

Machbarkeitsstudie
Nahwärmenetz Ibbenbüren

Auftraggeber: Stadt Ibbenbüren

 Herr Uwe Manteuffel

 Roncalli Straße

 49477 Ibbenbüren

Projektleiter: Dipl.-Ing. Tobias Peselmann

Osnabrück, 22.01.2019

22.01.2019/ Machbarkeitsstudie Wärmegutschein Ibbenbü-
ren/ND/CO

pbr. NETZ_{energie}

Seite 1 von 78

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Motivation	3
1.2	Innovationen	6
2	Räumliche Abgrenzung	8
3	Ziel	9
4	Bestandsaufnahme.....	10
4.1	Situationsbeschreibung des Bedarfs.....	10
4.2	Temperaturniveau.....	12
5	Wärmequellen	13
5.1	Solarthermie	13
5.2	Biomasse.....	16
5.3	BHKW.....	26
5.4	Holzvergaser	27
5.5	Spitzenlastkessel.....	27
5.6	Zusammenstellung der Potentiale der einzelnen Wärmequellen	28
6	Wärmespeicher	29
7	Auslegung	34
7.1	Herstellung des Biomassebrennstoffes.....	34
7.2	Versorgungsszenarien	55
8	Stromnutzung	69
9	Wirtschaftlichkeit.....	70
10	Fazit	74
11	Literaturverzeichnis.....	77

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Grundlage der funktionalen Gesellschaft von heute und in Zukunft ist die Bereitstellung der Grundversorgung, darunter versteht sich unter anderem die Versorgung mit elektrischer Energie und Wärme. Doch in Zeiten des drohenden Klimawandels sowie des weltweit steigenden Energiekonsums müssen sich die Versorgungsstruktur und der Rohstoffeinsatz nachhaltig verändern. Die Reduzierung von Treibhausgasen, die Einsparung von Primärenergie und der rationelle Umgang mit Ressourcen spielen dabei eine maßgebliche Rolle, denn die wirtschaftliche Entwicklung der Kommunen ist eng mit einer sicheren und nachhaltigen Energie- und Rohstoffversorgung verbunden. Nicht nur für Unternehmen spielt die Entscheidung sich in Städten und Kommunen anzusiedeln, die eine versorgungssichere und zukunftsorientierte Energieversorgung vorweisen können, eine große Rolle. Ebenso ist für die strukturelle Bevölkerungsentwicklung, z. B. in Form des Zuwachses durch junge Familien, die Versorgungssicherheit von enormer Bedeutung. Die Energievorräte schwinden und in absehbarer Zukunft werden die fossilen Energieressourcen weltweit verbraucht sein. Eine Folge dessen ist, dass die Energiekosten immer weiter steigen. Berechnungen zur Folge reichen die vorhandenen globalen Ölreserven unserer Areale voraussichtlich nur noch 62 Jahre, wobei zu beachten gilt, dass sich 71 % von diesen in unsicheren Regionen auf der Welt befinden. Dies sind Gebiete, in denen Kriege herrschen oder Umweltkatastrophen den Abbau der Ressourcen erschweren. Ebenso grundlegend ist Gas als fossiler Brennstoff – auch hier sind die Reserven begrenzt und die Abhängigkeiten hoch. Nach heutigen Erkenntnissen rechnet man damit, dass die Reserven noch für etwa 64 Jahre ausreichen. Davon liegen wiederum 69 % in unsicheren Regionen. Dies fordert ein Umdenken in den Versorgungsansätzen und dem Nachhaltigkeitsgedanken.

Erneuerbare Energien wie Wind- und Wasserkraft, Solarenergie oder auch Biomasse resultieren direkt oder indirekt aus der solaren Strahlung der Sonne. Diese werden uns auch in Zukunft als sicherer regionaler und günstiger Energielieferant zur Verfügung stehen. In Folge der Ressourcenknappheit und den immer weiter steigenden Energiepreisen, sind Unternehmen

und Kommunen gezwungen, die Gewichtung ihrer Energieversorgung immer mehr in Richtung erneuerbarer Energien zu steuern.

Neben der sicheren Wärme- und Energieversorgung stehen die Kommunen vor weiteren Herausforderungen, die sich bei der Bewirtschaftung der Grünflächen und Verwertung der Grünabfälle ergeben. Mit der Nutzung von städtischen Infrastrukturabfällen wie Grün- und Heckenchnitt als Energieträger besteht die Möglichkeit ursprüngliche Abfallstoffe effizient zu verwerten und Kosten für eine teure Entsorgung zu sparen. Die Nutzung des Materials als Brennstoff kann endliche und teure Primärenergieträger, wie Erdgas und Heizöl, annähernd CO₂ neutral und ressourcenschonend ersetzen.

Auf Grund des in der Stadt Ibbenbüren ansässigen Steinkohleabbaus, erfolgt ein Großteil der thermischen Energieerzeugung in der Region auf Basis von Steinkohle. Auch der Strombedarf wird zu einem großen Teil durch das örtliche Steinkohlekraftwerk gedeckt.

Da die Versorgung mit der vor Ort abgebauten Kohle auf Grund der Schließung des Bergwerks ab 2019 nicht mehr gesichert ist und Kohle zudem einen hohen CO₂-Austoß von ca. 0,35 kg CO₂/kWh verursacht, ist eine Umstellung der derzeitigen Versorgungssituation dringend notwendig.

Aus diesen Gründen hat sich die Stadt Ibbenbüren dazu entschieden, Möglichkeiten der Biomassenutzung in öffentlichen Einrichtungen zu überprüfen. In dieser Studie wird die Installation eines Nahwärmenetzes betrachtet, das aus verschiedenen Wärmequellen gespeist wird.

Für die Eigentümer, der in das Nahwärmenetz mit einbezogenen Privathäusern, bietet das Projekt gleich mehrere Vorteile. Durch die Einstellung der Kohleförderung steigt der Kohlepreis auf Weltmarktniveau, wovon besonders die Bezieher der sogenannten Deputatkohle bzw. der Energiebeihilfe betroffen sind. Als Teil des Lohns bzw. der Rente bezogen Angestellte und Ehemalige der RAG in Ibbenbüren bisher Kohle oder alternativ eine finanzielle Energiebeihilfe. Diese wird jedoch mit Beendigung des Bergbaus voraussichtlich mit einer Einmalzahlung beendet.

Der Anschluss an das Nahwärmenetz bietet somit nicht nur die Möglichkeit einer kostengünstigen und sicheren Wärmeversorgung, sondern bietet auch den Vorteil geringer Anschlussgebühren im Vergleich zu den anfallenden Investitionskosten bei Umstellung der Hauswärmeanlage auf einen anderen Energieträger, wie z.B. Gas.

1.2 Innovationen

Die thermische Grundversorgung soll zum Teil durch die Verwertung der städtischen Grünabfälle gedeckt werden. Um das gesammelte Material thermisch verwerten zu können muss es jedoch erst getrocknet, aufbereitet und brikettiert werden. Dieser Prozess sowie die benötigte Anlagentechnik sind im Kapitel 7.1 beschrieben.

Um die, für die Niedertemperaturtrocknung des Materials, erforderliche thermische Energie bereitzustellen wird die Nutzung von Wärmepumpen, Solarthermie und eines BHKWs in Betracht gezogen. Die erforderliche Stromversorgung kann durch PV-Module oder ein BHKW erfolgen. Beide Konzepte werden nachfolgend eingehender betrachtet (vgl. Kapitel 5).

Die thermische Verwertung von Infrastrukturabfällen wurde bisher nur in wenigen Pilotanlagen umgesetzt. Einzelkomponenten des Verfahrens kommen bereits in anderen Bereichen zum Einsatz und haben sich dort bereits bewährt. Der Betrieb der Anlage wird weitere relevante Erkenntnisse zum Bau und vor allem zum Betrieb derartiger Systeme bringen. Vor allem die Aufbereitung und der erzielbare Heizwert des Laubs bedürfen weiterer Erforschung, da diese stark von der Beschaffenheit des gesammelten Materials abhängt. Bei der Sammlung des Laubs im städtischen Gebiet geraten sowohl Sand und Steine als auch Abfälle in das Material, welche anschließend herausgesiebt werden müssen. Auch der Feuchtigkeitsgehalt des Materials ist von grundlegender Bedeutung für das Verfahren, insbesondere für den Trocknungsprozess.

Zur Ergänzung der Versorgung sind solarthermische Anlagen auf den Gebäudedächern sowie Wärmespeicher in den Gebäuden vorgesehen. Durch den Anschluss der Speicher, sowohl an die solarthermischen Anlagen als auch an das Nahwärmenetz, können diese als Puffer fungieren und überschüssige solare Wärme, die nicht in dem jeweiligen Gebäude genutzt wird, an das Nahwärmenetz abgeben.

Vorgesehen ist ein Speicher pro Gebäude, der ausreichend dimensioniert sein muss, um die erzeugte Solarthermie vorrangig zu speichern und bei Bedarf in das Wärmenetz abzugeben.

Um nicht nur die Tag-/Nacht- sondern auch saisonale Schwankungen auszugleichen und einen möglichst hohen Anteil erneuerbarer Energien zu integrieren, wird der Einsatz eines saisonalen Warmwasserspeichers mit in die Betrachtungen einbezogen.

Um auch die benötigten Spitzenlasten bereitzustellen ist im Rahmen der Machbarkeitsstudie zu evaluieren ob gegebenenfalls zusätzlich ein BHKW benötigt wird. Eine Alternative zu Erdgas bietet zudem der Einsatz von KUP (Kurzumtriebsplantagen) oder Miscanthus. Platz für den Anbau ist auf den ehemaligen Abraumhalden des Bergbaubetriebes gegeben.

Neben der Auswahl einer geeigneten Kombination ist, zur Erarbeitung des optimalen Energiekonzeptes, jedoch zunächst eine möglichst exakte Bestimmung des Energiebedarfs erforderlich. Auf Basis dieser Daten können dann die Energieerzeuger dimensioniert und auf den verfügbaren Platz an den einzelnen Standorten abgestimmt werden.

2 Räumliche Abgrenzung

Zur effizienten thermischen Versorgung sollen in der Stadt Ibbenbüren die öffentlichen Gebäude „Johannes-Kepler-Gymnasium, „Gesamtschule Ibbenbüren“ das Rathausgebäude 2 und die bischöfliche Schule „Roncalli-Realschule“ durch ein Nahwärmenetz miteinander verbunden werden. Die zwischen den beiden Schulen liegenden Wohngebäude sollen zur Steigerung der Effizienz ebenfalls an das Netz angeschlossen werden. Hierbei handelt es sich einerseits um die Wohngebäude der Baugenossenschaft Ibbenbüren E.G. und andererseits um private Häuser. Der Bereich der anzubindenden Wohngebäude ist in der Abbildung 1 grün gekennzeichnet.

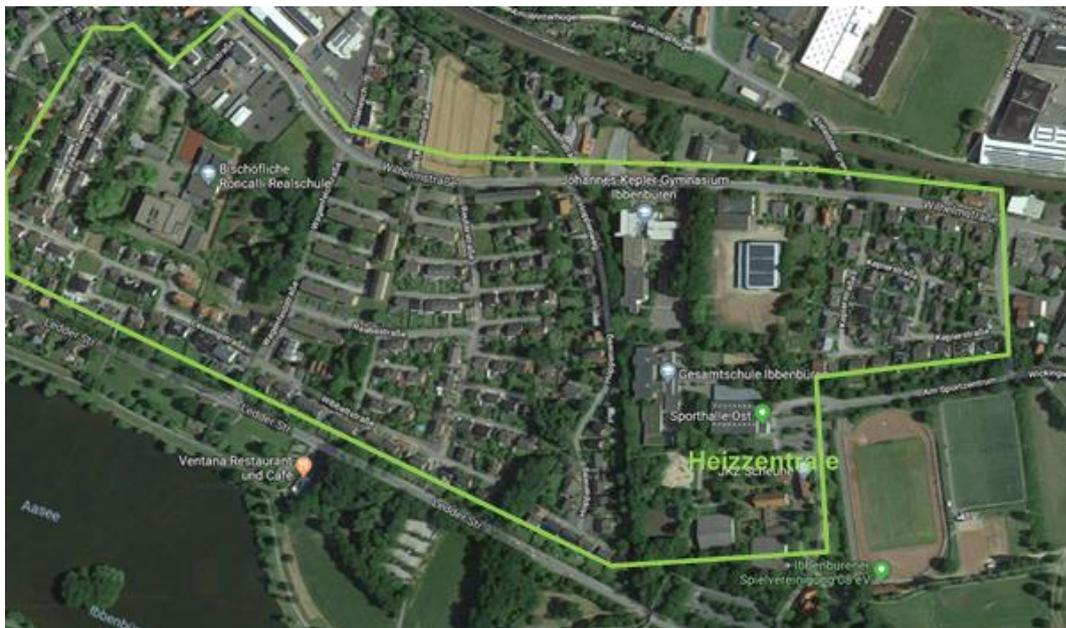


Abbildung 1: Lage des Nahwärmenetzes und der einzubindenden Gebäude [1]

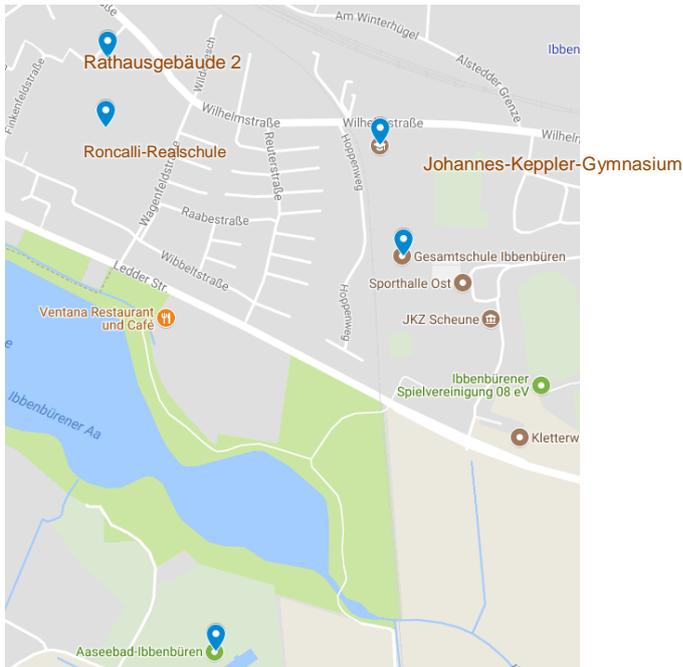


Abbildung 2: Karte des Gebietes mit den vier großen Wärmeabnehmern [1]

3 Ziel

Im Rahmen dieser Studie sollen Lösungsansätze erarbeitet werden, für ein ganzheitliches Energiekonzept zur regenerativen Wärmeversorgung des betrachteten Quartiers. Basierend auf einer Zusammenstellung der Wärmebedarfe, werden die potentiellen regionalen Ressourcen zur Wärmeerzeugung und das Potential zur Solarthermie Nutzung analysiert. Aufgrund des innovativen Charakters der Biomassenutzung, wird die Prozess- und Anlagentechnik zur Verwertung der Infrastrukturabfälle umfangreich erläutert.

Durch die genauere Betrachtung der verschiedenen Möglichkeiten der Wärmeversorgung soll ein Energiekonzept ausgearbeitet werden, das nicht nur wirtschaftlich, sondern auch umweltfreundlich und versorgungssicher ist. Dabei müssen die Anlagenkomponenten bedarfsgerecht ausgelegt und die Betriebsweise im Zusammenspiel mit einem Saisonspeicher ermittelt werden. Daraus resultiert eine technische, ökologische, sowie ökonomische Bewertbarkeit des Gesamtkonzeptes.

4 Bestandsaufnahme

4.1 Situationsbeschreibung des Bedarfs

Die derzeitige thermische Versorgung der betrachteten Gebäude beruht größtenteils auf Kohle und Gas. Bisher gibt es keine zentrale Versorgung, alle Gebäude werden durch ein eigenes Heizsystem versorgt.

Die Daten zu den thermischen Verbräuchen der öffentlichen Gebäude stammen aus zwei verschiedenen Informationsquellen. Die Verbrauchsdaten der öffentlichen Gebäude wurden von der Stadt Ibbenbüren zur Verfügung gestellt, die restlichen Werte wurden rechnerisch mit Hilfe von GIS ermittelt. Hierbei dienten als Berechnungsgrundlage die Grundflächen, Baujahre und die Leistungen der Heizkessel, bzw. die Baujahrtypischen Verbräuche je Quadratmeter und Jahr. In der nachfolgenden Tabelle 1 ist der elektrische und thermische Bedarf der Gebäude sowie der bisher jeweils eingesetzte Energieträger aufgelistet.

Tabelle 1: Verbrauchsdaten und Energieträger der Gebäude

Gebäude	Thermischer Verbrauch [MWh]	Elektrischer Verbrauch [MWh]	Energieträger
Gesamtschule/Sporthalle Ost	702	150	Kohle
Kepler-Gymnasium	1.171	286	Erdgas
Kita Klitzeklein	18	keine Angabe	Erdgas
Rathausgebäude 2	196	14	Erdgas
Roncalli-Realschule	500	keine Angabe	Erdgas
Wohngebäude	10.830	546	25 % Erdgas, 75 % Kohle
Aaseebad	3.600	870	Kohle

Im Rahmen dieser Studie werden mehrere Versorgungsszenarien betrachtet bei denen verschiedene Kombinationen an Verbrauchergruppen in das Wärmenetz integriert. Die Bedarfsdeckung bezieht sich dabei auf die Monatlichen Bedarfswerte für die jeweiligen Monate über das Jahr gesehen. Abbildung 3 zeigt die Summe der Monatlichen Wärmeabnahme der drei einzelnen Verbrauchergruppen. Die Werte des Aaseebades basieren auf Realwerten aus dem Jahren 2011 und 2012. Die Werte für die anderen beiden Positionen wurden für eine saisonbedingte Standardverteilung hochgerechnet.

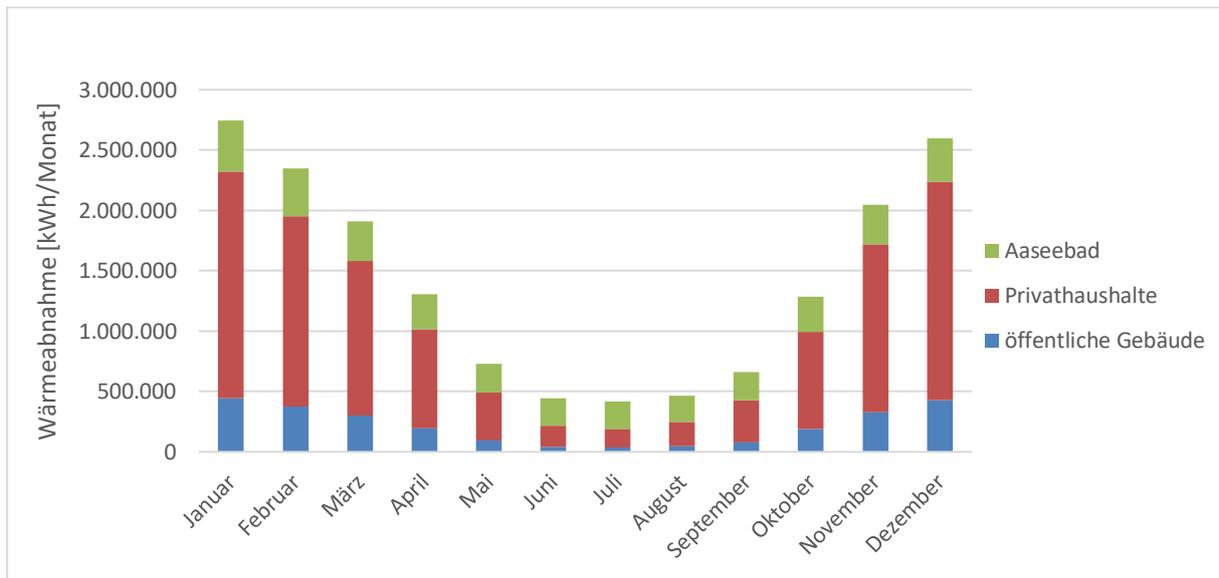


Abbildung 3: Monatliche Verteilung der Wärmeabnahme der Hauptverbrauchergruppen des Quartiers

Da das energetische Gesamtkonzept, welches in den folgenden Kapiteln näher beschrieben wird den Einsatz von Biomasse vorsieht, muss neben Wärmeversorgung der Gebäude auch thermische und elektrische Energie für eine Trocknungsanlage von ca. 1.460 MWh/a bereitgestellt werden.

