einfluss des Gesetzes erkennbar. Der wirtschaftliche Vergleich hat herausgestellt, dass eine nachhaltige Wärmeversorgung zusätzlich die Betriebskosten verringert.

Der Vergleich auf ökologischer und ökonomischer Basis hat die jeweiligen Stärken und Schwächen der Systeme herausgestellt. Im Kontext des Neubauprojektes sind die Systeme bewertet worden. Aus dem Vergleich ist die Erkenntnis gewonnen worden, dass eine Modernisierung durch den überwiegenden Einsatz fossiler Energieträger im Bestandsbau die Betriebskosten senkt und im Rahmen der Baumaßnahme als sinnvoll anzusehen ist. Der Vergleich der Heizsysteme hat das BHKW als derzeit sinnvollste Investition herausgestellt. Der Gesamtwirkungsgrad eines BHKW liegt im Bereich von konventionellen Wärmeerzeugern. Dadurch, dass Strombezug jedoch teuer ist und der Strom überwiegend konventionell und somit nicht ökologisch generiert wird, verbessert die hohe Eigenstromproduktion die Bilanzen. Der Vergleich der Betriebskosten ergibt, dass sich die jährlichen Kosten des Bestandsbaus durch ein BHKW um etwa 28.000€ verringern lassen. Dadurch würde sich die gesamte Modernisierung nach etwa 11 Jahren amortisieren. Gleichzeitig die Versorgung des Neubaus sichergestellt. Aus dem ökologischen Vergleich lassen sich Einsparungen im Vergleich zum bestehenden System von 115 Tonnen CO₂ im Jahr ermitteln.

Aufgrund des Vergleichs der verschiedenen Energieerzeugungssysteme mit aussagekräftigen Ergebnissen, wird dem Bauherrn eine verständliche Grundlage zur Entscheidungsfindung bereitgestellt. Die Waldklinik Jesteburg GmbH wurde durch den Variantenvergleich bei der Entscheidung für die Investition in ein BHKW unterstützt.

Mit Blick auf die Entwicklung der vergangenen Jahre und den Erfahrungen aus dem Projekt des Neubaus des Bettenhauses wird der Zuwachs regenerativer Systeme zur Energieversorgung von Gebäuden kommen, aufgrund des Einflusses des EEWärmeG weitergehen. Durch die zunehmende Nachhaltigkeit in der Stromerzeugung werden Anlagen, wie die Wärmepumpe, verstärkt zum Einsatz kommen, die keine fossilen Energieträger benötigen. Zum Schutz der Umwelt ist diese Entwicklung wünschenswert.

Literaturverzeichnis

- [1] **Andresen, Jan, meineheizung:** Heizwert von Heizöl: Wie hoch ist der Heizwert von Heizöl? <http://www.meineheizung.de/heizen-mit-oel/heizwert-von-heizuel> (02.05.2018)
- [2] **BHKW-Infothek:** KWK-Index Q2/2017: Absturz ohne Turbulenzen. <https://www.bhkw-infothek.de/nachrichten/25142/2017-07-10-kwk-index-q22017-absturz-ohne-turbulenzen/> (02.05.2018)
- [3] **Brunnengräber, Bernhard / Loga, Tobias :** Jahresdauerlinien für Niedrigenergiesiedlungen. Gemessene Tageslinien als Grundlage für die Auslegung von Blockheizkraftwerken. http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/neh_ph/BHKW_Jahresdauerlinien.pdf (05.10.2017)
- [4] **Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz:** Energieeinsparverordnung 2007, Stand 18.11.2013
- [5] **Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz:** Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz 2008, Stand 20.10.2015
- [6] **Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz:** Erneuerbare-Energien-Gesetz 2014, Stand 13.10.2016
- [7] **Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz:** Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung, 2015
- [8] **Bundesministerium für Wirtschaft und Energie; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit:** Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchs-kennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand. Berlin, 2015
- [9] **Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V.:** Preisentwicklung bei Waldhackschnitzeln – der Energieholz-Index. <https://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/hackschnitzel> (02.05.2018)
- [10] **CreditPlus Bank AG:** https://kreditrechner.creditplus.de/form-cms/f001?hnr=409&pt=28&subid=+Kredit_sofort/b&kp=100000&lz=120 (02.05.2018)
- [11] **DIN-Normenausschuss Heiz- und Raumluftechnik:** DIN EN 12831-3-Entwurf: Trinkwassererwärmung, Heizlast und Bedarfsbestimmung, 2014
- [12] **Elektro Gerner:** Sole-Wasser-Wärmepumpen. <http://www.gerner-elektro.de/cms/images/stories/gerner/wp-schema.jpg> (02.05.2018)
- [13] **Energiekontor Hannover:** Wirtschaftlichkeitsberechnung. <http://energiekontor-hannover.de/planung/wirtschaftlicheitsrechnung.html> (02.05.2018)
- [14] **Envia Mitteldeutsche Energie AG:** BHKW: Funktionsweise. https://www.enviam.de/irj/go/km/docs/z_ep_em_unt_documents/unternehmensportal/Gesch%C

