

Projekt 2013-15

Holzvergaser auf Basis Holzpellets und BHKW inkl. Monitoring im BHKW Landwasser

Abschlussbericht



Ansprechpartner

Wolfram Schmidt

Erstellungsdatum

21.07.2016

Inhaltsverzeichnis

1	Projektüberblick	3
1.1	Ausgangslage.....	3
1.2	Wissenschaftliche und technische Ziele	3
1.3	Herausforderungen, Chancen und Risiken des Vorhabens.....	3
2	Projektbeschreibung.....	4
2.1	Projektablauf	4
2.1.1	Projektidee	4
2.1.2	Terminplan.....	4
2.1.3	Budgetplanung und Förderung	5
2.2	Technische Umsetzung	5
2.2.1	Technische Daten der Anlage.....	6
2.2.2	Anlagenbau (Schema und Pläne).....	9
2.3	Anlagenbetrieb	13
2.4	Ökologischer Nutzen	18
2.5	Betrachtung der Wirtschaftlichkeit	18
2.5.1	Investition	18
2.5.2	Betriebs- und Verbrauchskosten	18
2.5.3	Erlöse / Verbesserung der Wirtschaftlichkeit.....	19
2.6	Wirkung der Umsetzung (Ausblick).....	19
3	Zusammenfassung.....	20

1 Projektüberblick

1.1 Ausgangslage

In Freiburg - Landwasser betreibt die badenovaWÄRMEPLUS GmbH & Co. KG seit 1990 eine BHKW-Anlage, deren erzeugte Wärme über ein 15 km langes Nahwärmenetz den Freiburger Stadtteil Landwasser versorgt. Als Brennstoff für die Gasmotoren kam zu Beginn überwiegend Deponiegas der Mülldeponie Eichelbuck zum Einsatz. Aufgrund der in den letzten Jahren gesunkenen Deponiegasmenge sanierte der Betreiber die Anlage im Jahr 2011 und installierte zwei neue BHKW-Module, die seither mit einer Mischung aus Bio-, Deponie- und Bioerdgas betrieben werden. Mit dieser innovativen Lösung werden ca. 40% des Wärmebedarfs aus erneuerbaren Energien gedeckt. Auf der Suche nach neuen Technologien, die den Anteil an regenerativ erzeugter Wärme und regenerativ erzeugtem Strom weiter vergrößern, stieß man auf eine mit Holzpellets betriebene Holzvergaseranlage. Maßgebend für die Auswahl einer neuen Technologie ist, technisch einwandfrei funktionierende, wartungsarme und wirtschaftlich zu betreibende Anlagen zu installieren und gleichzeitig einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. Dafür sah man mit dem Holzvergaser die ideale Lösung, dessen Funktionsweise in den folgenden Abschnitten erklärt wird.

1.2 Wissenschaftliche und technische Ziele

Ziel ist es, durch den Einsatz des Holzvergasers den Anteil der regenerativen Energien an der Energieversorgung am Standort Landwasser zu erhöhen, dabei eine innovative Technik zu erproben und gleichzeitig deren Wirtschaftlichkeit nachzuweisen.

1.3 Herausforderungen, Chancen und Risiken des Vorhabens

Bei dieser Holzvergaser-Anlage werden Holzpellets anstatt der bisher für einen Holzvergaser üblichen Holzhackschnitzel verwendet. Diese Holzpellets sind in ihrer Größe genormt und besitzen dadurch homogene Brenneigenschaften, die eine gleichmäßige und wartungsarme Vergasung ermöglichen. Da der Holzpellets-Vergaser zum ersten Mal in einem Heizwerk zur Wärmeversorgung zum Einsatz kommt, ist diese Technik für badenovaWÄRMEPLUS ein neuer Entwicklungsbereich.

Bei den innovativen Projekten ist es wichtig zu wissen, dass die Etablierung einer neuen Technologie und damit deren wirtschaftlicher Betrieb entsprechende Zeit brauchen. Wird ein technischer und wirtschaftlicher Betrieb, wie geplant, umgesetzt, bietet sich diese Technik zur Erhöhung der Strom- und Wärmeeinspeisung aus erneuerbaren Energien an.

2.1.3 Budgetplanung und Förderung

Das Projekt wurde von dem badenova Innovationsfonds gefördert. Die Höhe des Förderbeitrages errechnet sich aus den Ausgaben zum Baukostenanteil von 20% und zum übrigen Kostenanteil von 50%. Der Förder-Höchstbetrag liegt bei 250.000 Euro. In Tabelle 2 ist die Verteilung der Förderung je nach Bereich und Zeit dargestellt.