4.2 Temperaturniveau

Die Versorgung mit Warmwasser und Heizwasser geschieht in dem betrachteten Quartier derzeit überwiegend mittels Kohlekessel. Kohlekessel haben in der Regel eine maximale Vorlauf-temperatur von 90°C und eine minimale Rücklauf-temperatur von 60°C. Weiterhin sind die meisten Gebäude im betrachteten Quartier mit einem internen Heizungssystem ausgestattet, dass eine Niedertemperaturbeheizung unwahrscheinlich erscheinen lässt. Ein weiterer Wärmeabnehmer, der ein Temperaturniveau wasserseitig von 80°C benötigt, ist der Niedertemperaturtrockner zur Aufbereitung der Biomasse. Daher wird ein Nahwärmenetz mit einem Temperaturniveau von ca. 80 °C im Vorlauf und 60 °C im Rücklauf angestrebt. Dieser Umstand ist für einen sinnhaften Einsatz einer Wärmepumpe nur schwer darzustellen. Dies ist in den Kapiteln 7.1.2.5.1 und folgende dargestellt.

5 Wärmequellen

5.1 Solarthermie

Das Nutzen der thermischen Energie aus der natürlichen Solarstrahlung bietet den Vorteil, dass außer zur Herstellung der Anlagen keine direkten CO₂-Emissionen entstehen. Jedoch ist die Verfügbarkeit der thermischen Energie nicht kontrollierbar, wie es bei thermischen Verbrennungsanlagen der Fall ist. Nachdem im Folgenden zwei mögliche Technologien zur thermischen Nutzung von Solarstrahlung vorgestellt werden, wird das thermische Potential für das Siedlungsgebiet analysiert.

5.1.1 Kollektoren

Grundsätzlich gibt es zwei gängige Anlagentypen zur Nutzung von Solarstrahlung, die im Gebäudebereich für die Heizungsunterstützung eingesetzt werden: Flachkollektoren und Röhrenkollektoren.

Flachkollektoren bestehen aus einem Kollektorgehäuse mit transparenter Abdeckung und einem Absorber [2]. Der maximale jährliche Wärmeertrag liegt zwischen 300 und 550 kWh/m² Kollektorfläche. Übliche Kosten liegen zwischen 120 € und 450 € pro m² wobei der spezifische Preis mit steigender Fläche sinkt. Die Peak-Leistung beträgt ca. 500 W/m² Kollektorfläche. Die Temperaturen im Wärmeträgermedium beträgt bis zu 100 °C. [3]

Im Gegensatz zu Flachkollektoren befindet sich der Absorber in einem evakuierten Glasrohr, wodurch der Wirkungsgrad bzw. die jährliche Wärmeleistung auf ca. 500 kWh/m² und eine Peak-Leistung von 600 W/m² erhöht ist. Gleichzeitig sind Vakuumröhrenkollektoren jedoch auch deutlich teurer als Flachkollektoren. Bei kleinen Anlagen (<100 m²) liegen die Preise derzeit bei ca. 500 bis 900 €/m². Bei Anlagen über 100 m² sind jedoch Preise von bis zu 300 €/m² möglich. Röhrenkollektoren können je nach solarer Einstrahlungsstärke Temperaturen bis zu 250 °C liefern [3]. Flachkollektoren sind durch den Preisvorteil und einem Temperaturniveau von bis zu 100°C, welches für die Heizwärmeversorgung ausreichen ist für den großflächigen Einsatz besser geeignet als Röhrenkollektoren. Aus diesem Grund wird in der Studie der Flachkollektor als Anlage zur solaren Wärmegewinnung untersucht.

5.1.2 Zur Verfügung stehende Energiemengen

Das Solarkataster des Kreises Steinfurth bietet eine Datenbasis für die nutzbaren Dachflächen und die möglichen thermischen Jahreserträge des betrachteten Siedlungsgebietes. Die Dachfläche jedes einzelnen Gebäudes ist in diesem Kataster hinterlegt und durch die Berechnung der Sonneneinstrahlung in drei Eignungskategorien zur Nutzung des Solarpotentials eingeordnet worden. Eine vierte Kategorie beinhaltet die Dachflächen, die zur Solaren Nutzung nicht geeignet sind (vgl. Abbildung 4 und Tabelle 2).



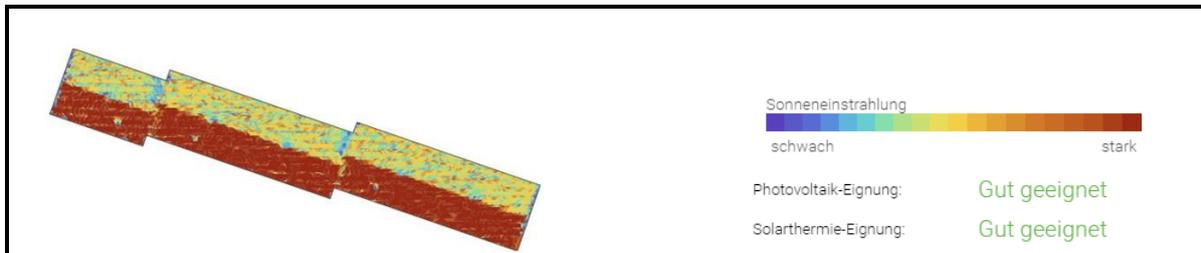


Abbildung 4: Datengrundlage zur Berechnung des Solarpotentials

Tabelle 2: Aufteilung des Solarpotenzials

	Fläche [m ²]	Jahresertrag [GWh]
Gut geeigneten Flächen:	8.700	3.700
Geeignete Flächen:	8.200	2.900
Bedingt geeigneten Flächen:	4.200	1.200

Für Solarthermie stehen, auf den Wohnhäusern und den öffentlichen Gebäuden, ca. 8.700 m² Fläche zur Verfügung, die gut geeignet zur Nutzung von Solarthermie sind. Weitere 8.200 m² sind geeignet und 4.200 m² sind bedingt geeignet. Insgesamt lässt sich ein Jahresertrag von 7.500 MWh installieren. Dies entspricht 56 % des gesamten Wärmebedarfs. Der Wärmebedarf des Siedlungsgebietes (vgl. Kap. 4.1) und das Solarpotential können durch Literaturwerte zur prozentualen Jahresverteilung in Jahreskennlinien umgerechnet werden. Der resultierende Verlauf des Solarpotenzials und des Wärmebedarfs ist in Abbildung 5 gegenübergestellt.

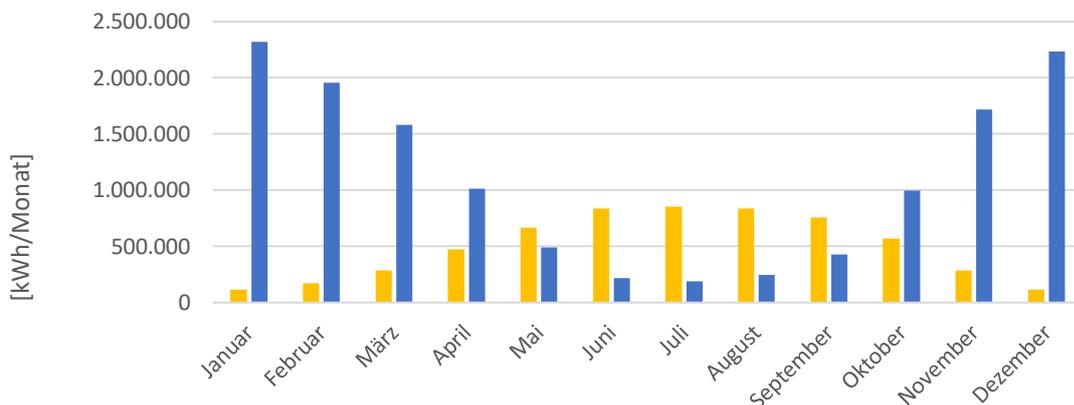


Abbildung 5: Wärmebedarf und Solarpotenzial des Quartiers im Jahresverlauf

An dieser Stelle wird bereits deutlich, dass der größte Bedarf an Heizenergie zeitlich mit dem geringsten Ertrag der solarthermischen Anlagen zusammenfällt. Dies gilt nicht nur für die saisonale Gegenläufigkeit von Solarertrag und Wärmebedarf im Winter und Sommer, sondern auch für die Überbrückung der Nacht während der Grundsätzlich kein Solarertrag generiert werden kann. Durch die Nutzung des Nahwärmenetzes als Puffer und eine zusätzliche Installation von dezentralen Pufferspeichern können Zeitskalen von Stunden bis Tagen überbrückt werden. In den Wintermonaten muss die Versorgungssicherheit jedoch durch weitere Wärmequellen, die in den folgenden Kapiteln beschrieben werden, und den Einsatz eines Saisonspeichers hergestellt werden.

5.2 Biomasse

Im Folgenden werden die Möglichkeiten der regionalen Beschaffung von nachwachsenden Rohstoffen zur thermischen Verwertung ermittelt. Dabei wird zum einen betrachtet, wie die entstehenden Freiflächen durch die Stilllegung der Zeche Ibbenbüren zum Anbau von thermisch verwertbaren Pflanzen genutzt werden kann. Zum anderen wird das energetische Potential und die praktische Anwendungsmöglichkeit der vorhandenen Biomassequellen aus den städtischen Infrastrukturabfällen Laub und Grünschnitt ermittelt.

5.2.1 KUP und Miscanthus

Für eine möglichst hohe regionale Brennstoffautarkie zur energetischen Versorgung des Quartiers, wird auf die stadteigenen Ressourcen zurückgegriffen. Dies ist für die Energieversorgung des Quartiers in diesem Fall nicht ausreichend. In dem Zuge, dass sich eine Vielzahl von Kommunen innerhalb der von ihnen gesetzten Klimaschutzpläne sich auf die eigene, regionale Energieversorgung konzentrieren, ist die Deckung von fehlender Biomasse über diese Versorgungswege für die Stadt Ibbenbüren als unwahrscheinlich zu betrachten. Hinzu kommt der Umstand, dass Waldbauern für höhere Verkaufserlöse ihre Wälder nach FSC zertifizieren lassen. Dieser Umstand führt dazu, dass das Niederderholz und der Kronenschnitt, aus dem sonst Hackschnitzel produziert werden, im Wald verbleiben müssen. Daher werden die zur Verfügung stehende Haldenfläche der beiden Halden am Forstweg und an der Hopstener Straße als Anbaugesamt für Kurzumtriebsplantagen betrachtet. Die hierfür zur Verfügung stehende Fläche beträgt für beide Flächen zusammen etwa 94 ha [1]. Bei Kurzumtriebsplantagen (KUP) werden schnell wachsende Gehölze wie z.B. Pappeln oder Weiden über mindestens 3 Jahre angebaut bis sie geerntet und zu Holzhackschnitzeln verarbeitet werden. Der Ertrag ist von der Baumart abhängig und variiert je nach Quelle sehr stark. Für Pappeln beträgt der Ertrag an Trockensubstanz zwischen 6 und 18 t/ha*a, bei Weiden werden hingegen nur 4 bis 18 t/a*ha erreicht [4]. Berücksichtigt werden muss, dass bei der Erzeugung, durch Ernte und Zerkleinerung, zunächst Energie aufgewendet werden muss. Das Holz muss vor der Verwertung auf 70 % TM getrocknet werden. Bei der Ernte beträgt der TM Gehalt 45 % [5]. Die Ernte erfolgt mit Feldhäckslern, Anbaumhäckern oder Harvestern. Da mit zunehmendem Alter die Stämme dicker werden erschwert eine längere Wachstumsphase die Ernte. Nach [4] liegt der Energieertrag von KUP bei der ermittelten Fläche bei ca. 4.800 MWh/a.

Eine Alternative bietet der Anbau von Miscanthus. Miscanthus ist ein Süßgras, das bis zu 4 m hoch wird und jährlich geerntet wird. Der Ertrag liegt zwischen 15 und 25 t Trockenmaterial pro Hektar und der Heizwert bei 4,4 kWh/kg. Damit ergibt sich ein jährliches Potential zwischen 5.700 und 10.300 MWh/a. [6] [5] [4]. Zur thermischen Verwertung werden nur die Stängel genutzt, die Blätter können anderweitig verwertet werden.

Miscanthus ergibt somit einen höheren Energieertrag pro Hektar und ist zudem einfacher zu ernten, da Maishäcksler ausreichen und keine besondere Technik erforderlich ist. Der Preis für Miscanthus-Häcksel liegt beim Eigenverbrauch bei ca. 2,43 Cent/kWh [7].

Die Nutzung der Halden in Hinblick auf der Anpflanzung für schnell wachsenden Energiehölzern ist im Zuge der Kohlekonversion noch nicht abschließend geklärt. Aus diesem Grund wird stets eine alternative Versorgung in den Versorgungsszenarien mit betrachtet.

Für die Landwirte ist der Anbau von KUP oder Miscanthus auch wegen des „Greenings“ interessant. Betriebe mit mehr als 15 ha Ackerfläche sind dazu verpflichtet 5 % ihrer Ackerfläche als ökologische Vorrangfläche (ÖVF) vorzuhalten [7]. Neben der Stilllegung der Fläche (Brache) sind verschiedene Nutzungsmöglichkeiten vorgesehen, die ihrem ökologischen Wert entsprechend mit einem Faktor versehen sind (Brache = Faktor 1) [7]. Die Nutzung der Fläche als Kurzumtriebsplantage wird mit einem Faktor von 0,5 bewertet, der Anbau von Miscanthus hingegen mit 0,7 [7].

5.2.2 Laub und Grünschnitt

Mit der Brikettierung von Laub und der Verwendung von weiteren städtischen Infrastrukturabfällen, wie Grün- und Heckenschnitt, besteht die Möglichkeit ursprüngliche Abfallstoffe effizient zu verwerten und Kosten für eine teure Entsorgung zu sparen. Die thermische Verwertung, kann endliche und teure Primärenergieträger, wie Erdgas und Heizöl, annähernd CO₂-neutral und ressourcenschonend ersetzen.

Auf Grund der durch die Trocknung erreichten biologischen Stabilität, sind der Grünschnitt und die Laubbriketts theoretisch unbegrenzt lagerfähig. Wie Hackschnitzel oder Pellets, kann das Material für die Bereitstellung von Heizwärme in Gebäuden oder auch für Prozesswärme genutzt werden.

5.2.2.1 Laubbriketts

Das für die Briketts verwendete Laub stammt überwiegend aus kommunalen Grünflächen. Zusätzlich kann auch das Laub verwendet werden, welches aus Privathaushalten an den öffentlichen Grünabfallplätzen gesammelt wird.



Abbildung 6: Getrocknetes Laub in loser und brikettierter Form

Tabelle 3: Eigenschaften von Laub als Energieträger

Eigenschaft	Wert
Anfangsfeuchte (Fa):	ca. 50 – 70 %
Endfeuchte (Fe):	ca. 12 %
Schüttdichte (lose) (rS):	100 - 150 kg/m ³
Schüttdichte (Brikett) (rB):	650 kg/m ³
Heizwert (Brikett) (rB):	ca. 4,2 – 4,8 kWh/kg
Aschegehalt (rB):	ca. 8 - 12%

5.2.2.2 Grünschnitt

Als Infrastrukturabfälle (Grünschnitt) werden frisch geschnittene, wenig oder nicht verholzte Pflanzenreste bezeichnet, wie sie vielfach als Abfall beim Mähen oder beim Schnitt in der Garten-, Landschafts-, Straßenrand- und Waldpflege anfallen. Die Spanne der Pflanzen reicht von Gräsern und Kräutern über Grünsträucher bis hin zu Grünholz wie Astwerk mit einem hohen Anteil an Blättern (Laub) und saftführender Rinde (z.B. Waldrestholz oder Durchforschungsabfall).

Der Grünschnitt stammt überwiegend aus kommunalen Grünflächen. Zusätzlich wird auch der Grünschnitt verwendet, welcher aus Privathaushalten an den öffentlichen Grünabfallplätzen gesammelt wird. Nach der Trocknung ist das Material unter Umständen bereits als Energieträger einsatzfähig. Teile des Materials mit kleinerer Korngröße sind in den Anlagen nur schwer förderfähig und besitzen nachteilige Verbrennungseigenschaften. Diese sind deshalb vor der thermischen Verwertung zu brikettieren.

Die Verpressung kann ebenfalls in der Brikettiermaschine, welche für die Laubbriketts verwendet wird, durchgeführt werden. Nach der Brikettierung haben die zylindrischen Briketts einen Durchmesser von 65 mm. Die Höhe variiert je nach Anwendungsfall, wobei sie üblicherweise zwischen 30 – 70 mm beträgt.



Abbildung 7: Haufen von Grün- und Heckenschnitt

In der folgenden Tabelle 4 sind die Grundeigenschaften des Energieträgers aufgeführt.

Tabelle 4: Eigenschaften von Grünschnitt als Energieträger

Eigenschaft	Wert
Anfangsfeuchte (Fa):	ca. 65 - 80%
Endfeuchte (Fe):	ca. 12 %
Schüttdichte (lose) (rS):	200 - 300 kg/m ³
Schüttdichte (Brikett) (rB):	675 kg/m ³
Heizwert (Brikett) (rB):	ca. 3,2 – 4,7 kWh/kg
Aschegehalt (rB):	7 – 10 %

Auffällig ist der deutlich schwankende Heizwert der Briketts. Dieser ist abhängig vom Wassergehalt im Brikett und vom Material. Auf Grund der verschiedenen Herkunftsmöglichkeiten des Grünschnitts kann hier innerhalb der Schwankungsbreite keine genauere Aussage getroffen werden.

5.2.2.3 Anfall der Mengen

Das Laub und der Grünschnitt fallen zu unterschiedlichen Zeiträumen an. So fällt Laub, naturgemäß, im Spätherbst an. Grünschnitt steht das ganze Jahr über zur Verfügung. Die genauen Mengen werden dazu nicht dokumentiert und können nur aus Erfahrung und Vergleichsstudien [8] abgeschätzt werden.

Der Anfall der gegebenen Mengen von 500 t Laub und 1.500 t Grünschnitt ist in der folgenden Abbildung 8 grafisch dargestellt und der möglichen Produktionsleistung gegenübergestellt.

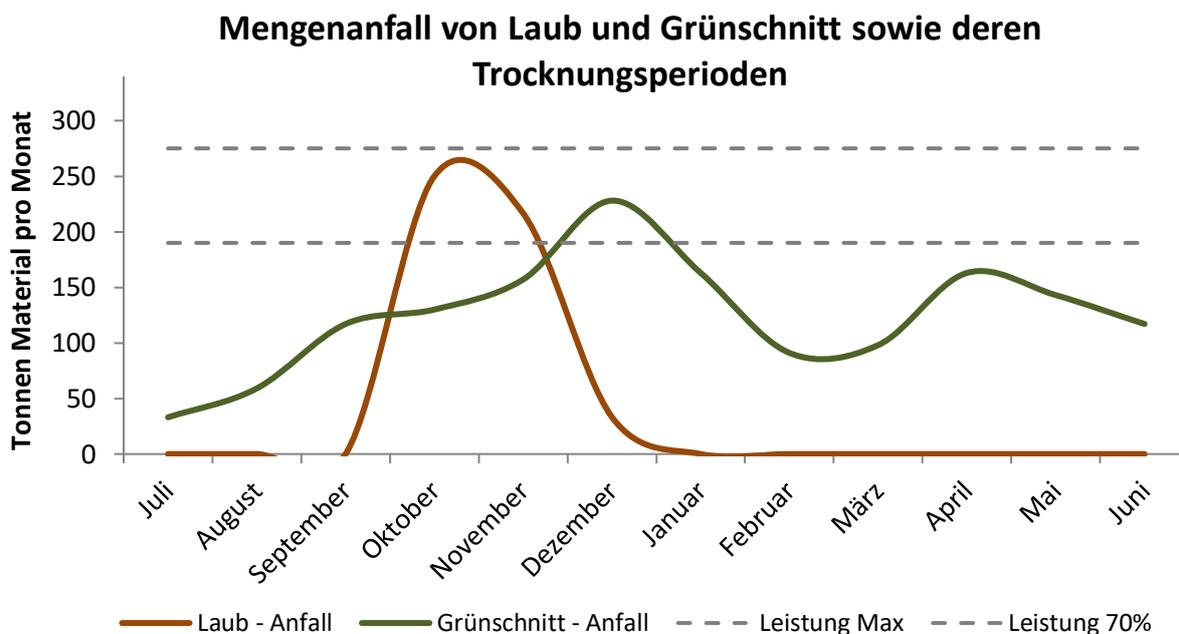


Abbildung 8: Zeitlicher Anfall von Laub und Grünschnitt

Das Laub (brauner Graph) fällt im Oktober und November, sowie Restmengen im Dezember an. Diese Mengen sind natürlicherweise an die Umgebungsbedingungen gebunden und können hier Verschiebungen unterliegen. Grünschnitt (grüner Graph) steht das gesamte Jahr in unterschiedlichen Mengen zur Verfügung.