- [3%A4ftskunden/0.4_Content-Bilder/ENV-V1456E_RZ_Vollbild_BHKW_Funktionsweise_2000x1500px.jpg](#) (02.05.2018)
- [15] **Frischgesell, Heike Prof. Dr.-Ing.:** Vorlesungsskript Solare Energiebereitstellung: Nieder-temperatursysteme. Stand 08.10.2015
- [16] **Frischgesell, Heike Prof. Dr.-Ing.:** Vorlesungsskript Technische Thermodynamik: Kreisprozesse. Stand 18.09.2014
- [17] **Frahm, Thorben:** Solarthermie Preise für Anlagen zur Unterstützung der Heizung. <https://de.solarcontact.com/solarthermie/preise-kosten> (02.05.2018)
- [18] **fujitsu-general.com:** Spezifikationen AOYG45LBLA6. <http://fujitsu-general.com/de/products/multi/5-6rooms/aoyg45lbla6.html> (02.05.2018)
- [19] **Glen Dimplex Deutschland GmbH:** Projektierungshandbuch Solarthermie. Stand 01.2010
- [20] **Herminghaus, Harald:** CO2 einsparen mit Ökostrom. www.co2-emissionen-vergleichen.de/ (02.05.2018)
- [21] **Kaltschmitt, Martin; Huenges, Ernst; Wolff, Helmut:** Energie aus Erdwärme. Nachdruck 1.Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2009
- [22] **KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH:** CO2-Emissionsfaktoren. <http://www.kea-bw.de/service/emissionsfaktoren/> (02.05.2018)
- [23] **Mistral:** PH Chart R134a. <http://www.mistralassociates.com/ph/r134a-ph.gif> (02.05.2018)
- [24] **Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH:** Preisblatt zur Abrechnung der vermiedenen Netzentgelte https://www.mitnetz-strom.de/Media/docs/default-source/01_stromnetz_downloads/mns_preisblatt_vne.pdf?sfvrsn=ac14acf9_2 (02.05.2018)
- [25] **Netztransparenz:** EEG-Umlage 2017. <https://www.netztransparenz.de/EEG/EEG-Umlage/EEG-Umlage-2017> (02.05.2018)
- [26] **Nick GmbH Wärmepumpen & Elektrotechnik:** Erdwärmepumpe. <http://www.ffmpeg.de/files/erdwaermekollektoren.jpg> (02.05.2018)
- [27] **Normenausschuss Bauwesen im DIN Normenausschuss Heiz- und Raumluftechnik:** DIN V 18599 Beiblatt 1: Bedarfs-/Verbrauchsabgleich, 2010
- [28] **Normenausschuss Bauwesen im DIN Normenausschuss Heiz- und Raumluftechnik:** DIN V18599-5: Endenergiebedarf von Heizsystemen, 2011
- [29] **Normenausschuss Bauwesen im DIN Normenausschuss Heiz- und Raumluftechnik:** DIN V18599-9: End- und Primärenergiebedarf von Stromproduzierenden Anlagen, 2011
- [30] **photovoltaiksolarstrom.com:** Photovoltaik-Anschaffungskosten. <https://photovoltaiksolarstrom.com/photovoltaik-kosten/> (02.05.2018)
- [31] **Quaschnig, Volker:** Regenerative Energiesysteme: Technik – Berechnung – Simulation. 9., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2015
- [32] **Reichardt + Partner Architekten Partnergesellschaft mbH:** Lageplan (08.06.2017)