Tabelle 2: Förderung des Projekts

	2012	2013	2014	Gesamt-	Förderbeitrag
Personalkosten	-	19.010€	19.010€	38.020€	19.010€
Kommunikation	1.000€	2.000€	2.000€	5.000€	2.500€
Öffentlichkeitsarbeit	-	2.000€	2.000€	4.000€	2.000€
Planungskosten	15.000€	30.900€	5.000€	50.900€	25.450€
Sachkosten	-	564.500€	-	564.500€	282.250€
Baukosten	-	-	-	-	-
Gesamtausgaben	16.000€	618.410€	28.010€	662.420€	250.000€

2.2 Technische Umsetzung

Nach der Etablierung der Vergasertechnik sieht die Strom- und Wärmegewinnung am Standort Landwasser wie in **Abbildung 1** aus. Das Erdgas-BHKW wurde zur Deckung des Eigenstrombedarfes zusätzlich installiert.

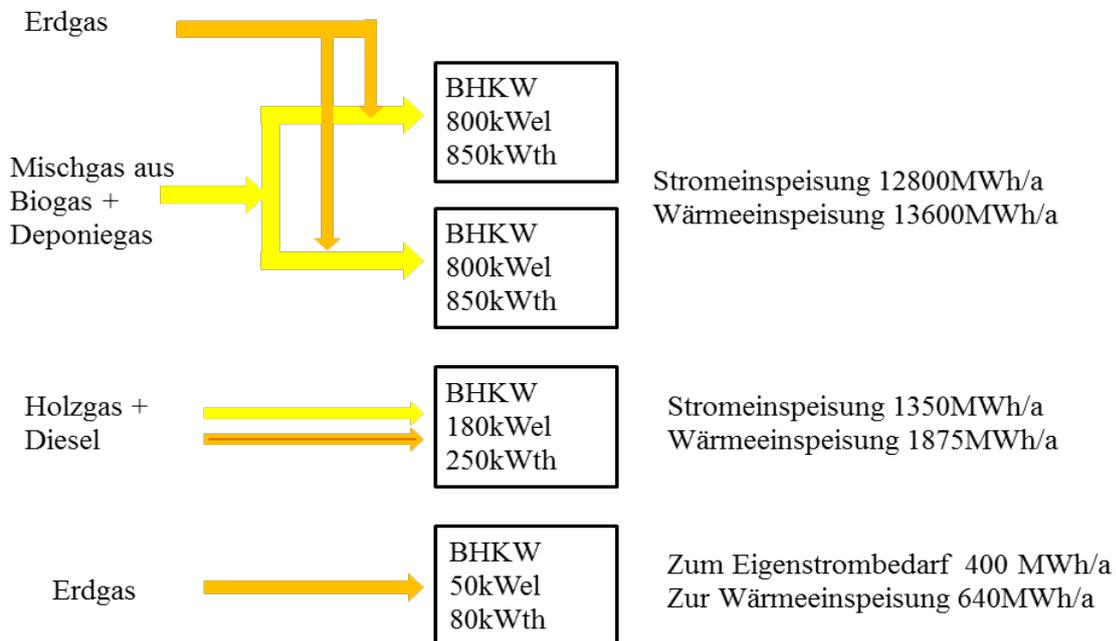


Abbildung 1: Strom und Wärmegewinnung am Standort Landwasser

2.2.1 Technische Daten der Anlage

Die Holzvergaseranlage hat eine elektrische Leistung von 180 kW und eine thermische Leistung von 220-250 kW, wobei etwa 70kW aus dem Holzvergasungsprozess ausgekoppelt werden. Bei einer durchschnittlichen jährlichen Laufzeit von 7.500h/a werden 1.350.000 kWh Strom und 1.820.000 kWh Wärme erzeugt.

Unter Vergasung versteht man die Umwandlung eines Festbrennstoffes in ein brennbares Gas unter Einsatz eines Vergasungsmittels [2]. Grundsätzlich besteht eine Biomassevergasung aus den vier Zonen, die in **Abbildung 2** dargestellt ist und im folgendem kurz erklärt wird.

- Trocknungszone (ca. 25°C-75°C; $\lambda = 0$): Bei Temperaturen unterhalb von 100°C beginnt das im Brennstoff gebundene Wasser zu verdampfen. Durch die Erwärmung des Brennstoffs entweicht das Wasser in Form von Dampf.
- Pyrolysezone (ca. 350°C – 650°C; $\lambda = 0$): Unter Pyrolyse versteht man die thermische Zersetzung des Brennstoffes unter Luftabschluss. In diesem Bereich ist die Luftüberschusszahl gleich Null. Der Brennstoff wird durch die zugeführte Wärmeenergie in gasförmige (gasförmige Kohlenwasserstoffverbindungen und CO_2), flüssige (Pyrolyseöle = Teer) und festen Bestandteile (Pyrolysekoks = Holzkohle) zersetzt.