Die weiteren grauen Geraden geben die monatliche Trocknungsleistung an, wie viel Material pro Monat verarbeitet werden kann. Die obere Gerade bei 300 t pro Monat würde eine 100% - ige Auslastung über 24 Stunden pro Tag im gesamten Monat bedeuten. Die 70% - Trocknungsleistung beschreibt den Betrieb des Trockners an 16 Stunden pro Tag über den gesamten Monatszeitraum.

Für die Berechnung der benötigten Lagerfläche für das frische Material, besonders in den Monaten Oktober bis Dezember, ist das von wesentlicher Bedeutung. Zusätzlich müssen Lagerflächen für die fertigen Produkte berücksichtigt werden.

5.2.2.4 Lagerung des Frischmaterials

In Abbildung 9 wurde der zeitliche Verlauf des Anfalls des Materials gezeigt. Die monatliche Trocknungsleistung ist begrenzt, so dass frisches Material zwischengelagert werden muss. Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf des Materialanfalls (Laub und Grünschnitt zusammengefasst), sowie die mögliche monatliche Trocknung.

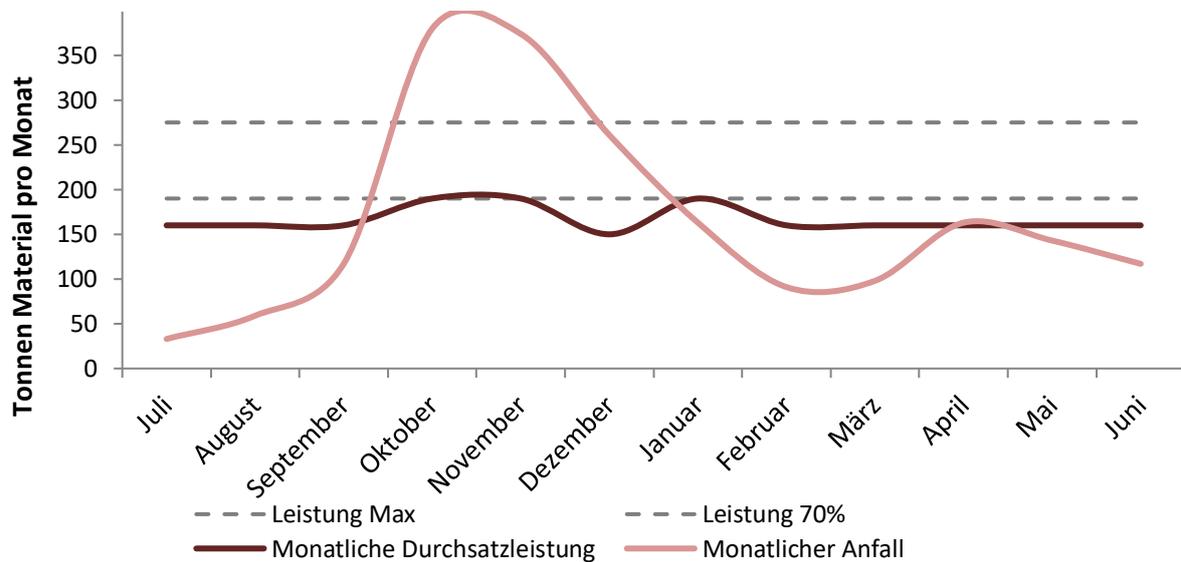


Abbildung 9: Verlauf monatlichen Materialanfalls und der Trocknungsleistung pro Monat

Die Grafik zeigt, dass Material zum Ende des Herbstes und zu Beginn des Winters gelagert werden muss. Es handelt sich hier um ca. 450 t frisches Material, welches kurzfristig gelagert werden muss. Das entspricht einem Volumen von ungefähr 1.500 m³ Material. Dies kann durch Optimierung der Logistik, sowie die Nutzung der derzeitigen Lagerflächen (Kompostierung) als Zwischenlager deutlich reduziert werden. Auch zeigt die Grafik, dass die Trocknungsanlage in dieser Darstellung meist nur mit 60-70% der monatlichen Höchstmenge betrieben wird. Es besteht also die Möglichkeit Lagerbestände und Brikettproduktion, zum Beispiel durch automatisierten Wochenendbetrieb, an die Gegebenheiten anzupassen.

Zur Lagerung des Materials kann der neben der Heizzentrale liegende Platz genutzt werden (Abbildung 10). Die grün gekennzeichnete Fläche beträgt ca. 6.840 m² wird jedoch derzeit als

Fußballplatz genutzt. Die daneben liegende Fläche von ca. 1.360 m² ist derzeit ungenutzt und steht zur Verfügung.



Abbildung 10: Zur Verfügung stehende Lagerfläche

Zur längeren Lagerung des Frischmaterials, wird das Laub mit der aus der Landwirtschaftlichen Praxis bewährten Technik siliert. Dabei wird das Laubmaterial in, mit einer Kunststoffolie luftdicht umschlossene, Ballen gepresst. Dadurch wird erreicht, dass das Material nicht verfault. Zum anderen verringert sich das Volumen und es müssen keine Lagerhallen gebaut werden, da die Ballen auf einer Freifläche gestapelt werden können. Durch ein geeignetes Fahrzeug mit Greifvorrichtung können Laubportionen als Ballen effektiv vom Lager zu den weiterverarbeitenden Anlagen transportiert werden. Bei einer 2 m hohen Stapelung der Ballen werden etwa 750 m² zur Lagerung der Infrastrukturabfälle benötigt (Abbildung 11).



Abbildung 11: benötigte Lagerfläche

5.2.2.5 Zur Verfügung stehende Energiemengen

Es stehen für die energetische Verwertung 1.500 t Grünschnitt und 500 t Laub in Ibbenbüren zur Verfügung. Diese Mengen können für den Produktionsprozess verwendet werden. Die folgende Tabelle zeigt die zur Verfügung stehenden Energiemengen.

Tabelle 5: Zur Verfügung stehende Mengen Laub und Gehölzschnitt

Material	Mengen frisches Material	getrocknetes Material	Energiemengen getrocknetes Material
Gehölzschnitt	1.500 t	767 t	2.990.000 kWh
Laub	500 t	227 t	950.000 kWh
Gesamt	2.000 t	994 t	3.940.000 kWh

Nach der Brikettierung des Materials stehen fast 4.000 MWh zur Verfügung, was nach Berücksichtigung des Kesselnutzungsgrad einer thermischen Energiemenge von etwa 3.600 MWh_{th} entspricht.

Zur Trocknung des Materials müssen ca. 1.460 MWh_{th} bereitgestellt werden. Das Material wird von der Eingangsfeuchte des frischen Materials von 50 - 60 % auf 12 - 18 % Ausgangsfeuchte getrocknet.¹ Für die Verwendung des Materials und die Möglichkeiten der Wärmebereitstellung für die Trocknung und dem Wärmeabnehmer gibt es verschiedene Szenarien, welche im späteren Verlauf näher erläutert werden (siehe Kapitel 7.1.2.5)

5.3 BHKW

Eine vollständige Deckung des Wärmebedarfs aus der thermischen Verwertung der Infrastrukturabfälle, des Miscanthus und der Solarthermie ist nicht möglich. Zur Bereitstellung der restlichen Wärme sowie zur Erhöhung der Versorgungssicherheit wird mit einem Energiemix geplant. Hierbei wird der Einsatz von BHKWs in der Heizzentrale vorgesehen. Die Brennstoffversorgung der BHKWs kann sowohl mit Erdgas als auch mit eingespeistem Biogas erfolgen. Zu der Versorgung der BHKWs mit dem so genannten Grüngas, gibt es zwei Varianten, über die der Brennstoff bezogen werden kann. Eine Variante beruht darauf, das Grüngas von einem Gashändler bezogen wird. Die andere Variante besteht darin den regional angesiedelten Biogasanlagen auch nach Beendigung der EEG Vergütung eine wirtschaftliche Basis bieten zu können. Die hohe Biogasanlagendichte im Münsterland und deren fehlenden Wärmekonzepte wird dazu führen, dass ein Großteil der Biogasanlagen nach Auslauf des EEG's den Betrieb einstellen müssen. Das liegt darin begründet, dass die Politik keine Post-EEG angedacht hat bzw. momentan zur Verfügung stellt. Hier besteht der regionale Ansatz diese Biogasanlagen auf eine Gaseinspeisungsanlage, um zu stellen. Durch die Nutzung dieser Ressourcen ergibt sich eine Möglichkeit die BHKWs aus regionalen regenerativen Energiequellen mit Brennstoff zu versorgen. Diese Option würde auch das regenerativ ausgerichtete energetische Gesamtkonzept unterstützen.

¹ Bei den Werten handelt es sich um konservative Annahmen. Als Energiegehalt für die Laubbriketts wird von 4,2 kWh/kg und für Grünschnitt 3,9 kWh/kg ausgegangen. Weiterhin ist eine Endfeuchte von 12 % bewusst niedrig ausgewählt, notwendig sind ca. 15 %

5.4 Holzvergaser

Alternativ zu einem erdgas- oder biogasbetriebenen BHKW kann ein Holzvergaser mit nachgeschaltetem BHKW eingesetzt werden. Dieser ermöglicht die Nutzung von biogenen Brennstoffen wie Holz oder Miscanthus bei gleichzeitiger Kraft-Wärme-Kopplung.

Bei dem Einsatz eines Holzvergasers, wird der Brennstoff zunächst bei 700 °C bis 800 °C vergast. Anschließend wird die Pyrolysekohle in die Reduktion weitergeleitet und das Gas einem Oxidationsprozess unterzogen bei dem die enthaltenen Kohlenwasserstoffmoleküle bei 1000 °C bis 1100 °C aufgespalten werden. Durch diesen Zwischenschritt wird verhindert, dass Teerverbindungen in das Produktgas gelangen, die den Verbrennungsmotor verschmutzen würden.

Nachteil der Holzvergaser Technologie ist jedoch der benötigte geringe Wasseranteil des Brennstoffs. Während luftgetrocknete Holzhackschnitzel einen Wassergehalt von ca. 25 % aufweisen und der marktübliche Wert 20 % entspricht, benötigt der Vergaser einen wesentlich geringeren Anteil von 12 %. Beim Einkauf der Holzhackschnitzel ist somit die Güteklasse M10 zu wählen. Um KUP und Miscanthus im Holzvergaser verwerten zu können ist eine vorherige Trocknung und Absiebung erforderlich.

5.5 Spitzenlastkessel

Zur Deckung der Lastspitzen und als Redundanz sind Gaskessel vorgesehen. Auf Grund ihrer hohen Flexibilität und der, im Verhältnis zu den Brennstoffkosten, geringen Investitionskosten sind sie sehr gut geeignet, um die nur selten im Jahr auftretenden hohen Lastspitzen abzudecken.

5.6 Zusammenstellung der Potentiale der einzelnen Wärmequellen

Um zu entscheiden, welche Energieerzeuger in welchem Maße zum Einsatz kommen sollen, müssen zunächst einmal die jeweiligen Potentiale betrachtet werden

Tabelle 6: Potentiale der Wärmeerzeuger

Wärmeerzeuger	Potential [MWh/a]
Solarthermie // PV (Dachflächen Wohngebäude, öffentliche Ge- bäude)	7.500 // Auf den Flächen die nicht für Solarther- mie genutzt werden
Laub und Grünschnitt	3.600
Trocknung	1.460
Miscanthus	4.400
KUP	1.400 – 2.200
Holz	Begrenzt bei Beschränkung auf regionale Er- träge
Gas	unbegrenzt

6 Wärmespeicher

Um einen höheren solaren Deckungsgrad zu erzielen, d.h. mittags erzeugte Solarwärme auch am Abend bis Morgen nutzen zu können ist es erforderlich die Anlagen mit einem Pufferspeicher auszustatten. Je größer dieser Speicher ist, desto höher ist der solare Deckungsgrad und desto geringer die, durch Verbrennung, zu erzeugende Wärmemenge.

Speicher können sowohl dezentral, in jedem Gebäude, als auch zentral angelegt werden. Vorteil eines zentralen Speichers sind die geringeren Speicherverluste, die jedoch durch die längeren Transportwege zum Teil revidiert werden. Dezentrale Speicher bieten hingegen den Vorteil, dass sich keine Platzprobleme ergeben. Bisher werden die Gebäude durch Zentralheizungen versorgt, die durch den Nahwärmeanschluss obsolet werden. Der freiwerdende Platz steht somit für die Speicher zur Verfügung.

Trinkwasserspeicher werden in der Regel so ausgelegt, dass sie das 1,5 bis 2-fache des Tagesverbrauchs fassen. Für ein Einfamilienhaus mit 4 bis 6 Personen ergibt sich somit ein Trinkwasserspeichervolumen von 300 bis 500 l. Übliche Auslegungswerte für Warmwasserspeicher zur Heizungsunterstützung mit Solarthermie liegen bei ca. 50 l/m² Kollektorfläche. [2]

Um Wärme saisonal, über mehrere Monate speichern zu können eignen sich dezentrale Hauswärmespeicher, auf Grund der hohen Verluste, nicht. Ideal ist somit eine Kombination aus dezentralen, kleinen Speichern zum Ausgleich der Tag-/Nachtschwankungen mit einem zentralen Großspeicher, der Schwankungen über Tage bis Monate ausgleicht.

Durch die Speicher erhöht sich jedoch nicht nur der Anteil der nutzbaren Solarthermie, sondern bietet daneben weitere Vorteile.

1. BHKWs und Biomasseheizungsanlagen erreichen höhere Volllaststunden, da sie dauerhaft mit Volllast betrieben werden können.
2. Schwankungen im Bedarf werden durch die Energievorhaltung im Speicher ausgeglichen.

3. Alle Wärmeerzeuger können kleiner dimensioniert werden, da Lastspitzen durch den Speicher abgesenkt werden. Die Maximalleistung der, mit Brennstoff betriebenen, Wärmeerzeuger ist folglich geringer.
4. Speicherung der saisonal erzeugten Energie, die im späteren Jahresverlauf erst genutzt wird.

Die Speicherpriorität erfolgt in der Reihenfolge:

1. Hausspeicher
2. Wärmenetz
3. Saisonal Speicher

d.h. dass die überschüssige Wärme aus den solarthermischen Anlagen zunächst in den dezentralen Warmwasserspeichern zwischengespeichert werden. Erst wenn diese keine Wärme mehr aufnehmen können wird die Wärme in das Netz abgegeben, dass ebenfalls als Pufferspeicher dient. Erst wenn auch das Nahwärmenetz seine Kapazitätsgrenze erreicht hat, wird der saisonale Speicher beladen.

Zur Speicherung wird auf Grund der geringen Kosten und der relativ hohen spezifischen Wärmekapazität ($4,2 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ bzw. $1,17 \text{ Wh/kg}\cdot\text{K}$ bei 2 bar und $0 - 100 \text{ }^\circ\text{C}$) Wasser genutzt. Dies bietet außerdem den Vorteil die Wärme direkt durch einen Stoffaustausch anstatt über einen Wärmetauscher zwischen den Speichern, dem Netz und den Wärmeerzeugern auszutauschen. Somit entstehen geringere Investitionskosten und, auf Grund der geringeren Wärmeverluste, geringere Betriebskosten [2].

Für den saisonalen Großspeicher ist, um die grundwasserführenden Schichten nicht zu beeinflussen, ein Behälter- oder Erdbeckenspeicher einem Aquifer- oder SONDENSPEICHER vorzuziehen. Vorteil des Tank-Speichers ist die feste obere Abdeckung. Somit ist es möglich den Platz auch anderweitig zu nutzen z.B. zur Lagerung der Infrastrukturabfälle.

Auf Grund der Siedetemperatur des Wassers sind drucklose Speicher nur bis zu Temperaturen von $95 \text{ }^\circ\text{C}$ erwärmbar. Durch die Erhöhung des Drucks im Tank sind Speichertemperaturen bis zu $120 \text{ }^\circ\text{C}$ möglich. Höhere Speichertemperaturen führen jedoch, auf Grund der höheren

Temperaturdifferenz, auch zu höheren Speicherverlusten. Im Ausspeicherbetrieb wird das Netz gleichzeitig durch die Feuerungsanlagen und die gespeicherte Wärme versorgt. Aus diesem Grund sind keine hohen Speichertemperaturen und somit keine Drucktanks erforderlich. Falls die Speichertemperatur bereits unter die benötigte gesunken ist, so kann dies durch eine höhere Vorlauftemperatur der Feuerungsanlagen ausgeglichen werden.

Die Ausspeicherleistung hängt von der Temperatur und dem Volumenstrom ab. Auf Grund der Speicherverluste sinkt die Temperatur zum Ende der Speicherperiode. Da der Volumenstrom jedoch nur durch die Pumpen begrenzt ist, kann die Leistung an den Bedarf angepasst werden.

Die Beladung erfolgt durch ein Schichtbeladesystem, das das einzuspeichernde warme Wasser an der Stelle zugehörigen Temperaturniveaus einspeist. Auf Grund der geringeren Dichte sammelt sich das warme Wasser oben, sodass dort die Zusp eisung erfolgt. Das kalte Wasser sammelt sich am Boden des Tanks, sodass der Speicher von oben nach unten beladen wird. Zum Ausspeichern wird wiederum das wärmste Wasser, aus der obersten Schicht, entnommen.

Eine Baugrunduntersuchung ist erforderlich, um sicher zu gehen, dass der Baugrund stabil ist und bis zu einer Tiefe von 5 m kein Grundwasser führt.

Die im Sommer eingespeicherte Solarwärme ist bereits nach wenigen Monaten aufgebraucht, weshalb der Speicher im Winter und Frühling dazu genutzt werden kann Lastspitzen auszugleichen. Gleichzeitig können die Feuerungsanlagen geringer dimensioniert und somit die Volllaststunden erhöht werden. Durch den saisonalen Speicher erhöht sich folglich die Wirtschaftlichkeit der Feuerungsanlagen und der solarthermischen Anlage.

Um das gesamte Solarpotential nutzen zu können wäre ein saisonaler Speicher mit einem Volumen von ca. 73.500 m³ (2.600 MWh) erforderlich. In den nachfolgenden Abbildung 12 ist die zur Verfügung stehende Fläche dargestellt (1.540 m² insgesamt). Diese kann jedoch nicht vollständig für den saisonalen Speicher genutzt werden, da auch das Laub und der Grünschnitt hier gelagert werden müssen. Blau dargestellt ist der mögliche Umfang eines Tankspeichers.



Abbildung 12: benötigte Lagerfläche [1]

Speicher in dieser Größenordnung wurden bisher nur vereinzelt gebaut. Die Strömungsverhältnisse und die daraus resultierenden technischen Eigenschaften sind für jeden Speicher individuell und deshalb nicht abschätzbar. Die Kosten können nur an Hand bereits umgesetzter Projekte abgeschätzt werden.

Um einen hohen solaren Deckungsgrad zu erreichen gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Ein großer saisonaler Speicher, der den gesamten solaren Überschuss im Sommer einspeichern kann
2. Ein kleinerer saisonaler Speicher und eine „überdimensionierte“ solarthermische Anlage, deren überschüssige Wärme im Sommer nicht genutzt werden kann

In der nachfolgenden Abbildung 13 ist der Verlauf der spezifischen Kosten (€ pro genutzter kWh) aufgezeichnet, in Abhängigkeit der Speichergröße und der spezifischen Kosten der Solarthermie-Anlage.

Die spezifischen Systemkosten für Solarthermieanlagen liegen nach [9] zwischen 400 und 1.500 €/m². Nach Herstellerangaben betragen sie für ein Einfamilienhaus 975 €/m² und für ein

Mehrfamilienhaus 645 €/m². Für die gegebene Mischbebauung ergibt sich ein Durchschnittswert von ca. 800 €/m².

In den Systemkosten sind nicht nur die Kosten der Module, sondern auch die Kosten für die zugehörigen Pufferspeicher, Montage, etc. enthalten. Die spezifischen Speicherkosten des saisonalen Großspeichers sinken nach [10] bei zunehmendem Speichervolumen.