- [33] **Sailer GmbH:** Hochleistungs-Solar-Kollektor.
http://www.sailergmbh.de/uploads/pics/aufbau_solarkollektor_01.jpg (02.05.2018)
- [34] **Solarbayer GmbH:** Produktbeschreibung Vakuumröhrenkollektoren CPC Nero.
<https://www.solarbayer.de/vakuum-roehrenkollektor-cpc-nero.html> (02.05.2018)
- [35] **statista:** Durchschnittlicher Heizölpreis in den größten Städten Deutschland im Juli 2017.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/539514/umfrage/heizoelpreis-in-den-groessten-deutschen-staedten/> (02.05.2018)
- [36] **statista:** Gaspreise für Gewerbe- und Industriekunden in Deutschland.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/168528/umfrage/gaspreise-fuer-gewerbe--und-industriekunden-seit-2006/> (02.05.2018)
- [37] **statista:** Industriestrompreise in Deutschland.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/252029/umfrage/industriestrompreise-inkl-stromsteuer-in-deutschland/> (02.05.2018)
- [38] **statistisches Bundesamt:** Daten zur Energiepreisentwicklung: von Januar 2000 bis Juli 2017. 2017
- [39] **Stieglitz, Robert; Heinzel, Volker:** Thermische Solarenergie. Heidelberg: Springer Verlag, 2012
- [40] **Suttor, Wolfgang; BINE Informationsdienst:** Blockheizkraftwerke: Ein Leitfaden für den Anwender. 7. Auflage. Karlsruhe: Solarpraxis AG, 2009
- [41] **Team, Dr. Sonne; Oberzig, Klaus; BINE Informationsdienst:** Solare Wärme: Vom Kollektor zur Hausanlage. 2., vollständig überarbeitete Auflage. Karlsruhe: Solarpraxis AG, 2008
- [42] **Weischede, Markus; Energieeffizienzberatung:** www.energieberatung-mw.de/images/pictures/BHKW%20Schema.jpg (02.05.2018)
- [43] **Wesselak, Viktor; Voswinckel, Sebastian:** Photovoltaik: Wie Sonne zu Strom wird. 2. Auflage. Heidelberg: Springer Verlag, 2016
- [44] **Wissenszentrum-Energie:** Solarthermie. http://www.wissenszentrum-energie.de/site/Ludwigsburg-Wissenszentrum/get/params_E-1939615084/10839833/solarthermie.jpg (02.05.2016)