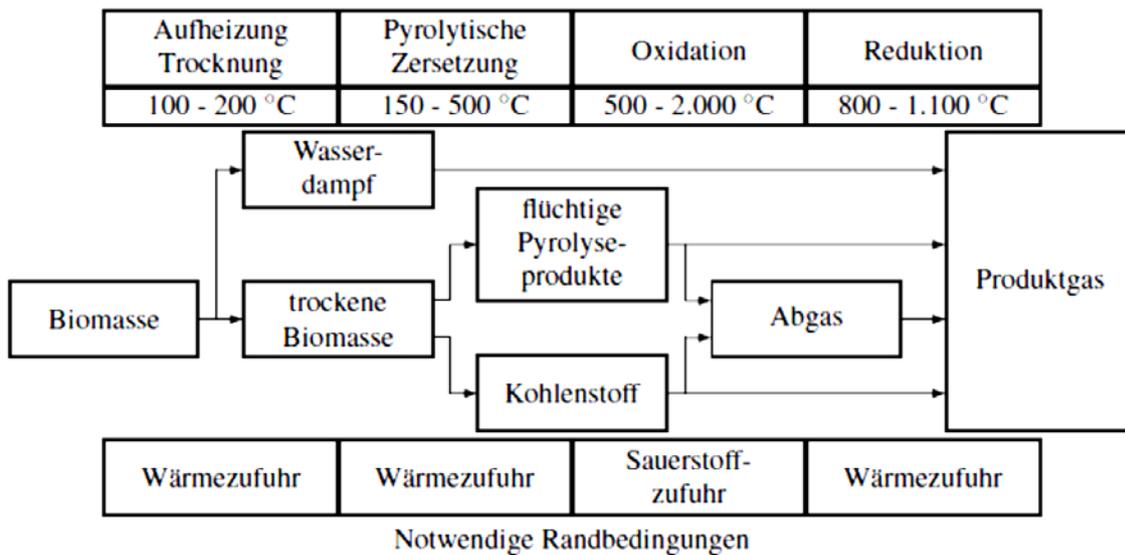


Abbildung 2: Stufen der Biomassevergasung

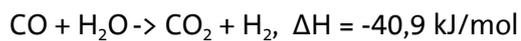
- Oxidationszone (Vergasung) (ca. 700°C – 1200°C; $0 < \lambda < 1$): In diesem Bereich ist die Luftüberschusszahl kleiner als Eins, aber größer als Null. Der Brennstoff (Kohlenstoff) wird unter der Luftzugabe nicht nur zu CO_2 , sondern auch zu CO oxidiert und damit teilverbrannt. Da diese Reaktionen exotherm verlaufen, werden sie als Wärmequelle zur Aufrechterhaltung der chemischen Reaktionen im Gaserzeugungsprozess (pyrolytische Zersetzung und bei der Trocknung und Aufheizung des Brennstoffes) bereitgestellt.



- Reduktionszone (ca. 850 – 1100°C; $\lambda > 1$): Bei der Reduktion wird der Hauptteil der brennbaren Bestandteile des Produktgases gebildet. Die bei der Oxidation entstehenden Verbrennungsprodukte CO_2 und H_2O werden mit festem Kohlenstoff (C) zu CO und H_2 reduziert. Diese endothermen Reaktionen bilden das eigentliche Holzgas.



Parallel zur Reduktion von CO_2 und H_2O finden noch folgende Reaktionen statt.



Abhängig von den gegebenen Bedingungen laufen die einzelnen Prozesse entweder unabhängig (Festbettvergaser) oder parallel voneinander (Wirbelschichtvergaser). Der neu installierte Holzvergaser am Standort Landwasser funktioniert nach dem stationären Wirbelschicht-Prinzip, weshalb im Folgenden die Theorie über dieses Prinzip erläutert wird. Im Reaktor findet eine aufsteigende autotherme Wirbelschichtvergasung statt. Bei einer autothermen Vergasung wird die für Pyrolyse und Vergasung benötigte Wärme im Reaktor selbst erzeugt, in dem eine Teilverbrennung der Biomasse über Luftzufuhr erfolgt. Der Name der Wirbelschicht kommt von der Verwirbelung des Brennstoffes durch den Luftstrom im Reaktor. Die Luftströmung wird so eingestellt, dass die Brennstoffe verwirbeln, aber nicht aus dem Reaktor herausgetragen werden. Aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeit des Gases im Wirbelschichtvergaser bewegen sich die Partikel im Reaktor, die zur Durchmischung und auch zur konstanten Temperatur im Reaktor führt. Der Begriff „stationär“ zeigt, dass die Vergasungsreaktionen nicht nur im Wirbelbett ablaufen, sondern auch im Freiraum oberhalb des Wirbelbettes. In diesem Freiraum setzen sich die Reaktionen zwischen dem Produktgas und vom Gas mitgerissenen feinen Kohlenstoffpartikeln fort. Aufsteigend bedeutet, dass die verschiedenen Stufen der Vergasung von unten nach oben erfolgen.