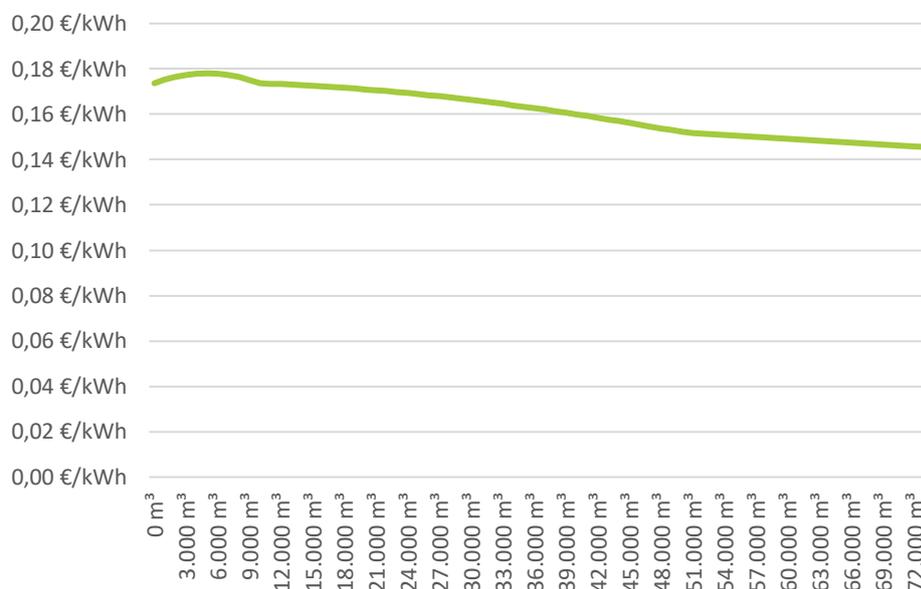


Abbildung 13: spezifische Wärmekosten in Abhängigkeit des Speichervolumens

Die Nutzungsdauer von Solaranlagen liegt bei 10 Jahren. Für saisonale Großspeicher gibt es bisher nur wenige Erfahrungswerte, daher erfolgt die Abschätzung der Nutzungsdauer an Hand der Afa-Tabelle. Für Behälter in der Wasserversorgung gilt hier eine Nutzungsdauer von 25 Jahren.

Der Vergleich zeigt, dass es bei der gegebenen Kostenstruktur günstiger ist, den Speicher so auszulegen, dass im Sommer die gesamte überschüssige thermische Energie, die durch die Solaranlagen generiert wird, gespeichert werden kann. Daraus ergibt sich auch, dass die Solarthermieanlagen nicht zu groß sein dürfen, damit die Größe des Speichers technisch realisierbar bleibt.

7 Auslegung

7.1 Herstellung des Biomassebrennstoffes

Im folgenden Abschnitt wird der Prozess zur Herstellung der Energieträger aus Laub und Grünschnitt im Allgemeinen beschrieben. Im Zuge dieser Einführung erfolgt ebenfalls eine Auslegung für den Betrieb in Ibbenbüren.

Die Herstellung der Laubbriketts erfolgt in mehreren Schritten. Das Laub wird mittels eines Niedertemperaturprozess auf 12 – 18 % Restfeuchte getrocknet. Hierzu wird ein Schubwendentrockner eingesetzt, welcher auf die besonderen Anforderungen der Laubtrocknung, wie Menge, Zusammensetzung und Zeitraum, abgestimmt ist. Es folgt die unter Umständen notwendige Trennung der Teilchen per Windsichtung und die anschließende Brikettierung unter bestimmten Bedingungen, wie Druck und Füllmengen. Die Aufbereitung des Grünschnitts erfolgt in gleicher Weise, jedoch wird nur teilweise brikettiert, da das Material eine größere Korngröße und damit bessere Förder- und Brenneigenschaften als loses Laub besitzt.

Abbildung 14 zeigt den vereinfachten Prozess zur Herstellung von Energieträgern aus Laub.

Die einzelnen Phasen werden in der Abbildung noch einmal deutlich:

- Bereitstellung des Materials
- Trocknung
- Gegebenenfalls Aufbereitung durch Siebung oder Windsichtung
- Brikettierung des Laubs
- Feuerung im Biomassekessel

Grünschnitt steht nach der Trocknung bereits als Energieträger zur Verfügung. Eine Brikettierung erfolgt hier nur bei Kleinkornfraktion.

In der etwas komplexeren Darstellung (Abbildung 15) werden die Einbindung eines BHKWs, eines Gas- und eines Biomassekessels in die Wärmeversorgung der Trocknungsanlage und

eines Gebäudes beispielhaft gezeigt, sowie Stoffströme bezüglich Wärmenutzung und Biomasseteilrückführung dargestellt. Dies ist bei der Strom- und Wärmenutzung in unmittelbarer Umgebung der Produktion möglich.

Schematische Darstellung der Laubbrikettierung

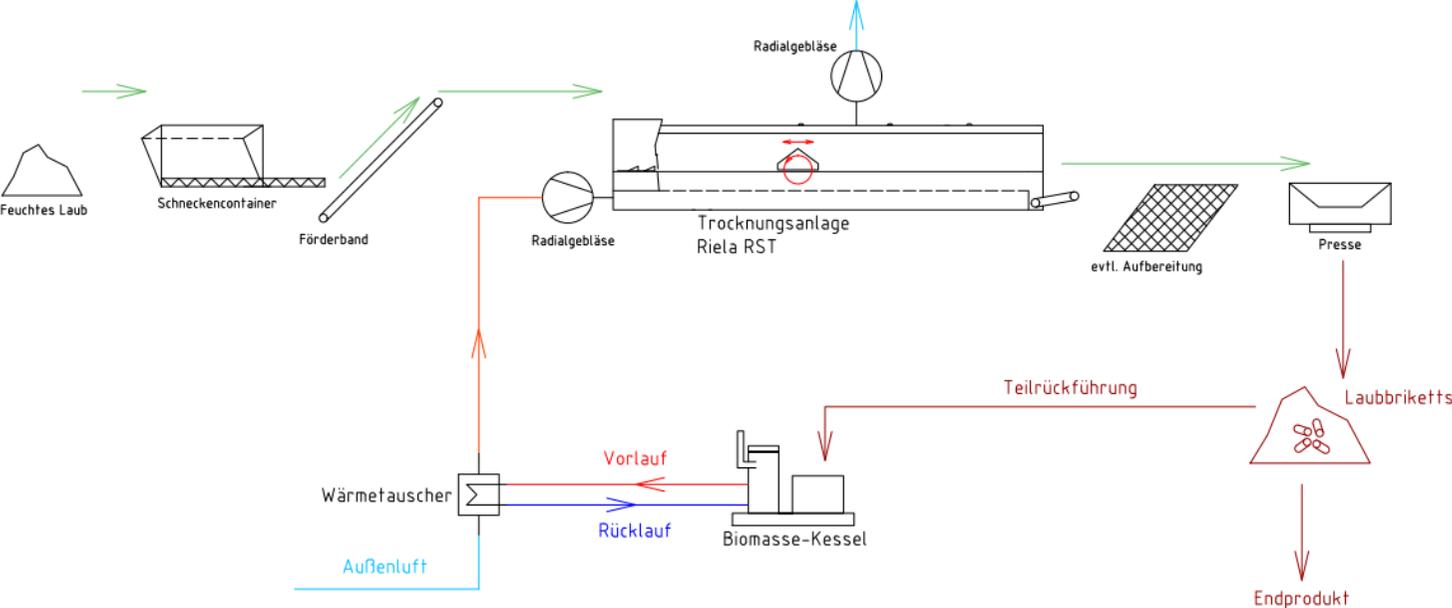


Abbildung 14: Darstellung der gesamten Prozesskette zur Brikettierung von Laub

Schematische Darstellung der energetischen Laub- und Grünschnitt-Nutzung

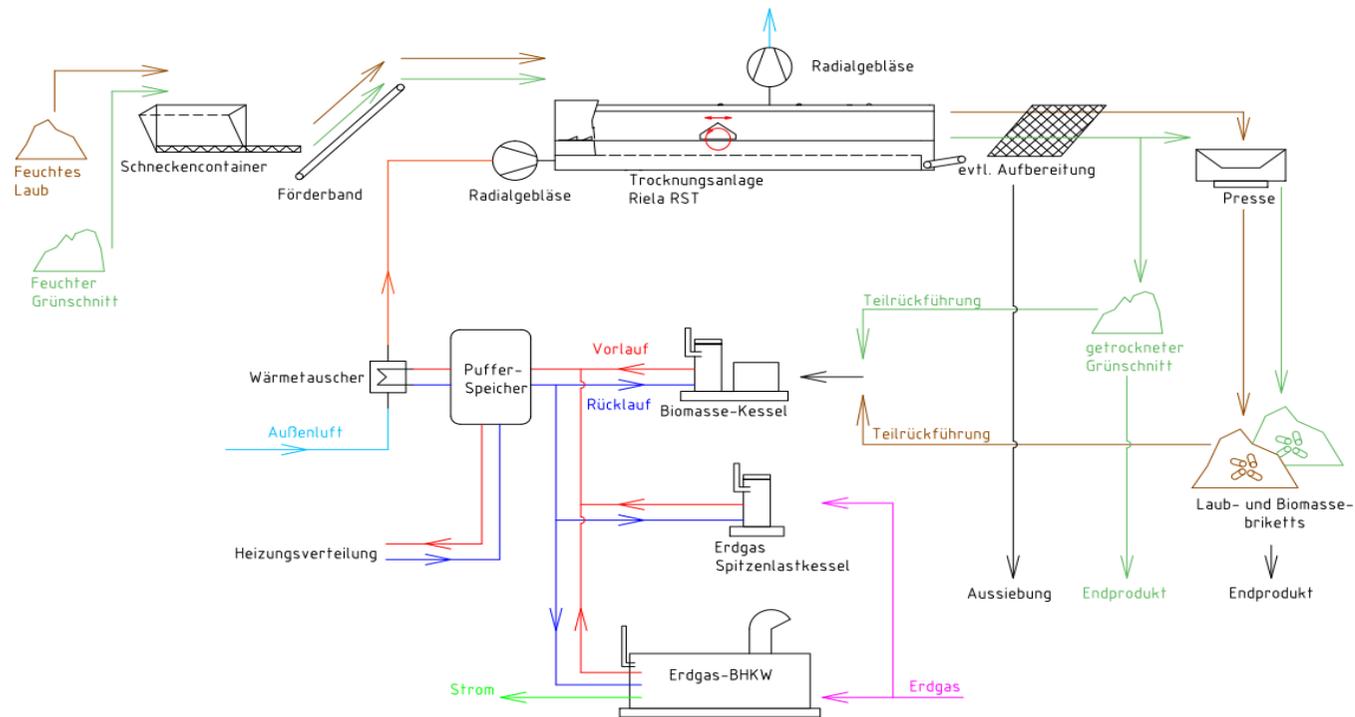


Abbildung 15: Darstellung der Prozesskette inklusive BHKW-Einbindung

7.1.1 Bereitstellung des Materials

Die Ausführung der Förderung des Materials kann an die Anforderungen individuell angepasst werden. Grundsätzlich ist bei der Errichtung der Anlage ein hoher Automatisierungsgrad gewünscht.

Für die Verwendung des Laubs und des Grünschnitts müssen zwei Lagereinrichtungen vorhanden sein. Eine zur Lagerung großer Mengen Material und zur Annahme der Laub- und Grünschnittlieferung, sowie eine Lagereinrichtung für den Prozess. Der Transport von der Annahmefläche zum Vorratsbunker kann manuell oder automatisiert erfolgen.

7.1.1.1 Schubbodencontainer

Der Vorratsbunker gewährleistet als Puffer einen konstanten Prozess, auch nachts und an Wochenenden ohne Personaleinsatz. Dieser Bunker mit Fördereinrichtung versorgt die Anlage kontinuierlich und automatisch mit Nassgut. Als System eignet sich ein Schubbodencontainer, welcher einen autonomen Betrieb der Anlage über einen Zeitraum von 24 Stunden und mehr gewährleisten kann. Der Schubbodencontainer wird auf die zu versorgende Anlage dimensioniert.

Bei einer Durchsatzmenge von 1 – 1,5 m³/h und einer angestrebten Unabhängigkeit von ca. 24 h ist ein Vorratsbunker mit einem Volumen von ca. 30 m³ nötig. Mit integriertem Austragsystem und Trocknereintragssystem kann die Steuerung individuell geregelt werden.



Abbildung 16: Beispiel eines Schubbodencontainers mit Austragsystem

Auf den Schubbodencontainer kann unter Umständen verzichtet werden. Jedoch ist der Vorratsbunker im Trockner deutlich kleiner, so dass ein durchgehend unabhängiger Betrieb nicht erfolgen kann. Weitere Fördersysteme zum Transport des Materials müssen den Gegebenheiten vor Ort individuell angepasst werden.

7.1.2 Trockner

Für die Trocknung des Materials wird ein Schubwendetrockner verwendet. Dieser ist in der Wahl des Trockenguts flexibel einsetzbar. Neben den gängigen Agrarrohstoffen wird dieser Trocknertyp vielfach für die Materialien Laub und Grünschnitt, sowie Holz genutzt. Im Folgenden wird der Einsatz des Trockners im Sinne dieses Konzeptes betrachtet und die Ausgangsstoffe mengenmäßig bewertet.

Grundsätzlich ist die Trocknungsleistung abhängig von verschiedenen Parametern. Dazu gehören die Eingangs- und Endfeuchte, die zur Verfügung stehenden Wärme- und Materialmengen, sowie die Umgebungstemperatur.

Weiterhin wird für die Trocknerleistung die Obergrenze für die Trocknungsmenge von 10 t/d festgelegt. Hintergrund ist die Vermeidung von langwierigen, organisatorisch aufwändigen und kostenintensiven Genehmigungsverfahren (nach 4. BImSchV Anhang 1, 8.10.1.2)

7.1.2.1 Funktionsweise des Schubwendetrockners

Der Schubwendetrockner arbeitet nach dem Schub-Wende-Prinzip, wahlweise im kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Betrieb. Durch Konvektion wird dem feuchten Material über einen Luftstrom Wärme zugeführt und die dabei verdunstete Feuchte aus dem Trockner geführt. Im Vergleich zu anderen Trocknungsanlagen hat der Schubwendetrockner mehrere Vorteile. Eine ständige Durchmischung führt zu einer gleichmäßigen Verteilung der Feuchte, was den Brikettierprozess und das weitere Handling begünstigt. Ebenfalls arbeitet der Trockner durch die Funktionsweise energieeffizient. Das Schub-Wende-Prinzip entstammt der Agrartechnik, so dass die Trocknungsanlage flexibel für verschiedene Produkte einsetzbar ist. Im Folgenden wird die Funktionsweise genauer beschrieben und an Hand einer Abbildung dargestellt.

Das zu trocknende Material wird über ein beliebiges Fördersystem in den Aufgabebunker (2) gefüllt. Ein Schubboden (7) im Aufgabebunker und ein zusätzlicher Regulierschieber dosieren eine definierte Menge des Materials in die Trocknungszone. Diese besteht aus einem festste-

henden Schuppenboden (8) auf dem das Material ruht. Ein Wendewagen (3) mit Wendewerkzeugen fährt vom Auswurf aus paddelnd in Richtung Aufgabebunker (2) über das Material hinweg. Bei diesem Arbeitsgang wenden und mischen die gutartangepassten Arbeitswerkzeuge das Trocknungsgut und transportieren es in Richtung Austrageband (10). Am Aufgabebunker angekommen stoppt der Wendewagen und fährt ruhend wieder zum Auswurf zurück. Hier startet nach entsprechend eingestellter Pausenzeit der Fahrzyklus erneut und das auf das Austrageband (10) geförderte Gut wird aus dem Trockner gefahren.

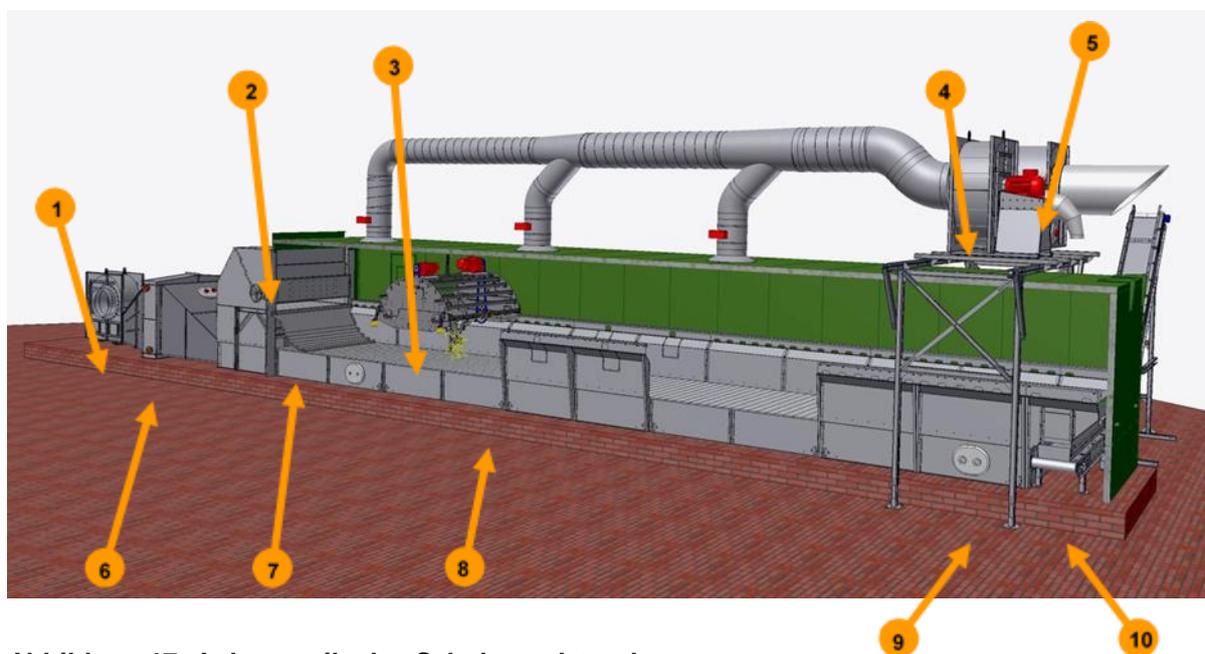


Abbildung 17: Anlagenteile des Schubwendetrockners

- | | | | |
|---------------------|------------------|--------------|-------------------|
| 1 Warmluftgebläse | 2 Produktaufgabe | 3 Wendewagen | 4 Absauggebläse |
| 5 Zentro-Abscheider | 6 Heizregister | 7 Schubboden | 8 Trocknungsboden |
| 9 Wartungsöffnung | 10 Austrageband | | |

Die Zuluft für den Trocknungsprozess wird entweder über einen Brenner oder über ein Heizregister (6) erwärmt. Durch ein Warmluftgebläse (1) wird diese in den unteren Luftkanal einblasen und über die Einstellklappen reguliert. Nachdem die Luft von unten nach oben durch das Material geströmt ist, wird sie über ein Gebläse (4) abgesaugt. Anschließend passiert die Luft einen Zentro-Abscheider (5) um die Staubemissionen zu minimieren.

7.1.2.2 Umgebungstemperaturabhängigkeit der Trocknungsanlage

In kalten Wintermonaten kann bei sonst gleichen Rahmenbedingungen weniger Material getrocknet werden, als im Sommer, da im Winter geringere erhitzte Luftmengen für die Trocknung zur Verfügung stehen. Es wird mehr Energie benötigt, die kalte Umgebungsluft auf die Trocknungstemperatur zu erwärmen. Im Sommer hingegen können höhere Durchsätze erreicht werden.

Die folgende Grafik zeigt den Verlauf der durchschnittlichen Außentemperatur für Ibbenbüren an.