2.1 Wärmeerzeuger - Blockheizkraftwerk								
Deckungsgrad BHKW	%	0	0	55	0	0,0	26,7	0
Nutzenergie BHKW	kWh/a	0	0	291.500	0	0	640.000	0
Wirkungsgrad BHKW	%	55	55	55	55	55	55	55
Endenergie BHKW	kWh/a	0	0	530.000	0	0	1.163.636	0
Stromkennzahl BHKW	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Erzeugte el. Energie aus KWK	kWh/a	0	0	174.900	0	0	384.000	0
Anteil selbst genutzte el. Energie aus KWK		0	0	1	0	0	1	0
selbstgenutzte el. Energie aus KWK	kWh/a	0	0	174.900	0	0	384.000	0
2.2 Wärmeerzeuger - Wärmepumpe								
Deckungsgrad Wärmepumpe	%	0	55	0	0	26,7	0,0	0
Nutzenergie Wärmepumpe	kWh/a	0	291.500	0	0	640.000	0	0
Wirkungsgrad Wärmepumpe	JAZ	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
Endenergie Wärmepumpe	kWh/a	0	76.711	0	0	168.421	0	0
2.3 Wärmeerzeuger - Gas-Kessel								
Deckungsgrad Gas-Kessel	%	93,9	45,0	45,0	78,2	67,5	67,5	61,7
Nutzenergie Gas-Kessel	kWh/a	1.830.500	238.500	238.500	414.500	1.620.500	1.620.500	1.480.300
Wirkungsgrad Gas-Kessel	%	95	98	98	98	95	95	95
Endenergie Gas-Kessel	kWh/a	1.926.842	243.367	243.367	422.959	1.705.789	1.705.789	1.558.211
2.4 Wärmeerzeuger - Öl-Kessel								
Deckungsgrad Öl-Kessel	%	2,0	0,0	0,0	0,0	2,5	2,5	2,1
Nutzenergie Öl-Kessel	kWh/a	39.500	0	0	0	59.500	59.500	49.700
Wirkungsgrad Öl-Kessel	%	88	88	88	88	88	88	88
Endenergie Öl-Kessel	kWh/a	44.886	0	0	0	67.614	67.614	56.477
2.5 Wärmeerzeuger - Biomasse								
Deckungsgrad Biomasse	%	0	0	0	0	0	0	32,9
Nutzenergie Biomasse	kWh/a	0	0	0	0	0	0	790.000
Wirkungsgrad Biomasse	%	90	90	90	90	90	90	90
Endenergie Biomasse	kWh/a	0	0	0	0	0	0	877.778
2.6 Wärmeerzeuger - Solarthermie								
Deckungsgrad Solarthermie	%	4,1	0	0	21,8	3,3	3,3	3,3
Nutzenergie Solarthermie	kWh/a	80.000	0	0	115.500	80.000	80.000	80.000
Wirkungsgrad Solarthermie	NG	20	20	20	20	20	20	20
Endenergie Solarthermie	kWh/a	4.000	0	0	5.775	4.000	4.000	4.000
2.7 Kälteerzeuger								
Nutzenergie Kälte	kWh/a	79.000	26.000	26.000	26.000	105.000	105.000	105.000
Wirkungsgrad Kälteerzeugung	EER	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Endenergie Kälteerzeugung	kWh/a	22.571	7.429	7.429	7.429	30.000	30.000	30.000
2.8 kumulierter spez. Endenergiebedarf								
Gas	kWh/a*m²	118	54	173	95	82	138	75
Hackschnitzel	kWh/a*m²	0	0	0	0	0	0	42
Heizöl	kWh/a*m²	3	0	0	0	3	3	3
Strom	kWh/a*m²	56	73	55	57	64	56	56
Summe	kWh/a*m²	177	127	228	151	150	197	176
3. Betriebskosten								
3.1 Energiepreise								
Energiepreis Gas	ct/kWh				4,50			
Preissteigerung Gas	%/a				0,82			
Energiepreis Heizöl	ct/kWh				6,41			
Preissteigerung Heizöl	%/a				-1,44			
Energiepreis Strom	ct/kWh				17,20			
Preissteigerung Strom	%/a				4,58			
Energiepreis Hackschnitzel	ct/kWh				3,17			
Preissteigerung Hackschnitzel	%/a				2,20			
3.2 Energiekosten								
Energiekosten BHKW	€/a	0	0	23.850	0	0	52.364	0
Energiekosten Wärmepumpe	€/a	0	13.194	0	0	28.968	0	0
Energiekosten Gas-Kessel	€/a	86.708	10.952	10.952	19.033	76.761	76.761	70.119
Energiekosten Öl-Kessel	€/a	2.876	0	0	0	4.333	4.333	3.619
Energiekosten Biomasse	€/a	0	0	0	0	0	0	27.826
Energiekosten Solarthermie	€/a	688	0	0	993	688	688	688
Energiekosten Kälteerzeugung	€/a	3.882	1.278	1.278	1.278	5.160	5.160	5.160
Energiekosten Strom	€/a	151.360	41.280	41.280	41.280	194.360	194.360	194.360