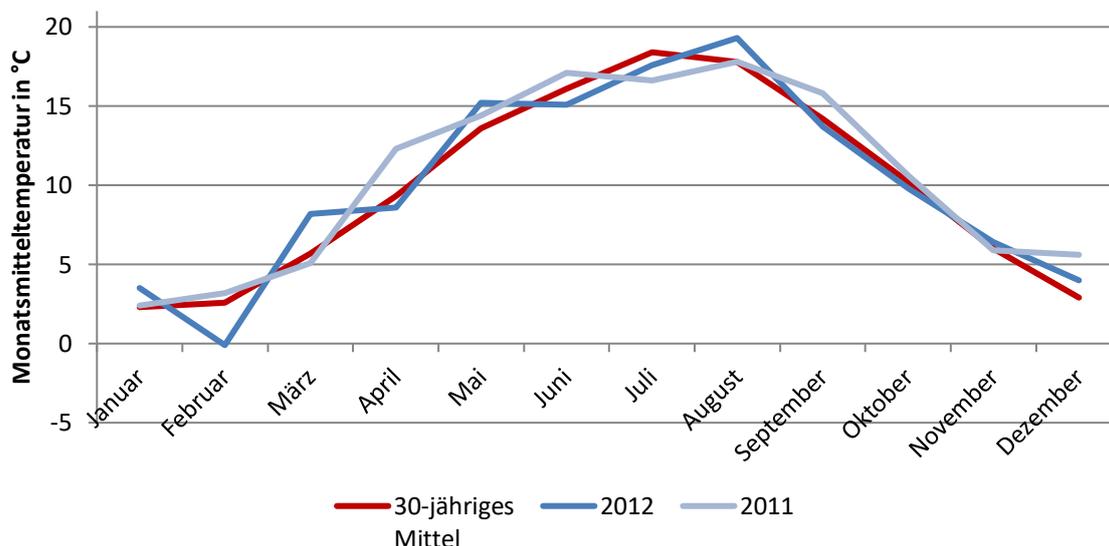


Abbildung 18: Monatsmitteltemperatur für Ibbenbüren von 2012, 2011 und im 30-jährigen Mittel

Die Jahresmittelaußentemperatur für die Region beträgt ca. 9,9 °C. Für die weitere Berechnung wird von einer mittleren Temperatur der Ansaugluft von 10 °C ausgegangen, da die Anlage ganzjährig im Betrieb sein wird.

Die mögliche Aufstellung des Trockners innerhalb eines bereits vorhandenen Gebäudes hat ebenfalls einen geringen Einfluss auf die Trocknerleistung. Da die Trocknungsluft von außen angesaugt wird, ist die höhere mögliche Durchsatzleistung nur schwer berechenbar und wird deshalb im Weiteren vernachlässigt.

Aus den genannten Bedingungen ergeben sich unterschiedliche Durchsatzmengen. Diese werden in den folgenden Tabellen dargestellt.

7.1.2.3 Betriebsparameter der Trocknungsanlage

Die Tabelle 7 zeigt die Auslegungsparameter der Trocknungsanlage. Die Werte verstehen sich als Anhaltspunkt. Die Holzhackschnitzel sind nur zum Vergleich aufgeführt.

Tabelle 7: Durchsatzmengen ausgewählter Produkte bei 10°C Umgebungstemperatur

Parameter	Werte
Verfügbare thermische Leistung	350 kW
max. Luftleistung	18.000 m³/h
El. Stromverbrauch der Trocknungsanlage	15,8 kWh/h

Produkt 1	Laub (allgemein)
Anfangsfeuchte	60 %
Endfeuchte	12 %
Durchsatz Feuchtegut	ca. 413 kg/h
Durchsatz Trockengut	ca. 188 kg/h
Warmlufttemperatur Trockner	75°C
Umgebungs-/Ansaugtemperatur	10°C

Produkt 2	Grünschnitt (schwachstrukturiert)
Anfangsfeuchte	55 %
Endfeuchte	12 %
Durchsatz Feuchtegut	ca. 383 kg/h
Durchsatz Trockengut	ca. 196 kg/h
Warmlufttemperatur Trockner	75°C

Produkt 2	Grünschnitt (schwachstrukturiert)
Umgebungs-/Ansaugtemperatur	10°C
Produkt 3	Holzackschnitzel G30 50/20%
Anfangsfeuchte	50 %
Endfeuchte	20 %
Durchsatz Feuchtegut	ca. 559 kg/h
Durchsatz Trockengut	ca. 350 kg/h
Warmlufttemperatur Trockner	75°C
Umgebungs-/Ansaugtemperatur	10°C

Die Anfangsfeuchte von 50-60 % und die Endfeuchte von ca. 12 % sind Werte, die je nach Material und Lagerbedingung variieren. Die Endfeuchte sollte im Prozess auf mindestens 18 % getrocknet werden, um die Brikettierung zu gewährleisten. Bei 12% steigt der Energieaufwand zur Trocknung an, jedoch hat das fertige Brikett anschließend einen höheren relativen Energiegehalt. Je kleiner die Differenz zwischen Anfangs- und Endfeuchte ist, desto geringer ist der thermische Energieaufwand und desto höher ist die Durchsatzleistung. Falls für die Trocknung nicht die Angegebenen 350 kW_{th} bereitgestellt werden können, verringert sich der Durchsatz entsprechend.

Die Trocknungsanlage wird mit 350 kW_{th} versorgt, um auch im Winter die Durchsatzmengen zu gewährleisten. Die Trocknungsfläche beträgt ca. 18 m². Unter Berücksichtigung der thermodynamischen und physikalischen Grundlagen sind im Folgenden Durchsatzmengen als Annahmen dargestellt.

7.1.2.4 Durchsatzmengen der Trocknungsgüter

Als Ausgangsmaterial kann bei Laub von einer Schüttdichte von 250 kg/m³ bis 350 kg/m³ ausgegangen werden. In getrockneter und brikettierter Form beträgt die Schüttdichte ca. 650 kg/m³ bis 750 kg/m³. Ausgehend vom feuchten Laub wird das Volumen zum fertigen geschütteten Brikett auf ca. 16-19 % reduziert.

Die Dichte von Grünschnitt schwankt größer als die von Laub. So kann hier von Dichten zwischen 200 kg/m³ bis 400 kg/m³ ausgegangen werden. Eine anschließende Brikettierung und Verdichtung erfolgt nur für die Kleinfraction. Die Grobfraction ist als Energieträger auch ohne Brikettierung förderfähig.

In den folgenden Tabellen werden die Mengen in kg/h, m³/h und kWh/h dargestellt und miteinander verglichen. Die Tabelle zeigt mögliche Durchsatzmengen an feuchtem und an getrocknetem Material. Für den Transport und den Lagerflächen-, bzw. -raumverbrauch sind ebenfalls die Angaben in m³ von Bedeutung. Die Schüttdichte ist bei den oben aufgeführten Materialien stark schwankend. Besonders bei Laub und Grünschnitt ist die Schüttdichte von der durch Lagerung verursachten Kompression abhängig.

Auch hier gilt es nach den unterschiedlichen Temperaturen der Umgebungsluft zu unterscheiden.

Tabelle 8: Mögliche Durchsatzmengen ausgewählter Materialien bei 10°C

	Feucht		Trocken		Brikettiert
Material	Durchsatz in kg/h	Durchsatz in m ³ /h	Durchsatz in kg/h	Durchsatz in m ³ /h	Durchsatz in kWh/h
Laub	413	1,4	188	0,3	790
Grünschnitt	383	1,3	196	0,3	764
Holzackschnitzel	559	1,6	350		1.400

Die in der Tabelle genannten Werte verstehen sich als Anhaltspunkte nach Werten aus Erfahrung und der Literatur. Bei einem Betrieb von 24 Stunden wird somit die Vorgabe, maximal 10 t/Tag, eingehalten, da die Anlage nicht mit Holzackschnitzeln betrieben wird. Gegebenenfalls weichen diese von den realen Bedingungen ab. Zu berücksichtigen ist die möglichst trockene Lagerung und Sammlung des Materials. Weiterhin handelt es sich um Systeme, welche zunächst aufeinander abgestimmt werden müssen, um die errechneten Leistungen zu erreichen.

7.1.2.5 Elektrische und thermische Versorgung des Trockners

Wie in den Kapiteln 7.1.2.1 bis 7.1.2.5 erläutert, benötigt der Schubwendetrockner zur Trocknung dieser Materialart und -menge eine Warmluftmenge von rund 17.500 m³/h mit einer Temperatur von ca. 75 °C. Diese wird über ein Heizregister zur Verfügung gestellt, welches mit Warmwasser beaufschlagt wird. Es ergibt sich im Vorlauf eine Wassertemperatur von ca. 85 °C bei einer Menge von ca. 6,7 m³/h. Der Rücklauf wird mit 40 °C bemessen.

Diese Bilanzdaten dienen als Grundlage für die folgenden Varianten zur Gestellung der erforderlichen Energie.

7.1.2.5.1 Variante 1: Wärmepumpen

In Variante 1 soll eine Wärmepumpe die erforderliche thermische Energie für den Trockner liefern. Betrachtet wird hier eine Wärmepumpe mit Erdsonde (Sole-Wasser-Wärmepumpe), da sie konstruktionsbedingt eine fast konstante Soletemperatur (durch Tiefenbohrung) und damit einen jahreszeitlich gleichbleibenden COP (Coefficient of Performance) über das Jahr gesehen liefern kann. Konstruktionsbedingt liegen die Gesamtwirkungsgrade von Wärmepumpen bei ca. 50 %. Die erforderliche elektrische Leistung zur Gestellung von 350 kW_{th} wird über den COP ermittelt:

$$COP = 0,5 * \left(\frac{358K}{358K - 273K} \right) = 2,11$$

Der theoretische COP fällt mit 2,11 sehr unterdurchschnittlich aus. Es zeichnet sich bereits an dieser Stelle ab, dass eine Wärmepumpe für diesen Zweck nicht wirtschaftlich einsetzbar ist. Dies ist mit der benötigten Vorlauftemperatur von 85 °C zu begründen. Bei diesem COP ist eine erforderliche elektrische Leistung von

$$P_{el} = \frac{350kW_{th}}{COP} = 166kW_{el}$$

nötig.

Die erforderliche elektrische Leistung soll in dieser Variante durch eine Photovoltaik-Anlage zur Verfügung gestellt werden. Der jährliche Ertrag pro Quadratmeter PV-Fläche unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades ermittelt sich zu

$$1.000 \frac{kWh}{m^2 * a} * 0,15 = 150 \frac{kWh}{m^2 * a}$$

Bei einer Vollbenutzungsdauer von 8.000 h pro Jahr ergibt dies eine erforderliche PV-Fläche von

$$\frac{166kW_{el} * 8.000h}{\frac{150kWh}{m^2 * a}} = 8.853m^2$$

Da die erforderliche Energie für die Nachtstunden (12 h) vorab gespeichert werden muss, werden weitere ca. 2.000 kWh PV-Fläche benötigt, um einen Stromspeicher aufladen zu können.

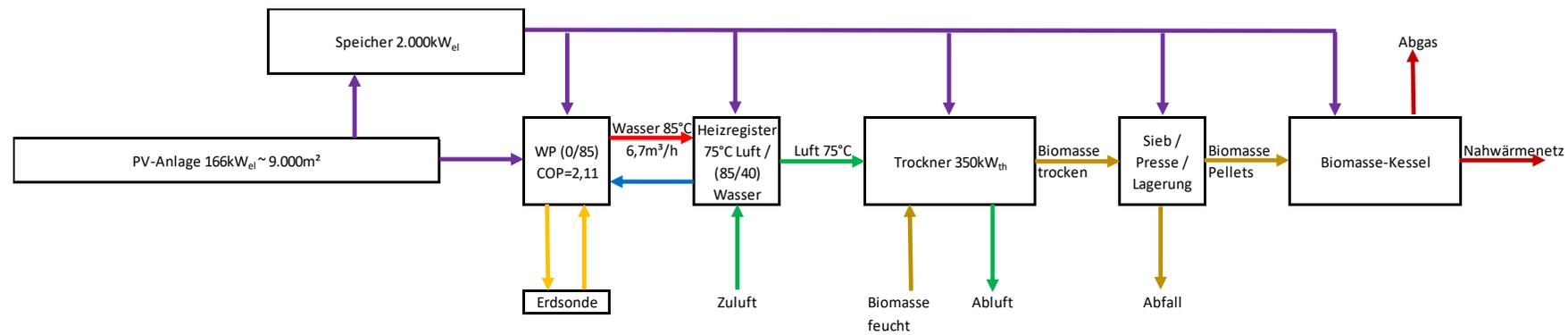


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Heizzentrale Variante 1

Bewertung Variante 1:

In der Nähe ihres optimalen Betriebspunktes weisen Wärmepumpen einen COP zwischen 3,5 und 5. Aufgrund der geforderten Parameter arbeitet die Wärmepumpe jedoch außerhalb dieses Bereiches, woraus der vergleichsweise schlechte COP resultiert. Um den benötigten Strom durch PV-Anlagen zu erzeugen wird eine Fläche benötigt, die in dieser Größe nicht zur Verfügung steht. Da für den Nachtbetrieb zusätzlich ein Speicher von 2.000 kW erforderlich ist, erweist sich diese Variante als nicht durchführbar und als nicht wirtschaftlich.

Den erforderlichen Strom alternativ aus dem Netz zu beziehen ist ebenfalls nicht wirtschaftlich, da Gas im Verhältnis zu Strom deutlich preiswerter zu beziehen ist (Verhältnis Strom: Erdgas ca. 4:1). Alles in allem ist diese Variante wirtschaftlich – und letztendlich aus Platzgründen (PV-Fläche) – nicht umsetzbar.

7.1.2.5.2 Variante 2: Wärmepumpe und BHKW

In Variante 2 wird die Machbarkeit einer Wärmepumpe mit nachgeschaltetem BHKW überprüft. Die Wärmepumpe soll – im Gegensatz zur Variante 1 – die Wassertemperatur lediglich auf ca. 45 °C anheben. Das nachgeschaltete BHKW bringt das vorgewärmte Wasser auf die erforderlichen 85 °C.

Zunächst wird wieder der theoretische COP der Wärmepumpe ermittelt.

$$COP = 0,5 * \left(\frac{318K}{318K - 273K} \right) = 3,53$$

Es muss zur Anhebung von 40 °C auf 45 °C eine thermische Energie von ca. 40 kW_{th} zugefügt werden.

Bedarf Trockner: $350kW_{th} = 40kW_{th,WP} + 310kW_{th,BHKW}$

Benötigte elektrische Leistung: $P_{el} = \frac{40kW_{th,WP}}{COP} = 11,3kW_{el}$

Die erforderliche elektrische Leistung für die Gesamtanlage (inkl. Wärmepumpe) kann in dieser Variante direkt vom BHKW erbracht werden, da ca. 250 kW_{el} zur Verfügung stehen.

Das nachgeschaltete BHKW muss zur Erwärmung von 45 °C auf 85 °C demnach eine thermische Leistung von ca. 310 kW_{th} bereitstellen.

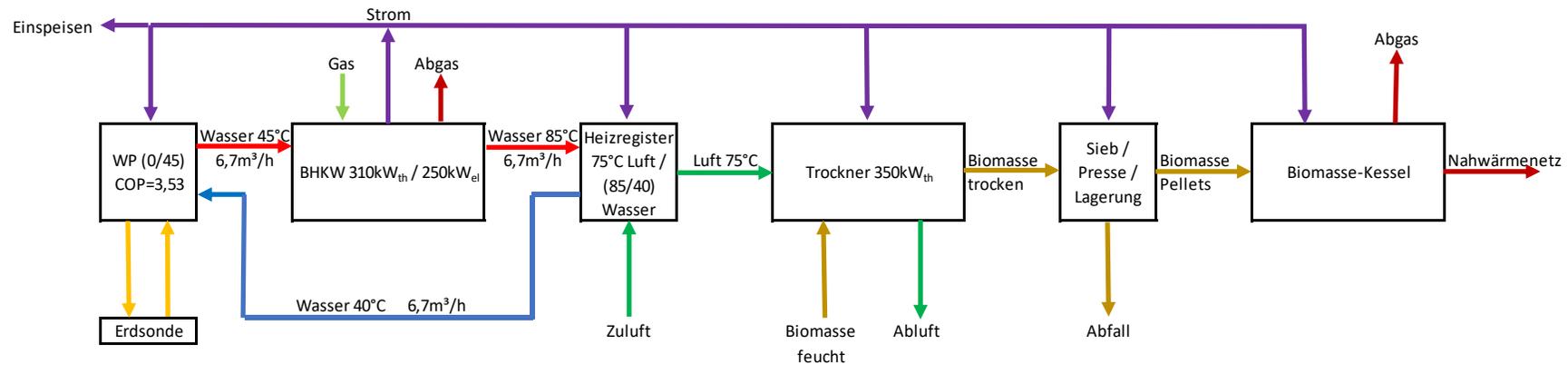


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Heizzentrale, Variante 2

Bewertung Variante 2:

Da die Wärmepumpe in dieser Variante lediglich 11,5% der erforderlichen Leistung zur Verfügung stellen kann, ist die Investition in eine Wärmepumpe inkl. Peripherie gegenüber der Mehrinvestition in ein leistungsstärkeres BHKW nicht lohnenswert.

7.1.2.5.3 Variante 3: BHKW

Variante 3 betrachtet die Erzeugung der benötigten thermischen Leistung ausschließlich durch ein BHKW mit 350kW_{th} .

Damit kann die benötigte Trocknerleistung vollständig geliefert werden. Wenn der Trockner – bedingt durch Mindermengen an Laub/Grünschnitt – nicht zu 100% ausgelastet ist, kann das BHKW entweder modulieren, oder mit der überschüssigen Wärme wird ein WW-Speicher aufgeladen. Somit kann das BHKW takten, was wiederum die Betriebsstunden reduziert und die Wartungsintervalle verlängert.

Der erzeugte Strom wird zur Versorgung der elektrischen Komponenten des Trockners und seiner Peripherie, sowie der Steuerung des Biomassekessels genutzt. Überschüssiger Strom wird in das öffentliche Netz eingespeist.

Bewertung Variante 3:

Für die benötigte Energiemenge bei vorgegebener Vorlauftemperatur ist ein BHKW der ideale Energielieferant. Im Gegensatz zur Variante 2, in der das Wasser durch eine WP vorgewärmt wird, wird in dieser Variante der thermische Wirkungsgrad nahezu voll ausgenutzt.

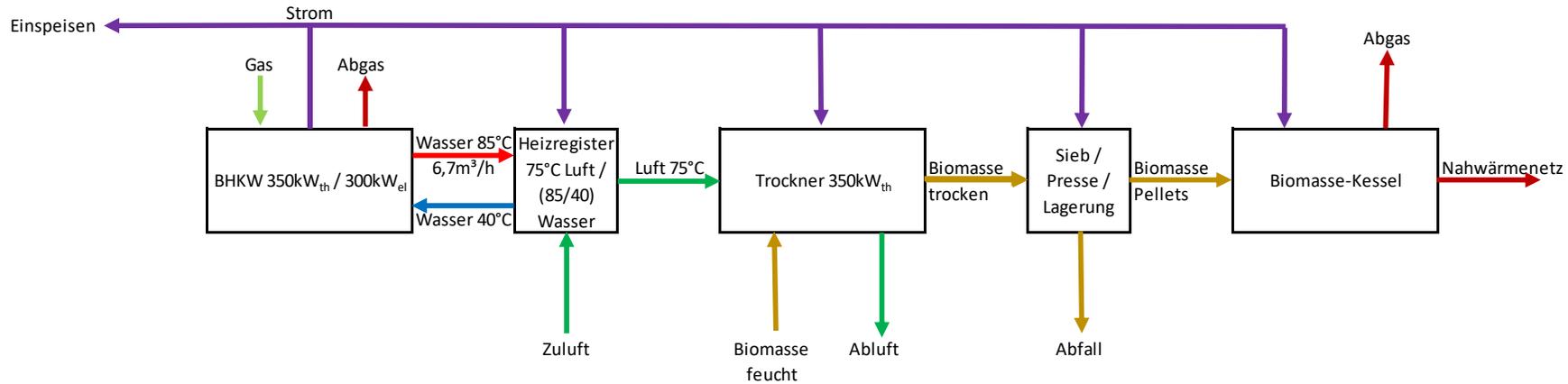


Abbildung 21: Schematische Darstellung der Heizzentrale, Variante 3

7.1.3 Beschreibung Siebung/Aufbereitung

Ein im Mai und Juni 2013 durchgeführtes Forschungsvorhaben hat gezeigt, dass eine Siebung des Materials unter Umständen notwendig ist. Das Forschungsprojekt wurde mit Material aus verschiedenen Teilen einer großen ostdeutschen Stadt durchgeführt. Die Menge Laub und Grünschnitt war mit Inhaltsstoffen versetzt, welche für die Trocknung und Brikettierung schädlich sind. Nicht nur Äste und Steine waren im Material zu finden, sondern auch Müll wie Plastiktüten, Zigarettenreste, Kunststoffverpackungen, Kleidungsstücke und sogar Glas. Der Hauptanteil an Störstoffen ist jedoch vor allem der Sandanteil. Besonders das hier verwendete Laub hatte einen sehr hohen Verschmutzungsgrad. Im Gegensatz dazu zeigten vergangene Forschungsvorhaben mit Material aus Klein- und Mittelstädten, dass dieses deutlich sauberer und mit wenig inertem Material versetzt war. Eine Siebung war hierbei nicht notwendig.

Der Feinanteil von bis zu ca. 30% setzt sich überwiegend aus Sand zusammen und ist vor der Brikettierung aus dem Prozess zu entfernen. Bereits bei der Sammlung des Laubes wird die Materialqualität wesentlich mitbestimmt.

Zum Entfernen gibt es mehrere Möglichkeiten. Zum einen eine konstruktive Veränderung am Schubwendetrockner und zum anderen durch eine nachgeschaltete Siebung. Während des o.a. Forschungsvorhabens lagerte sich ein Großteil des Sandes im letzten Drittel des Trockners ab. Die angesprochene bauliche Veränderung bedeutet, dass ein kleiner Teil der Trocknungsfläche durch ein Sieb ersetzt wird. Dadurch reduziert sich die zur Verfügung stehende Trocknerfläche. Durch die Installation eines unter der Siebfläche angeordneten Förderbandes könnte somit die Feinfraktion ausgeschleust werden. Alternativ kann direkt nach dem Austrag der Trocknungsanlage ein Trommelsieb eingesetzt werden. Auch die Kombination der beiden Reinigungsschritte könnte die Qualität der Briketts verbessern.

Eine neue Siebanlage wird zunächst nicht berücksichtigt. Entsprechende Proben müssen zeigen, ob das Laub aufbereitet werden muss. Es sollte ein Zustand ohne Steine oder grobe Verunreinigungen angestrebt werden. Grundsätzlich sind sämtliche Fremdkörper unerwünscht. Eine 100 prozentige Aufbereitung des Laubs wird nicht möglich sein. Ein geringer Anteil von Störstoffen wird das Material weiterhin verunreinigen. Auf Grund des Verhältnisses der Menge Laub und Grünschnitt zu eventuellen Verunreinigungen, kann davon ausgegangen werden, dass es auf den Brennwert und auch auf die Einhaltung rechtlicher Bestimmungen keine wesentlichen Auswirkungen bei der Verbrennung der Briketts gibt.

7.1.4 Beschreibung Brikettierung

Als letzter Schritt nach der Trocknung folgt die Brikettierung, die in diesem Fall das Laub zu den Briketts presst. Hierfür wird eine hydraulische Brikettiermaschine eingesetzt. Das zu verarbeitende Gut muss auf einen entsprechenden Feuchtegehalt getrocknet werden. Dadurch wird ein stabiles und lagerfähiges Produkt erzielt. Durch die Trocknung des Materials ist auch eine bessere Verbrennung möglich.

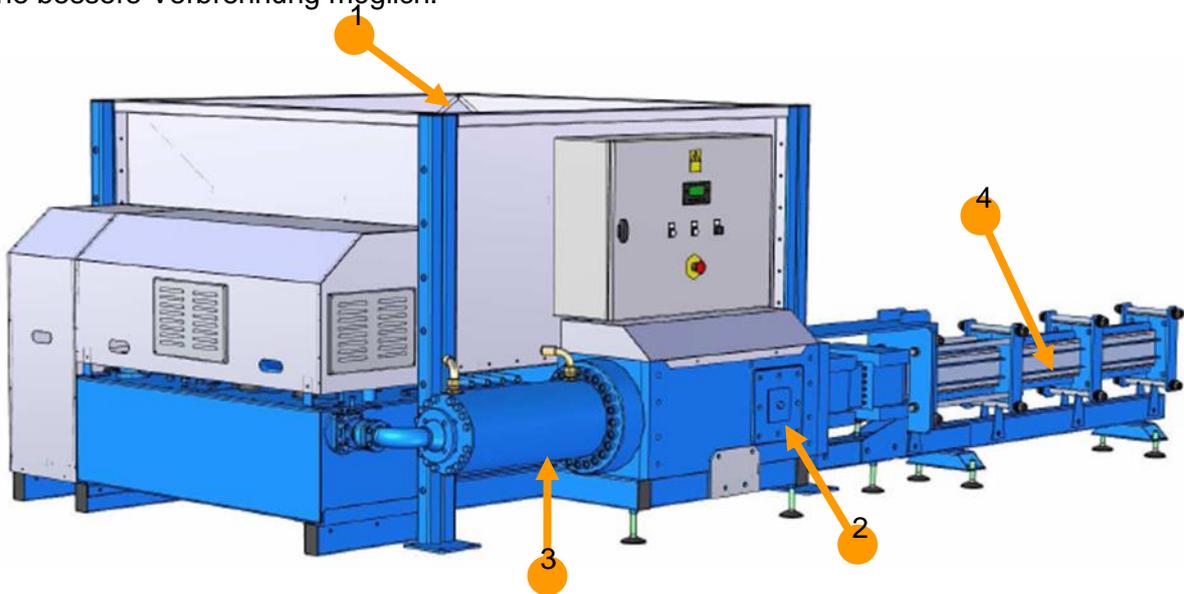


Abbildung 22: Aufbau der Brikettiermaschine

Das Material wird in einen offenen Arbeitsbunker (1) geschüttet. Dies kann automatisch mit Hilfe des Austragssystems des Schubwendetrockners geschehen. Im Arbeitsbunker wird das Material von einem Mischer bewegt. In einer im Boden des Arbeitsbunkers liegenden Schnecke wird das Material in die Presskammer (2) dosiert. Nach der Befüllung der Presskammer wird diese über einen Stempel verschlossen. Anschließend erzeugt ein Presszylinder (3) unter hohem Druck das Brikett. Je nach zugeführter Produktmenge und dem eingestellten Druck der Hydraulikeinheit ergibt sich eine bestimmte Dicke der zylindrischen Briketts. Abschließend werden die Briketts in einer Spannvorrichtung (4) abgekühlt, um eine Formstabilität zu erreichen.

Entsprechend der Vorgaben aus der Trocknung wird die Brikettierung in der Größenordnung der Stundenleistung von ca. 300 kg/h dimensioniert. Damit ist in Monaten mit hoher Trocknerdurchsatzleistung, ein kontinuierlicher Betrieb gewährleistet. Im Zeitraum mit einer niedrigen Außentemperatur und geringen Durchsätzen wird durch die Regelung ein energiesparender

Betrieb gewährleistet. Um eine gute Brikettqualität zu gewährleisten, muss die, im Abschnitt Trocknung erwähnte, Feuchtigkeit von 18 – 12 % erreicht werden.



Abbildung 23: Brikettiermaschine in Verbindung mit einem mobilen Laubtrockner

Die elektrische Anschlussleistung beträgt ca. 21 kW. Auf Grund der teilweise geringeren Auslastung und der Funktionsweise der Anlage kann davon ausgegangen werden, dass die Aufnahme elektrischen Stroms im dauerhaften Betrieb etwa 16 kWh/h beträgt.

7.2 Versorgungsszenarien

An Hand der bisher erarbeiteten Ergebnisse wurden vier Konzepte zur Versorgung bestimmter Verbrauchergruppen des Quartiers aufgestellt. Da der Anschluss der privaten Gebäude schwer vorhersehbar ist und gleichzeitig einen sehr hohen Anteil des Bedarfs (ca. 80 %) darstellt, wurde zunächst ein Versorgungskonzept für die öffentlichen Gebäude aufgestellt (Versorgungsszenario 1). Im zweiten Versorgungsszenario werden auch die Wohngebäude mitbetrachtet, sodass alle Gebäude des Quartiers in das Energiekonzept zur Wärmeversorgung mit einbezogen werden. Versorgungsszenario 3 und 4 entsprechen jeweils dem Szenario 1 bzw. 2 mit dem Aaseebad als zusätzlichen Wärmeabnehmer.

Tabelle 9: Aufstellung der Versorgungsszenarien

Versorgungsszenario	Am Netz angeschlossene Verbrauchergruppen
1	öffentliche Gebäude
2	öffentliche Gebäude + Privathaushalte
3	öffentliche Gebäude + Aaseebad
4	öffentliche Gebäude + Privathaushalte +Aaseebad

Für die vier Szenarien ergeben sich verschiedene Bedarfsprofile, für die jeweils die entsprechende Anlagenkombination zur thermischen Energieversorgung simuliert wird.

7.2.1 Versorgungsszenario 1

Die für das Szenario betrachteten Wärmeabnehmer sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Insgesamt müssen für das gesamte Jahr ca. 2.600 MWh thermische Energie bereitgestellt werden.

Tabelle 10: Jährliche Wärmeabnahme der öffentlichen Gebäude

	Wärmebedarf [kWh/a]
Roncalli Realschule (Roncalli Str. 9)	500.000
technisches Rathaus (Roncalli Str. 3 & 5)	195.500
Johannes-Kepler-Gymnasium (Wilhelmstraße 210)	1.170.728
Gesamtschule Ibbenbüren (Am Sportzentrum 22)	702.080
Summe (öffentliche Gebäude)	2.568.308

Um den Anteil der CO₂ neutralen thermischen Energiequelle Solarthermie möglichst zu maximieren, wird das theoretische Solarpotential der Gebäudedächer der öffentlichen Gebäude zu 70 % genutzt. Dies entspricht dem erfahrungsmäßigem tatsächlich nutzbarem Solarpotential. Aus dem Solarüberschuss im Sommer ergibt sich eine Energiemenge von ca. 76 MWh. Wie in Kapitel 6 bereits geschildert, wird diese Energiemenge komplett eingespeichert. Daraus ergibt sich ein Speichervolumen von 2.200 m³. Insgesamt können durch die Solarthermieanlagen mit dem Saisonspeicher ca. 19 % des gesamten Wärmebedarfs gedeckt werden. Die restliche Energie wird durch einen Biomassekessel bereitgestellt, der die Laub- bzw. Grünschnittbriketts thermisch verwertet. Eine weitere Technologie, um den frei verfügbaren Grünschnitt zu verwerten, ist der Holzvergaser. Dadurch wird neben der thermischen Energie auch Strom erzeugt. Tabelle 11 zeigt die Zusammensetzung der thermischen Energiequellen zur Deckung des Jahresbedarfs. Als weitere Wärmequelle ist ein BHKW aufgeführt. Dieses wird für die thermische Versorgung der Trocknungsanlage als auch die elektrische Versorgung der Anlagen der Energiezentrale eingesetzt.

Tabelle 11: Energieversorgung der öffentlichen Gebäude (Szenario 1)

Komponente	Leistung [kW _{th}]	Wärmemenge [MWh/a]
Solarthermie	500	480
Speicher (Solarthermie in Speicher geladen)		(76)
Holzvergaser	100	521
Biomassekessel	600	1.546
BHKW Trocknung	270	1.460
Gaskessel	2.500	25

Neben der Bereitstellung der thermischen Energiemengen muss das System zum einen die Versorgungssicherheit gewährleisten und zum anderen die Leistung auch bei sehr niedrigen Temperaturen für Zeitskalen von mehreren Tagen zur Verfügung stellen können. Bei annähernd linearer thermischer Leistungsabnahme in Abhängigkeit von der Temperatur, errechnet sich ein Leistungswert von 3,4 MW_{th} für eine Außentemperatur von -10 °C. Aus diesem Grund beinhaltet das Energiekonzept einen Gaskessel mit 2,5 MW_{th}, der als Redundanz und bei extremen Kälteperioden zugeschaltet werden kann. Trotz hoher Leistung ist der Anteil der jährlichen thermischen Energieerzeugung dadurch mit ca. 25 MWh sehr gering. Für kurzfristige Überbrückungen und Leistungsspitzen soll zuerst der Wärmespeicher eingesetzt werden. An dieser Stelle kann keine Aussage zum Leistungspotential gegeben werden, da es, aufgrund der ausschließlich individuell ausgelegten Lösungen, aus der Praxis keine generellen Angaben zu Leistungskennwerten der Speicher gibt. Um die Einsatzzeiten des Spitzenlastkessels allerdings möglichst gering zu halten wird empfohlen die Speichergeometrie und den möglichen Be-/Entlade-Volumenstrom so auszulegen, dass eine hohe Wärmeleistung bereitgestellt werden kann. Im Jahresverlauf zeigt die Ladekurve des Speichers, dass durch den überschüssigen Ertrag der Solarthermieanlagen im Sommer, der Speicher ab Mai beladen wird. Ab Anfang September wird der Speicher bereits für das Heizen in kalten Nächten genutzt. Um die Verluste zu minimieren wird der Speicher erst schnell entladen, um im Winter bei höheren Speicherverlusten weniger thermische Energie im Speicher geladen zu haben. Dies wird auch durch die vorerst steilen und dann abfallenden Flanke der Ladekurve deutlich (vgl. Abbildung 24).

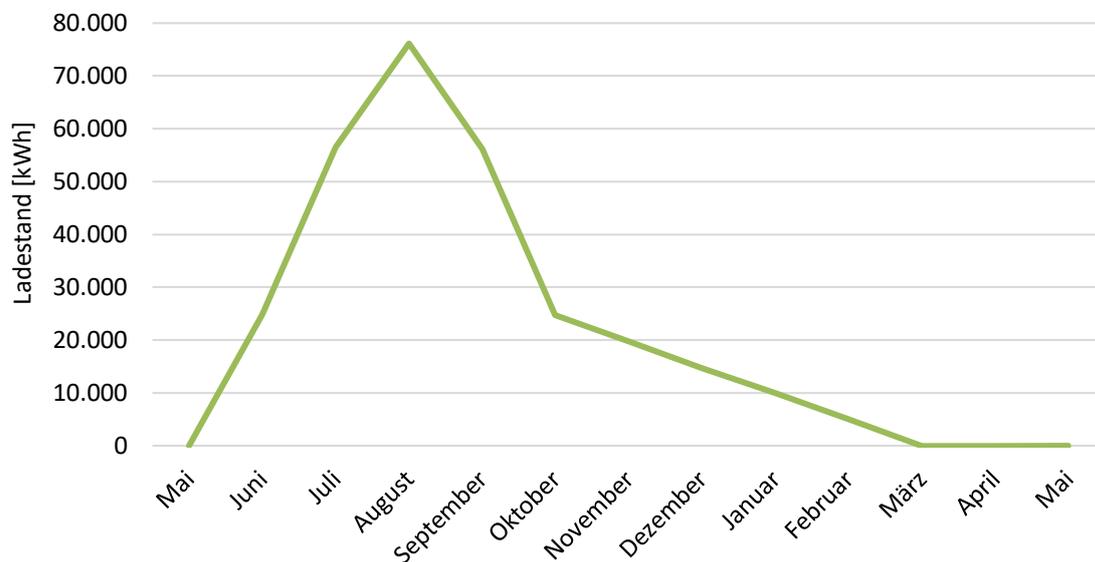


Abbildung 24: Verlauf der Speicherbeladung im Jahresverlauf in Szenario 1: Versorgung der öffentlichen Gebäude

Die jeweiligen Anteile an der monatlichen thermischen Gesamtversorgung lassen sich aus der Übersicht in Abbildung 25 ablesen. Die Grundlast im Sommer zur Warmwassererzeugung beträgt ca. 40 MWh/Monat. In dieser Zeit liegt der thermische Ertrag ca. 30 % darüber. Diese Energie wird eingespeichert und sorgt dafür, dass der Biomassekessel erst im Oktober zugeschaltet werden muss. Die maximale monatliche Wärmeabnahme liegt im Winter bei ca. 450 MWh_{th}. Zur Deckung dieses Wärmebedarfs werden alle Aggregate eingesetzt. Dabei wird der größte Anteil durch den Biomassekessel erzeugt.

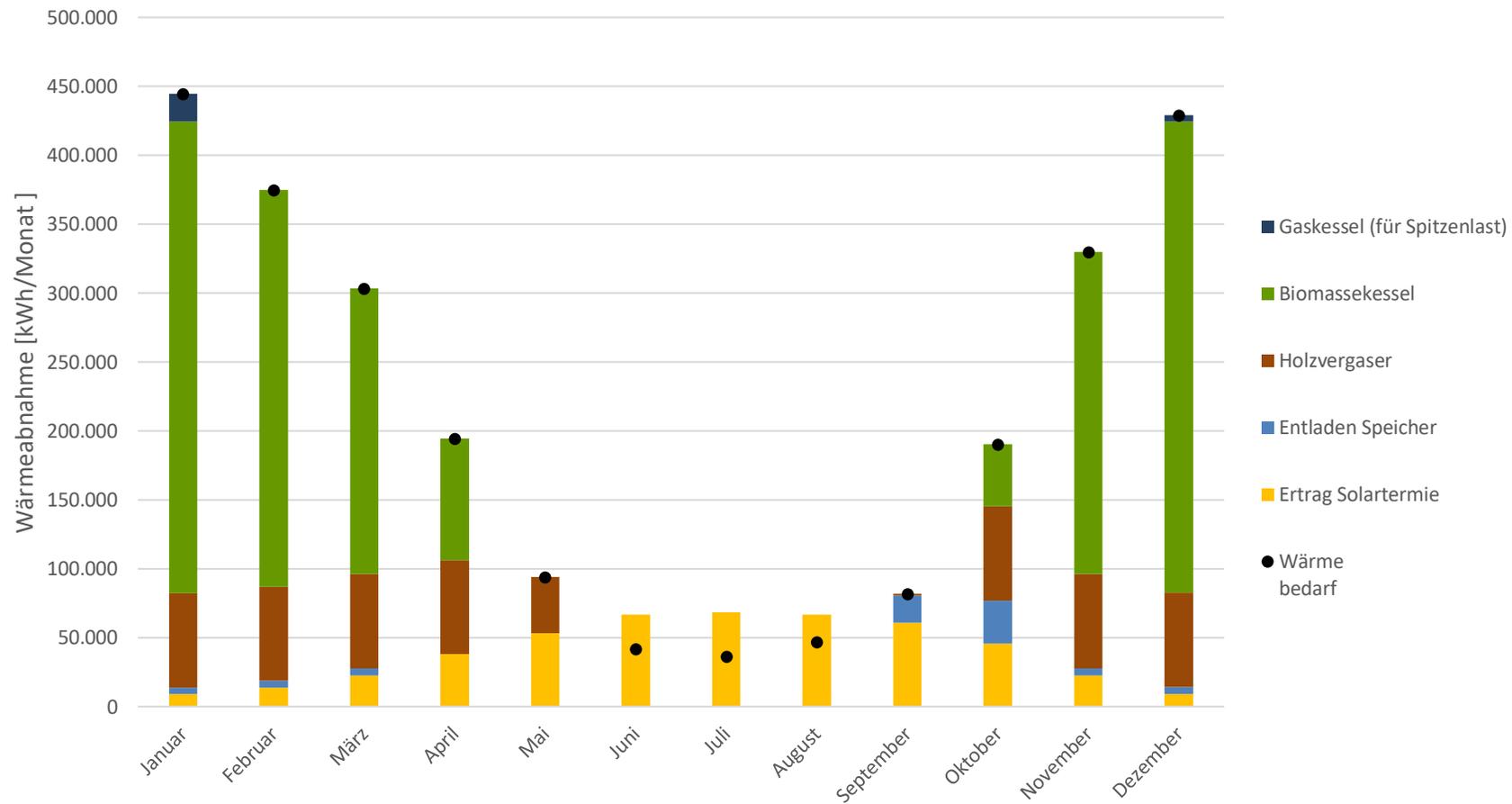


Abbildung 25: monatliche Verteilung der Wärmebereitstellung in Szenario 1: Versorgung der öffentlichen Gebäude

7.2.2 Versorgungsszenario 2

Abbildung 26 veranschaulicht die Verteilung auf die verschiedenen Verbraucher, wobei deutlich zu erkennen ist, dass der in der Variante 1 betrachtete Anteil der öffentlichen Gebäude nur ca. 20 % des Gesamtbedarfes ausmacht.