Summe Energiekosten	€/a	245.500	66.700	77.400	62.600	310.300	333.700	301.800
3.3 Eigenstromerzeugung								
KWK-Bonus für 30.000h	ct/kWh_el				4,00			
KWK-Bonus	€/a	0	0	0	0	0	-54.212	0
Erlös aus Überschusseinspeisung je kWh el.	ct/kWh_el				2,98			
Erlös aus Überschusseinspeisung	€/a	0	0	0	0	0	0	0
Vermiedene Netzentgelte	ct/kWh_el				0,41			
Vermiedene Netzentgelte	€/a	0	-262,4	-717,09	0	-262,4	-1574,4	0
EEG Umlage	ct/kWh_el				6,88			
anteilige EEG Umlagebelastung	%				0,40			
EEG Umlage für Eigenstromnutzung	€/a	0	176	481	0	176	1.057	0
Vermiedene Stromkosten aus KWK	€/a	0	0	-30.083	0	0	-66.048	0
Erzeugte el. Energie aus PV	kWh_el/a	0	64.000	0	0	64.000	0	0
Vermiedene Stromkosten aus PV	€/a	0	-11.008	0	0	-11.008	0	0
Summe Eigenstromerzeugung	€/a	0	-11.100	-30.300	0	-11.100	-66.600	0
3.4 Wartungskosten								
spezifische Wartungskosten BHKW	ct/kWh	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Wartungskosten BHKW	€/a	0	0	5.800	0	0	12.800	0
Wartungskosten Wärmepumpe	€/a	0	600	0	0	1.200	0	0
Wartungskosten Gas-Kessel	€/a	6.800	1.800	1.800	1.800	6.800	6.800	6.800
Wartungskosten Biomassekessel	€/a	0	0	0	0	0	0	3.500
Wartungskosten Solarthermie	€/a	1.500	0	0	2.200	1.500	1.500	1.500
Wartungskosten Kleinkälte	€/a	300	300	300	300	300	300	300
Betreiberkosten (Personal) 1,5% Invest	€/a	2.600	3.600	2.300	4.900	4.200	3.100	1.600
Summe Wartungskosten	€/a	11.200	8.050	10.200	9.200	14.000	24.500	13.700
Summe Betriebskosten	€/a	256.700	63.650	57.300	71.800	313.200	291.600	315.500
Betriebskosten je m² netto	€/m²*a	15,75	14,24	12,82	16,06	15,08	14,04	15,19
Differenzkosten zu Variante 0	€/a	0,00	-1,51	-2,93	0,31	-0,67	-1,71	-0,56
Betriebskosten je m² brutto	€/m²*a	18,74	16,94	15,25	19,11	17,94	16,71	18,08
4. Kapitalkosten								
4.1 Investition								
BHKW inkl. Abgasführung	€	0	0	84.000	0	0	156.000	0
Wärmepumpe	€	0	22.000	0	0	40.000	0	0
Sondenfeld inkl. Trasse	€	0	53.000	0	0	96.000	0	0
Gas-Kessel inkl. Abgasführung	€	0	30.000	30.000	30.000	0	0	0
Biomasse-Kessel inkl. Abgasführung	€	0	0	0	0	0	0	50.000
Biomasselager inkl. Austragung	€	0	0	0	0	0	0	225.000
Solarkollektor-Feld	€	0	0	0	220.000	0	0	0
spez. Heizraumeinrichtungen	€	0	17.000	25.000	63.000	21.000	36.000	18.000
Kleinkälte	€	0	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
Photovoltaik-Feld	€	0	110.000	0	0	110.000	0	0
Summe Investition	€, netto	0	247.000	154.000	328.000	282.000	207.000	108.000
4.2 Kapitalkosten								
Zinssatz	%				4%			
Laufzeit	a				20			
Annuität	-				0,073582			
jährliche Belastung (Zins+Tilgung)	€/a	0	18.175	11.332	24.135	20.750	15.231	7.947
5. Wirtschaftlichkeit								
Betrachtungszeitraum/Laufzeit	a				20			
Energiekosten inkl. Preissteigerung über Laufzeit	€, netto	9.337.714	2.115.165	1.789.127	2.380.446	11.379.491	10.155.887	11.478.107
Betriebskosten (Energie+Wartung) über Laufzeit	€, netto	9.561.714	2.274.165	1.993.127	2.564.446	11.659.491	10.561.676	11.752.107
Zins + Tilgung über Laufzeit	€, netto	0	363.494	226.632	482.696	415.001	304.628	158.937
Gesamtkosten über Betrachtungszeitraum	€, netto	9.561.714	2.639.659	2.219.759	3.047.143	12.074.492	10.896.304	11.911.044
Gesamtkosten je m²	€, netto/m²	587	591	497	682	581	525	573

Gesamtkosten Liegenschaft über 20 Jahre	€, netto	9.561.714	12.201.373	11.781.473	12.608.857	12.074.492	10.896.304	11.911.044
Gesamtkosten Liegenschaft je m ²	€, netto/m ²	587	587	567	607	581	525	573
Rang			5	2	6	4	1	3