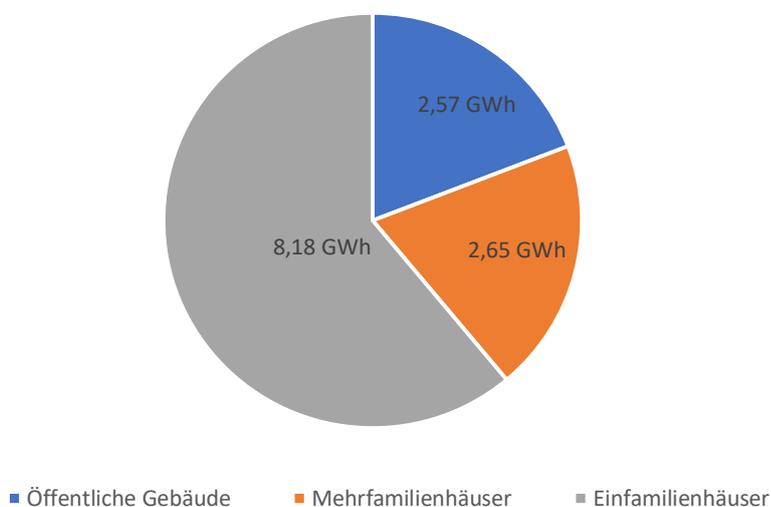


Abbildung 26: Wärmebedarf des Quartiers (Versorgungsszenario 2/ alle Gebäude)

Der gesamte Wärmebedarf ist mit 13.400 MWh/a deutlich höher als in Versorgungsszenario 1. Gleichzeitig steigt auch die verfügbare Dachfläche und das damit verbundene Potential zur Solarthermie Nutzung. Das theoretisch nutzbare solarthermische energetische Potential beträgt ca. 7.500 MWh/a. Um diese zu 100 % nutzen zu können, wäre ein Speicher von 73.500 m³ notwendig (vgl. Kapitel 6). Diese Dimension würde zu einem sehr hohen investiven sowie technischen Aufwand führen. Darüber hinaus müssten 90 % der Privathaushalte der Installation einer Solarthermieanlage auf ihrem Dach zustimmen. Aus diesem Grund wird der Anteil des genutzten Solarpotentials bei der Erstellung des Energiekonzeptes auf 44 % reduziert, so dass weniger als die Hälfte der Haushalte eine Solarthermieanlage installieren müsste. Der Wert von 44 % ergibt sich aus dem Ansatz, dass bei dieser Auslegung, ca. 350 MWh/a Wärme im Sommer als Überschuss generiert werden, die von einer realistischen Speichergröße von 13.000 m³ aufgenommen werden können. Obwohl nicht das volle Solarpotential ausgeschöpft wird, kann mit dieser Auslegung 22 % des Jahresbedarfs durch Solar-

thermie gedeckt werden. In diesem Szenario wird die gesamte zur Verfügung stehende thermische Biomasse durch einen 500 kW Biomassekessel und einen 100 kW_{th} Holzvergaser thermisch komplett verwertet. Die Trocknung der Biomasse wird wie in Szenario 1 durch ein zusätzliches BHKW mit thermischer Energie versorgt. Die Dimensionierung dieser Anlage bleibt gleich, da die größere Menge an Biomasse über einen größeren Zeitraum (getrocknet) zu Brennstoff verarbeitet wird. Um den restlichen Energiebedarf von ca. 7,4 MWh zu decken wird ein 860 kW und ein 580 kW BHKW eingesetzt. Wie in Szenario 1 wird auch in diesem Energiekonzept ein Redundanzsystem integriert. Da bei – 10 °C Außentemperatur zu Versorgung des gesamten Quartiers 17,6 MW notwendig sind werden die Spitzenlast Gaskessel mit insgesamt 10 MW ausgelegt.

Tabelle 12: Energieversorgung des gesamten Quartiers (Szenario 2)

Komponente	Leistung [kW _{th}]	Wärmemenge [MWh/a]
Solarthermie	3.000	2.600
Speicher (Solarthermie in Speicher geladen)		(457)
Biomassekessel	500	2.524
Holzvergaser	100	547
BHKW Trocknung	270	1.460
BHKW 1	860	2.945
BHKW 2	580	2.672
Spitzenlastkessel 1 + 2	2 x 5.000	2.082

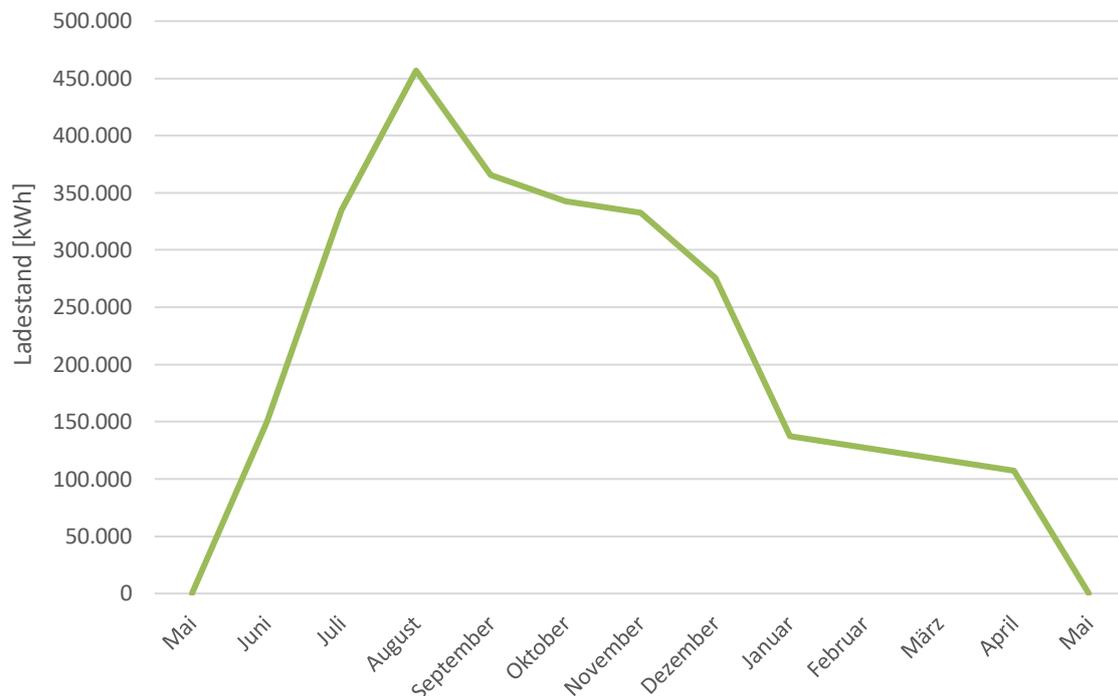


Abbildung 27: Speicherbeladung im Jahresverlauf in Szenario 2: Versorgung der öffentlichen und privaten Gebäude

Der Speicher hat in diesem Szenario; neben dem Einsatz zum Saisonalen Ausgleich des Solarthermie Ertrags, besonders die Funktion der Kompensation der Lastspitzen. Diese Funktion soll sicherstellen, dass die drei eingesetzten BHKWs auf Nennlast durchlaufen können. Dies ermöglicht eine deutlich kleinere Dimensionierung der Anlagen. Im Winter, bei Abnahmen unter Nennlast, beladen die BHKWs den Speicher so dass bei hoher Leistungsabnahme wieder entladen werden kann. Damit der Speicher im Winter verstärkt zur Leistungsfähigkeit der technischen Energieversorgungsanlagen beitragen kann, ist für dieses Szenario die Ladekurve für November bis Januar steil abfallend. In Abbildung 28 stellt sich dies durch den Speichereinsatz (blau) für die hohen Abnahmen im Dezember und Januar dar. Da die BHKWs und der Biomassekessel durch den beschriebenen Einsatz des Speichers nur mit Nennlast betrieben werden, können aus der dargestellten gelieferten thermischen Energie der einzelnen Anlagen die Jahresbetriebsstunden berechnet werden. Daraus ergibt sich, dass die BHKWs 1 und 2 jeweils ca. 2.750 Stunden pro Jahr laufen, das große BHKW 3 ca. 4.600 Betriebsstunden aufweist und der Biomassekessel ca. 6.000 Stunden im Jahr betrieben wird. Diese Volllaststunden sind unter Berücksichtigung des Brennstoffbedarfs und der Stromproduktion der einzelnen Anlagen, Grundlage für die folgenden zwei Kapitel zur Stromnutzung und zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.

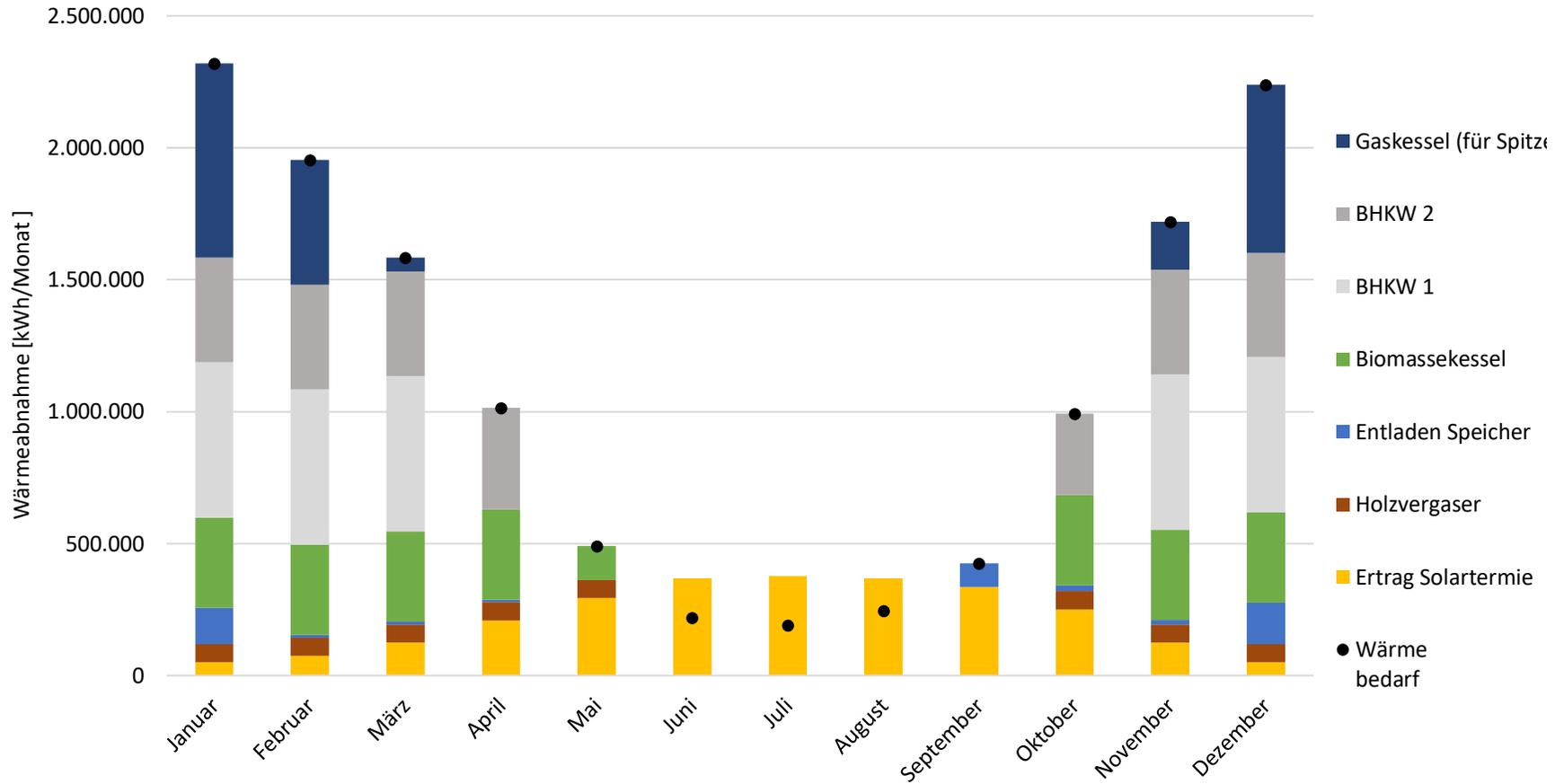


Abbildung 28: monatliche Verteilung der Wärmebereitstellung in Szenario 2: Versorgung der öffentlichen und privaten Gebäude

7.2.3 Versorgungsszenario 3

Zu den in Tabelle 11 dargestellten Verbräuchen der öffentlichen Gebäude (insgesamt 2.600 MWh/a Wärmebedarf) kommt in diesem Szenario das Aaseebad mit einem Wärmebedarf von 3.600 MWh/a pro Jahr hinzu. Durch die Integration des Aaseebades wird der Bedarf mehr als verdoppelt. Die in Variante 1 betrachteten thermischen Erzeugungsanlagen müssen folglich deutlich erweitert werden.

Auf Grund des hohen Bedarfs wird die gesamte zur Verfügung stehende Biomasse genutzt. Durch den sehr hohen Anteil der Biomasseverbrennung, kann es bei dieser Variante sogar dazu kommen, dass zusätzliche Infrastrukturabfälle von Nachbargemeinden mit verwertet werden können. Die thermische Versorgung des Trockners erfolgt, wie in den bisherigen Versorgungsszenarien, über ein zusätzliches BHKW.

Auch in dieser Variante ist ein Redundanzsystem integriert und die Gesamtleistung der Wärmeerzeuger ist, auf den Spitzenlastfall im Winter (bei -10 °C) ausgelegt. Diese Spitzenleistung von ca. 5,3 MW (Szenario 1: 3,4 MW; Aaseebad: 1,9 MW) wird durch Gaskessel mit einer Gesamtleistung von 5 MW gedeckt.

Tabelle 13: Energieversorgung des gesamten Quartiers (Szenario 3)

Komponente	Leistung [kW _{th}]	Wärmemenge [MWh/a]	Anteil Deckung Gesamtbedarf [%]
Solarthermie	503	476	8
Biomassekessel	500	3.183	52
Holzvergaser	100	821	13
BHKW	172	655	11
BHKW Trocknung	270	2.044	(primär für den Trocknerbetrieb)
Spitzenlastkessel 1 + 2	5.000	1.082	16

Die Monatlichen Anteile der Wärmeerzeugung über ein Jahr gesehen ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

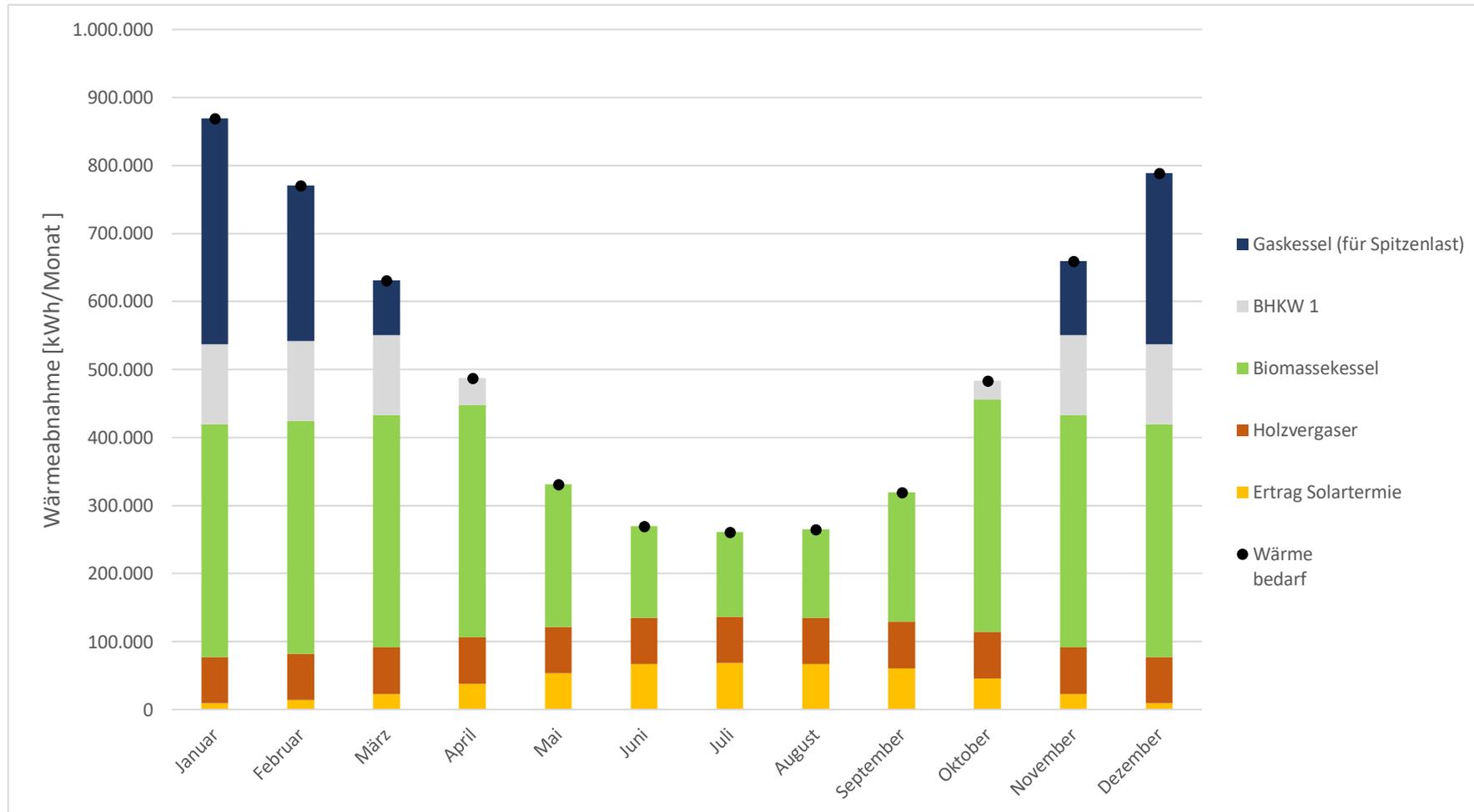


Abbildung 29: monatliche Verteilung der Wärmebereitstellung in Szenario 3: Versorgung der öffentlichen inkl. Aaseebad

Durch die im Vergleich zu Szenario 1 deutlich höhere Abnahme im Sommer, wird durch die Solarthermie kein Überschuss an thermischer Energie mehr erzeugt. Dadurch wird ein Saisonspeicher überflüssig. Tagesschwankungen müssen bei diesem Szenario von den Wärmespeichern in den Gebäuden ausgeglichen werden.

7.2.4 Versorgungsszenario 4

Dieses Szenario beinhaltet alle Wärmeabnehmer des Quartiers (öffentlich und privat) und das Aaseebad. Der gesamte jährliche thermische Energiebedarf liegt somit bei 17.260 MWh/a, die anteilige Verteilung ist in Abbildung 30 dargestellt.

Die zur thermischen Versorgung erforderlichen Wärmeerzeuger sind in Tabelle 14 dargestellt. Die Deckung der Spitzenlast von 17,5 MW erfolgt wiederum durch Gaskessel.

Tabelle 14: Energieversorgung des gesamten Quartiers (Szenario 4)

Komponente	Leistung [kWth]	Wärmemenge [MWh/a]
Solarthermie	4.842	4.177
Speicher (Solarthermie in Speicher geladen)		(443)
Biomassekessel	500	2.590
Holzvergaser	100	585
BHKW Trocknung	270	1.460
BHKW 1	860	2.945
BHKW 2	860	3.954
Spitzenlastkessel 1 + 2	3 x 5.000	2.713

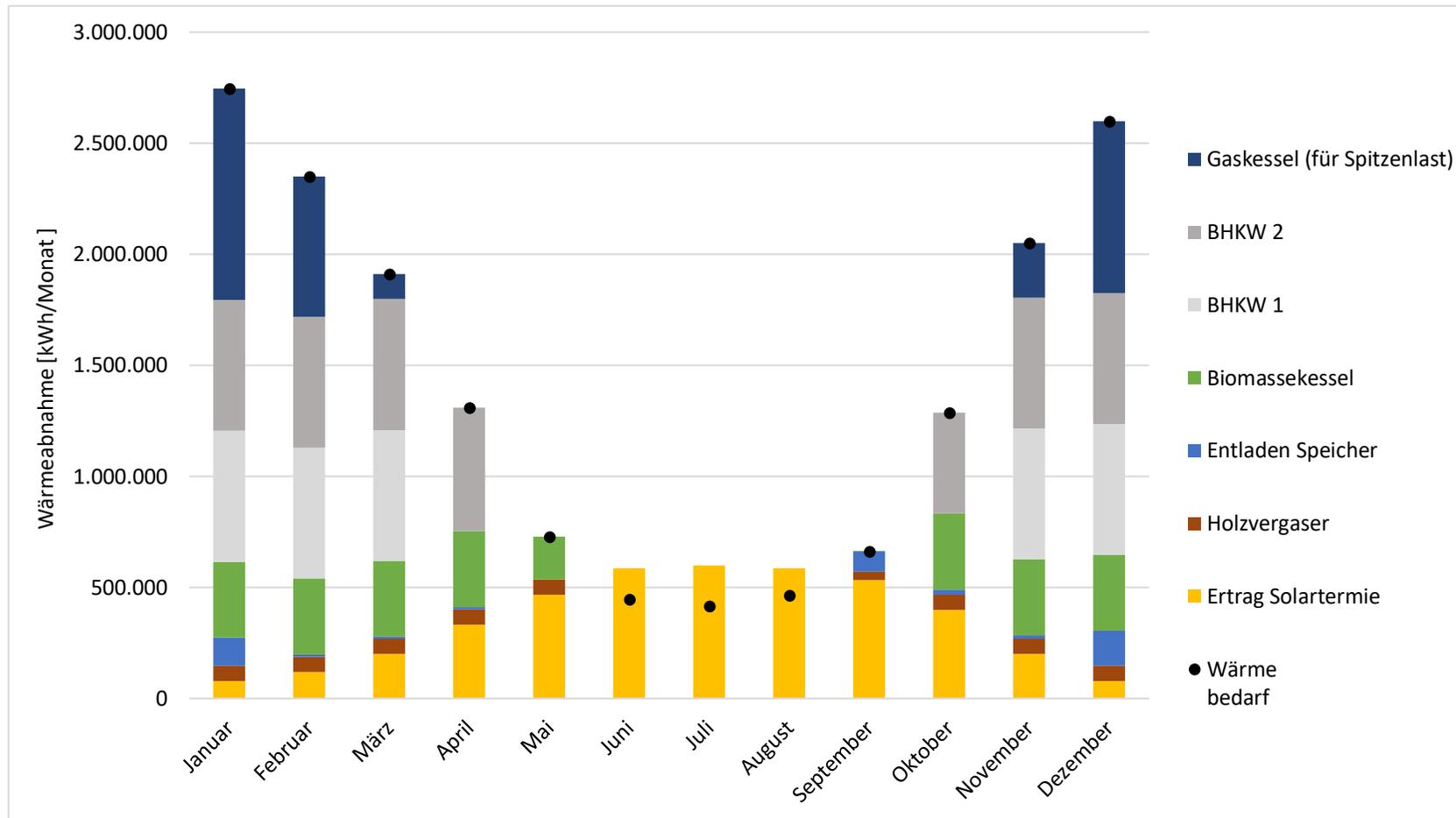


Abbildung 30: monatliche Verteilung der Wärmebereitstellung in Szenario 4: Versorgung der öffentlichen und privaten Gebäude

Aufgrund der hohen Wärmeabnahme durch das Schwimmbad im Sommer kann bei dieser Variante gegenüber Variante 2, 70 % des verfügbaren Solarpotentials genutzt werden. Der im Sommer erzeugte thermische Überschuss bleibt dadurch immer noch bei einer Energiemenge von ca. 443 MWh/a, die von einem Saisonspeicher mit einem Volumen von ca. 12.700 m³ aufgenommen werden können. Eine weitere Veränderung gegenüber Variante 2 ist der Ersatz des kleinen BHKW 2 durch ein weiteres großes BHKW. Insgesamt sind alle Anlagen stärker ausgelastet, was sich auch in der Wirtschaftlichkeit widerspiegelt (vgl. Kapitel 9).