A.2 Ökologischer Variantenvergleich

Tabelle A.2: ökologischer Variantenvergleich

Variantenbezeichnung		Variante 0	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	Variante 6
		Bestandsbau Gaskessel + Ölkessel	Neubau Geothermie + Gaskessel + Photovoltaik	Neubau BHKW + Gaskessel	Neubau Solarthermie + Gaskessel	Modernisierung Geothermie + Photovoltaik	Modernisierung BHKW	Modernisierung Biomasse
1. Nutzenergiebedarf								
Nutzenergiebedarf Wärme inkl. WWB	kWh/a	1.950.000	530.000	530.000	530.000	2.400.000	2.400.000	2.400.000
Nutzenergiebedarf Kälte	kWh/a	79.000	26.000	26.000	26.000	105.000	105.000	105.000
Strombedarf	kWh/a	880.000	240.000	240.000	240.000	1.130.000	1.130.000	1.130.000
Bruttogrundfläche	m ²	16.300	4.470	4.470	4.470	20.770	20.770	20.770
2. Endenergiebedarf								
2.1 Wärmeerzeuger - Blockheizkraftwerk								
Nutzenergie BHKW	kWh/a	0	0	291.500	0	0	640.000	0
Wirkungsgrad BHKW	%	55	55	55	55	55	55	55
Endenergie BHKW	kWh/a	0	0	530.000	0	0	1.163.636	0
Stromkennzahl BHKW	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Erzeugte el. Energie aus KWK	kWh/a	0	0	174.900	0	0	384.000	0
2.2 Wärmeerzeuger - Wärmepumpe								
Nutzenergie Wärmepumpe	kWh/a	0	291.500	0	0	640.000	0	0
Wirkungsgrad Wärmepumpe	JAZ	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
Endenergie Wärmepumpe	kWh/a	0	76.711	0	0	168.421	0	0
2.3 Wärmeerzeuger- Gas-Kessel								
Nutzenergie Gas-Kessel	kWh/a	1.830.500	238.500	238.500	414.500	1.620.500	1.620.500	1.480.300
Wirkungsgrad Gas-Kessel	%	95	98	98	98	95	95	95
Endenergie Gas-Kessel	kWh/a	1.926.842	243.367	243.367	422.959	1.705.789	1.705.789	1.558.211
2.4 Wärmeerzeuger- Öl-Kessel								
Nutzenergie Öl-Kessel	kWh/a	39.500	0	0	0	59.500	59.500	49.700
Wirkungsgrad Öl-Kessel	%	88	88	88	88	88	88	88
Endenergie Öl-Kessel	kWh/a	44.886	0	0	0	67.614	67.614	56.477
2.5 Wärmeerzeuger- Biomasse								
Nutzenergie Biomasse	kWh/a	0	0	0	0	0	0	790.000
Wirkungsgrad Biomasse	%	90	90	90	90	90	90	90
Endenergie Biomasse	kWh/a	0	0	0	0	0	0	877.778
2.6 Wärmeerzeuger - Solarthermie								
Nutzenergie Solarthermie	kWh/a	80.000	0	0	115.500	80.000	80.000	80.000
Wirkungsgrad Solarthermie	NG	20	20	20	20	20	20	20
Endenergie Solarthermie	kWh/a	4.000	0	0	5.775	4.000	4.000	4.000
2.7 Kälteerzeuger								
Nutzenergie Kälte	kWh/a	79.000	26.000	26.000	26.000	105.000	105.000	105.000
Wirkungsgrad Kälteerzeugung	EER	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Endenergie Kälteerzeugung	kWh/a	22.571	7.429	7.429	7.429	30.000	30.000	30.000
2.8 Photovoltaik								
Erzeugte el. Energie aus PV	kWh _{el} /a	0	64.000	0	0	64.000	0	0
2.9 kumulierter Bedarf								
Brennwert/Heizwert Erdgas	-				1,11			
Brennwert/Heizwert Heizöl	-				1,06			
Brennwert/Heizwert Hackschnitzel	-				1,08			
Erdgas	kWh/a	1.735.894	219.250	696.727	381.044	1.536.747	2.585.068	1.403.793
Heizöl	kWh/a	42.346	0	0	0	63.786	63.786	53.280
Hackschnitzel	kWh/a	0	0	0	0	0	0	812.757
Strom	kWh/a	906.571	260.139	72.529	253.204	1.268.421	780.000	1.164.000
3. CO₂-Emissionen								