8 Stromnutzung

Die Eigennutzung des erzeugten Stroms stellt die kosteneffektivste Variante dar, da so durch jede kWh der Strompreis von derzeit 29 ct eingespart wird. Zu beachten ist jedoch, dass 40 % der EEG-Umlage dennoch zu zahlen sind (EEG 2018: 6,792 ct/kWh) und auch die Netznutzung mit 2,39 ct/kWh bezahlt werden muss.

Bei Einspeisung des Stroms in das öffentliche Netz wird dieser mit dem üblichen Preis (durchschnittlicher Preis für Grundlaststrom an der EEX) vergütet. Hinzu kommt die KWK-Vergütung bei Netzeinspeisung:

- Für den KWK-Leistungsanteil von bis zu 50 kW: 8 ct/kWh
- Für den KWK-Leistungsanteil von mehr als 50 kW und bis zu 100 kW: 6 ct/kWh
- Für den KWK-Leistungsanteil von mehr als 100 kW und bis zu 250 kW: 5 ct/kWh
- Für den KWK-Leistungsanteil von mehr als 250 kW und bis zu 2 MW: 4,4 ct/kWh
- Für den KWK-Leistungsanteil von mehr als 2 MW: 3,1 ct/kWh

Um die Erlöse aus der Stromproduktion zu erhöhen und so den Wärmepreis zu senken und die Wirtschaftlichkeit des Netzes zu erhöhen, ist ein Bürgerstromkonzept möglich. Bei dem der erzeugte Strom an die Bürger verkauft wird, die auch an das Nahwärmenetz angeschlossen sind.

Wird der Strom nicht in das öffentliche Netz eingespeist so wird ein verminderter KWK-Zuschlag gezahlt.

- Für den KWK-Leistungsanteil von bis zu 50 kW: 4 ct/kWh
- Für den KWK-Leistungsanteil von mehr als 50 kW und bis zu 100 kW: 3 ct/kWh
- Für den KWK-Leistungsanteil von mehr als 100 kW und bis zu 250 kW: 2 ct/kWh
- Für den KWK-Leistungsanteil von mehr als 250 kW und bis zu 2 MW: 1,5 ct/kWh
- Für den KWK-Leistungsanteil von mehr als 2 MW: 1 ct/kWh

9 Wirtschaftlichkeit

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit wird für die erzeugte Wärme ein Preis pro kWh Wärmeenergie berechnet. Dieser so genannte Wärmepreis setzt sich aus mehreren Größen zusammen. In dieser Studie werden die im Folgenden genannten vier wichtigsten Größen als Datengrundlage zur Berechnung des Wärmepreises genutzt:

1. Abschreibungskosten
2. Wartungskosten
3. Brennstoffkosten
4. Einnahmen durch Stromeinspeisung

Die Abschreibungskosten ergeben sich aus den in Tabelle 16 dargestellten Investitionen, verknüpft mit der Abschreibungsdauer. Die Investitionen sind Preise aus zurückliegenden Projekten und unverhandelten Angeboten, so dass der Kostenpunkt „1. Abschreibungskosten“ eher konservativ angesetzt wurde. Die Wartungskosten sind mit 2 % der Investitionskosten für die Anlagen angesetzt. Kostenpunkt 3 und 4 ergeben sich aus der Betriebsdauer der BHKWs. Der Gaspreis wird als konstant mit 6 ct/kWh angesetzt, die Einnahmen durch die Stromerzeugung sind in Kapitel 8 erläutert.

In Tabelle 15 sind die vier Versorgungsszenarien gegenübergestellt. Bei dem Versorgungsszenario 1 entfallen die größten Kosten auf die investitionsbedingten Abschreibungen und die Wartung. Dabei kommt der Effekt zum Tragen, dass die Anlagenperipherie bezogen auf die Kilowattstunde bei kleinerer Dimensionierung teurer wird. Ohne Förderung kommt dabei ein Wärmepreis von ca. 15,83 ct/kWh zustande. Da bei diesem Szenario die Betriebskosten durch das Nutzen der kostenfreien Ressourcen Infrastrukturabfälle und Solarenergie vergleichsweise gering sind, wirkt sich eine Förderung der Investitionen sehr positiv auf den Wärmepreis aus (vgl. Tabelle 15). Mit dem Förderprogramm Wärmenetze 4.0 kann der Wärmepreis auf 6,58 ct/kWh gesenkt werden. Mit dem Förderprogramm für investive Klimaschutz-Modellprojekte kann ein Wärmepreis von minimal 2,88 ct/kWh erreicht werden. Bei den Förderungen ist grundsätzlich zu beachten, dass das Projekt nach den vorgegebenen Rahmenbedingungen umgesetzt werden muss, um die entsprechenden Fördermittel beziehen zu können!

Bei einer Wärmebereitstellung für Szenario 2 die fünf Mal größer ist, als in Szenario 1, sind die Investitionskosten bei Szenario 2 nur doppelt so hoch. Darüber hinaus führen die erhöhten Einsparungen durch die Stromerzeugung der BHKWs zu einem Wärmepreis von 5,02 ct/kWh.

Dies ist bereits ohne Förderung ein Wärmepreis, der unter dem Preis liegt, den die Anwohner mit einer Gastherme zahlen würden (Erdgaspreis für das betrachtete Siedlungsgebiet: 6,43 ct/kWh). Mit der Förderung für Klimaschutz Modellprojekte sinkt der Wärmepreis auf nur 0,22 ct/kWh.

Aus Variante 3 und 4, bei denen das Aaseebad in das Netz integriert ist, resultiert jeweils ein erneut geringerer Wärmepreis, gegenüber den Varianten ohne Aaseebad. Die Entfernung zum Quartier verursacht Mehrkosten in Höhe von ca. 282.000 € (vgl. Tabelle 16). Der vermehrte Einsatz der BHKWs und die damit verbunden hohen Einnahmen durch den Stromverkauf führen bei Variante 4 sogar zu einem negativen Strompreis.

Tabelle 15: Wirtschaftlichkeit vier Szenarios

Versorgungsszenario	1	2	3	4
Investitionskosten	5.676.696 €	11.069.650 €	5.639.705	11.302.358 €
Jährliche Kosten (Abschreibung + Wartung + Brennstoff)	721.300 €	2.266.790 €	1.006.383 €	2.499.601 €
Jährliche Einsparungen (Einnahmen durch Laubnutzung und Stromerzeugung)	284.855 €	1.554.880 €	523.344	1.870.987 €
Wärmepreis	15,83 ct/kWh	5,02 ct/kWh	7,87 ct/kWh	3,71 ct/kWh
Mit Förderung Wärmenetze 4.0 (maximale Förderquote: 50 %)				
Einsparung bei Investition*	2.838.348 €	5.534.824 €	2.819.853 €	5.651.179 €
neuer Wärmepreis*	6,58 ct/kWh	1,59 ct/kWh	3,99 ct/kWh	0,96 ct/kWh
Mit Förderung investive Klimaschutz-Modellprojekte (maximale Förderquote: 70 %)				
Einsparung bei Investition*	3.973.690 €	7.748.754 €	3.947.794 €	7.911.650 €
neuer Wärmepreis*	2,88 ct/kWh	0,22 ct/kWh	2,44 ct/kWh	-0,14 ct/kWh

* vorausgesetzt alle Rahmenbedingungen der Förderungen werden erfüllt!

Grundsätzlich handelt es sich bei der Kalkulation dieser Wärmepreise um Richtwerte zur Einschätzung der Wirtschaftlichkeit im Rahmen dieser Studie. In der Praxis ergeben sich die Preise für die Wärmeabnehmer aus Contracting-Modellen. Hinzu kommt, dass in dem Wärmepreis bereits die Investitionen für den Anschluss am Wärmenetz und die Anlagenkomponenten, wie Wärmespeicher in den Gebäuden, mit integriert sind. Bürgerbeteiligungen durch eine Anschlussgebühr oder Anwohner-Energiegenossenschaften würden den praktischen Wärmepreis weiter reduzieren. Hinzu kommt das durch die Umstellung des betreffenden Quartiers, von Kohle auf einen andere Energieträger, langfristig Kosten für die potentiellen Kunden des Wärmenetzes entstehen würden, die nicht durch die errechneten Wärmepreisen in Tabelle 15 abgebildet werden.

Tabelle 16: Kosten der vier Szenarien im Vergleich

Komponente	Investition [€]			
	Kosten Szenario 1	Kosten Szenario 2	Kosten Szenario 3.1	Kosten Szenario 3.2
Biomassekessel	140.000	160.000	140.000	160.000
Gaskessel	132.149	332.000	132.149	332.000
BHKW für Trocknung	202.000	202.000	202.000	202.000
Holzvergaser	300.000	300.000	300.000	300.000
BHKW 1	-	408.096	408.096	408.096
BHKW 2	-	382.000	-	382.000
Trocknungsanlage	160.000	160.000	160.000	160.000
Presse	68.000	68.000	68.000	68.000
Fördereinrichtung	20.000	20.000	20.000	20.000
Lagercontainer	30.000	30.000	30.000	30.000
Brennstoffbunker	25.000	25.000	25.000	25.000
Steuerung & Elektroarbeiten	50.000	65.000	50.000	65.000
Isolierung	20.000	45.000	20.000	45.000
Gebäude trockener Brennstoffe	80.000	80.000	80.000	80.000
Gebäude Energiezentrale	150.000	220.000	150.000	220.000
Solarpanels (inkl. Speicher in Gebäuden)	3.485.056	5.928.359	3.485.056	5.928.359
Saisonspeicher	489.491	1.448.285		1.448.285
Nahwärmenetz	230.000	616.000	230.000	616.000
Montage	50.000	70.000	50.000	70.000
Rohrleitungen Pumpen	45.000	65.000	45.000	65.000
Mehrkosten durch Netzanbindung Aaseebad	-	-	282.500	282.500
Summe	5.676.696	11.069.649	5.639.705	11.302.358

10 Fazit

Die Versorgungsszenarien stellen vier mögliche Energiekonzepte dar, die sich in der Dimension bzw. der abgenommenen Wärmemengen und Leistungen unterscheiden. Bei den Konzepten 1,2 und 4 wird deutlich, dass das Solarpotential aufgrund der erforderlichen Speicherung nicht unbegrenzt nutzbar ist. Die Integration des Aaseebades in das Energiekonzept ermöglicht durch den erhöhten Bedarf im Sommer jedoch eine deutlich höhere Abnahme der Solarenergie und führt bei Variante 3 sogar dazu, dass die gesamte Solarenergie genutzt werden kann. Grundsätzlich ist es am effektivsten, die Solaranlagen mindestens so groß zu dimensionieren, dass die Grundlast im Sommer zur Warmwasserbereitung gedeckt werden kann. Die obere Grenze ergibt sich aus der begrenzten Dimension des Wärmespeichers. Auch wenn die Kapazität des Speichers nur einen geringen Anteil des Wärmebedarfs im Winter deckt, dient er weiterhin zum Lastausgleich des Gesamtsystems. Dadurch können die technischen Anlagen zur Wärmeerzeugung kleiner dimensioniert und ohne Modulation betrieben werden.

Da das erste Konzept (sowohl Verbraucher als auch Erzeuger), vollständig in der anderen drei Konzepten enthalten ist, ist es möglich zunächst nur Konzept eins zu realisieren und bei ausreichendem Interesse der Bürger kann die Wärmeversorgung mit dem zweiten Konzept bzw. dem 3 und 4 Konzept aufgestockt werden. Dies kann auch sukzessive und an den wachsenden Bedarf angepasst erfolgen. Der Saisonspeicher müsste dabei allerdings von Anfang an größer dimensioniert werden.

Unter nachhaltigen Gesichtspunkten zeigt sich, im Vergleich der vier Versorgungsszenarien, dass die regionalen Potentiale zur regenerativen Energiebereitstellung für das kleiner angelegte Szenario 1 ausreichen, um 99% der Heizenergie bereit zu stellen. Neben dem hohen Innovationsgrad durch die thermische Verwertung der Infrastrukturabfälle und den Saisonspeicher sorgt diese nachhaltige Energiebereitstellung für sehr gute Voraussetzung bei der Förderfähigkeit. Bei dem Versorgungsszenario 2 kommen drei BHKWs und ein Gaskessel zum Einsatz. Diese können durch das Nutzen des in Kapitel 5.3 beschriebenen regionalen Potentials zur „Greengas“-Beschaffung allerdings auch nachhaltig und regenerativ betrieben werden. Selbiges gilt für die BHKWs in Szenario 3 und 4.

Bzgl. der thermischen Biomasseverwertung wurde im Rahmen dieser Studie auch die Möglichkeit des Einsatzes von Kurzumtriebsplantagen beschrieben. Im Zuge der Berechnungen

zu den Versorgungsszenarien wurden diese nicht mit einbezogen, da diesbezüglich erst die flächentechnische Nutzbarkeit der angedachten Flächen geklärt werden muss. Der Einsatz von Wärmepumpen zur zentralen Wärmeversorgung eines Nahwärmenetzes für Bestandsgebäude ist, aufgrund des Temperaturniveaus, nicht wirtschaftlich.

In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit ist es sehr empfehlenswert eine Förderfähigkeit der arianten weiter zu untersuchen und ein Konzept für ein Contracting-Modell zu entwickeln. Wie in Tabelle 17 dargestellt, kann durch eine Projektförderung der Wärmepreis deutlich verringert werden. Durch die Integration des Schwimmbades, kann in der Summe eine gute Wirtschaftlichkeit bereits ohne Förderung erreicht werden (vgl. Szenario 1 und 2). Grundsätzlich lässt sich anhand der Betrachtung der verschiedenen Szenarien feststellen, je höher die Wärmeabnahme, desto wirtschaftlicher ist das Gesamtkonzept. Selbiges gilt auch für CO₂-Einsparung, die von ca. 762 kg/a für die kleinste Auslegung bis auf 4.834 kg/a für größte Auslegung ansteigt.

Tabelle 17: Versorgungsszenario 1-4, Wärmepreis und CO₂-Einsparung

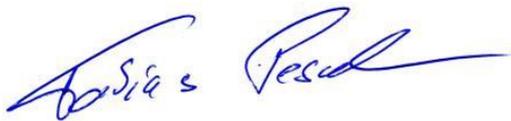
	Versorgungsszenario			
	1	2	3	4
Wärmepreis ohne Förderung	15,83 ct/kWh	5,02 ct/kWh	7,87 ct/kWh	3,71 ct/kWh
Wärmepreis* mit „Wärmenetz 4.0“	6,58 ct/kWh	1,59 ct/kWh	3,99 ct/kWh	0,96 ct/kWh
Wärmepreis* mit „investive Klimaschutz-Modellprojekte“	2,88 ct/kWh	0,22 ct/kWh	2,44 ct/kWh	-0,14 ct/kWh
CO ₂ -Einsparung	762 kg/a	3.710 kg/a	1.481 kg/a	4.834 kg/a

* vorausgesetzt alle Rahmenbedingungen der Förderungen werden erfüllt!

Für diese Studie ist der Einsatz ökologischer Energiequellen nach Folgender Reihenfolge pri-
orisiert:

1. Solar;
2. Biomasse;
3. BHKW;
4. Gaskessel

Bei rein wirtschaftlicher Betrachtung ergeben sich Möglichkeiten, beispielsweise den Solaran-
teil so zu verringern, dass der kostenintensive Saisonspeicher substituiert werden kann. Eine
Erhöhung des BHKW Anteils bietet ein weiteres Potential zur Steigerung der Kosteneffizienz.
Grundsätzlich konnte bereits ohne die Betrachtung aller möglichen technischen Konzepte, so-
wie der verschiedenen Finanzierungsmodelle festgestellt werden, dass sich die Wirtschaftlich-
keit durch die gegebenen Voraussetzungen als sehr positiv darstellt. Aus diesem Grund ist es
unbedingt zu empfehlen, die anstehenden Veränderungen bei der Wärmeversorgung durch
den Wegfall der günstigen Energieressource Deputatkohle für einen Umbruch, zur zentralen,
effizienten, wirtschaftlichen und klimafreundlichen Wärmeversorgung, zu nutzen.



Tobias Peselmann
Dipl.-Ing.

11 Literaturverzeichnis

- [1] „google maps,“ Google, [Online]. Available: www.google.de/maps. [Zugriff am 18 11 2018].
- [2] V. Quaschin, regenerative Energiesysteme, Technologie - berechnung - Simulation, 6. Auflage, München: Hanasa Verlag München, 2009.
- [3] D. -I. H. Recknagel, D.-I. E. Sprenger und P. D.-I. K.-J. Albers, Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, 77 Auflage, München: Deutscher Industrieverlag, 2015.
- [4] F. n. R. e. (FNR), Leitfaden feste Biobrennstoffe, Gülzow-Prüzen: Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2014.
- [5] K. f. T. u. B. i. d. L. e. (KTLB), Faustzahlen für die Landwirtschaft 14. Auflage, Darmstadt: KTLB, 2009.
- [6] F. N. R. e. (FNR), Festbrennstoffe Biokraftstoffe Biogas, Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2018.
- [7] I. Nordrhein-Westfalen, „Landwirtschaftskammer,“ [Online]. Available: <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/naturschutz/biodiversitaet/oevfflaechen/index.htm>. [Zugriff am 27 11 2018].
- [8] BUND, „Ermittlung des Potenzials energetisch nutzbarer Resthölzer aus der Landschaftspflege im PLENUM- und Biosphärengebiet Schwäbische Alb,“ 2009.
- [9] E.-R. P. D.-I. Schramek, H. D.-I. Recknagel und E. D.-I. Sprenger, Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, München: Oldenbourg Industrieverlag, 2007.
- [10] D. u. Mangold, „Solarthermie-2000 TP3: Solar unterstützte Nahwärme – Ergebnisse der wissenschaftlichen Begleitforschung,“ OPET-Seminar 2001, Solarunterstützte

Nahwärmeversorgung, Hrsg. Steinbeis-Transferzentrum Energie-, Gebäude- und Solartechnik, Stuttgart, 2001.

[11] *Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWKG)*, 2015 zuletzt geändert am 17. Juli 2017.

[12] B. f. Finanzen, „Afa-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagengüter (Afa-Tabelle "AV"),“ juris-Fachportal, 2000.

[13] B. d. Finanzen, „AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig "Energie und Wasserversorgung",“ Juris-Fachportal, 1995.

[14] „<https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/naturschutz/biodiversitaet/oevfflaechen/index.htm>,“ [Online].