spez. CO ₂ -Emissionen Erdgas	kg/kWh*a	0,250						
spez. CO ₂ -Emissionen Heizöl	kg/kWh*a	0,319						
spez. CO ₂ -Emissionen Hackschnitzel	kg/kWh*a	0,024						
spez. CO ₂ -Emissionen Strommix	kg/kWh*a	0,565						
spez. CO ₂ -Emissionen Ökostrom	kg/kWh*a	0,040						
CO ₂ Emission Erdgas	t/a	434,0	54,8	174,2	95,3	384,2	646,3	350,9
CO ₂ Emission Öl	t/a	13,5	0,0	0,0	0,0	20,3	20,3	17,0
CO ₂ Emission Biomasse	t/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,5
CO ₂ Emission Strommix	t/a	512,2	147,0	41,0	143,1	716,7	440,7	657,7
CO ₂ Emission Ökostrom	t/a	36,3	10,4	2,9	10,1	50,7	31,2	46,6
CO ₂ Emission kumuliert	t/a	959,7	201,8	215,2	238,3	1.121,2	1.107,3	1.045,1
CO ₂ Emission kumuliert (Öko)	t/a	483,7	65,2	177,1	105,4	455,3	697,8	434,0
CO ₂ Emission Liegenschaft kumuliert	t/a	1.222,9	1.161,5	1.174,9	1.198,0	1.121,2	1.107,3	1.045,1
CO ₂ Emission Liegenschaft kumuliert (Öko)	t/a	616,4	549,0	660,8	589,1	455,3	697,8	434,0
CO ₂ Emission je m ²	kg/m ² *a	58,9	55,9	56,6	57,7	54,0	53,3	50,3
CO ₂ Emission je m ² (Öko)	kg/m ² *a	29,7	26,4	31,8	28,4	21,9	33,6	20,9
Rang		7	4	5	6	3	2	1

A.3 BHKW

Tabelle A.3: Daten BHKW [39]

thermischer Wirkungsgrad	55 %
Gesamtwirkungsgrad	90 %
Stromkennzahl	0,6
spezifische Wartungskosten	2 ct/kWh _{th}
spezifische Investitionskosten	1.200 €/kW _{el}
Inbetriebnahmekosten	12.000 €
spezifische Personalkosten	1,5 % _{inv}

A.4 Solarthermie

Tabelle A.4: Daten Solarthermie

Nutzungsgrad	20 [27]
relative Einstrahlung bei Westausrichtung und 22° Neigung	70 % [38]
spezifischer Ertrag	600 kWh/m ² *a [40]
spezifische Leistung	0,7 kW/m ² [38]
spezifische Wartungskosten	1 % _{inv} [40]
spezifische Investitionskosten	800 €/m ² [17]

A.5 Photovoltaik

Tabelle A.5: Daten Photovoltaik

spezifische Leistung	0,135 kW _p /m ² [28]
spezifischer Ertrag	950 kWh/kW _p [42]
spezifische Wartungskosten	1,5 % _{inv} [42]
spezifische Investitionskosten	1600 €/kW _p [30]

A.6 Splitkälte

Tabelle A.6: Daten Splitkälte [18]

SEER Splitkälte	3,5
-----------------	-----

A.7 Energiepreise

Tabelle A.7: Energiepreise

Energieträger	Energiepreis [ct/kWh]	Preisentwicklung [%] [38]
Erdgas	4,50 [36]	0,82
Heizöl	6,41 [35] [1]	-1,44
Hackschnitzel	3,17 [9]	2,20
Strom	17,20 [37]	4,58

A.8 Eigenstromproduktion

Tabelle A.8: Daten Eigenstromproduktion

KWK-Bonus für 30.000h	4 ct/kWh _{el} [7]
Einspeisevergütung	2,98 ct/kWh _{el} [2]
Vermiedene Netzentgelte	0,4 ct/kWh _{el} [24]
EEG-Umlage	6,88 ct/kWh _{el} [25]
anteilige EEG-Umlagebelastung	0,4 [5]

A.9 Zinssatz

Tabelle A.9: Zinssatz [10]

Zinssatz	4,00 %
----------	--------

Eidesstattliche Versicherung

Name:

Vorname:

Matrikel-Nr.:

Studiengang:

Hiermit versichere ich, .< Vorname, Name >., an Eides statt, dass ich die vorliegende < Bachelor- oder Masterarbeit > mit dem Titel < Titel der Abschlussarbeit > selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinne nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und prüfungsrechtlichen Folgen (§ 26 Abs. 2 Bachelor-SPO bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO der Hochschule der Medien Stuttgart) sowie die strafrechtlichen Folgen (siehe unten) einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

Auszug aus dem Strafgesetzbuch (StGB)

§ 156 StGB Falsche Versicherung an Eides Statt

Wer von einer zur Abnahme einer Versicherung an Eides Statt zuständigen Behörde eine solche Versicherung falsch abgibt oder unter Berufung auf eine solche Versicherung falsch aussagt, wird mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

Ort, Datum

Unterschrift