Die Reaktorbauart eines stationären Wirbelschicht-Prinzips hat den Vorteil, dass der größere Querschnitt des Freiraums (im Vergleich zum Querschnitt des Wirbelbetts) zu geringeren Gasgeschwindigkeiten in diesem Bereich führt und dadurch ein Austrag von Bettmaterial oder Feststoffpartikeln aus dem Reaktor weitgehend verhindert werden kann.

Der ganze Prozess wird über Temperatur, Druckdifferenz und Luftzufuhr gesteuert. Diese drei Parameter beeinflussen sich gegenseitig.

Steuerung Temperatur: Die Temperatur wird bei einem Niveau von 800-900°C gehalten, um ein Aufschmelzen der Asche und damit eine Versintern mit dem Bettmaterial zu vermeiden. Die steigende Temperatur führt zur Erhöhung des H_2 -Gehalts und zur Reduzierung des CO- und CH_4 -Gehalts. Eine Vergasungstemperatur von 700°C sollte nicht unterschritten werden, da es

zu einer erhöhten Teer-Bildung kommt. Die Temperatur-Verteilung im Vergaser hängt auch von dem zugeführten Luftstrom ab.

Steuerung Luftzufuhr: Die Luftzufuhr regelt die homogene Verteilung der Biomasse im Reaktor und auch die Bildung der Vergasungszonen, die auch in Abbildung 2 dargestellt sind. Die Luftüberschusszahl (λ) und die Temperatur ändert sich im Reaktor proportional.

Steuerung Druckdifferenz: Die Druckänderung im Vergasungsreaktor hat einen Einfluss auf die Verschiebung der Reaktionsgleichgewichte. Allgemein führt ein Druckanstieg zu einer CH_4 -Bildung.

Aufgrund ständiger Luftströmung beinhaltet das Produktgas auch Ruß- und Teer. Die Teere sind organische Stoffe, bestehend aus aromatischen Verbindungen, die bei thermischer Zersetzung (in der Pyrolysezone) erzeugt werden. Da Teer bei den darauffolgenden Oxidationschritten nicht vollständig umgesetzt wird, stellt dieser Stoff eines der Hauptprobleme bei der Vergasung dar. Teere verursachen Verkokungen und verschmutzen das Gas, weshalb sie bei der Gasnutzung entfernt werden müssen. Das Gas wird einer Nachbehandlung unterzogen, in der es abgekühlt und von Partikeln befreit wird. Die Teermenge eines Vergasers ist eine Funktion des Temperatur-Zeit-Verlaufs, dem die Partikel und das Gas unterworfen sind, der Position des Eintritts des Ausgangsstoffes in den Reaktor, der Partikelbewegung, der Verteilung der Partikelgrößen, der Gasatmosphäre (O_2 , Wasserdampf, CO_2), der Geometrie des Bettes...[1]. Die Teerbildung kann im Reaktor durch die Temperaturentwicklung beeinflusst werden. Je höher die Temperatur ist, desto niedriger ist die Neigung zur Teerbildung. Das Gas muss über möglichst lange Zeit bei hoher Temperatur im Reaktor verweilen, damit die Teerbildung reduziert wird. Je höher die Verweilzeit der Gase in dieser heißen Zone, desto geringer sind der Teergehalt und desto mehr nähert sich die Gaszusammensetzung dem chemischen Gleichgewicht bei den jeweiligen Reaktionsbedingungen an.

Die Gaszusammensetzung hängt von den Betriebsbedingungen (z.B. Temperatur und Druck) im Reaktor ab. Die Qualität des erzeugten Gases wird nach seinem Brennwert und dem Teer- und Partikelanteil bewertet. Der Heizwert des Holzgases wird von den Gehalten an CO ($H_o=3,509$), H_2 ($H_o=2,995$) und CH_4 ($H_o=9,97$) bestimmt. Weitere Gaskomponenten sind N_2 , CO_2 , H_2O .

Für einen stationären autothermen Wirbelschicht-Vergaser werden die wichtigen Prozessparameter nach [4] wie in Tabelle 3 definiert.

Tabelle 3: Übersicht wichtiger Prozessparameter für stationären Wirbelschicht-Vergaser

Prozessparameter	Vergasungsmittel	Reaktionstemperatur	Brennstoffleistung	Partikelgröße	Wassergehalt	Teergehalt	Staubgehalt
Werte	Luft	bis 950°C	0,5-20 MW	1-50 mm	< 50 %	0,1-23 g/m ³	1-50 g/m ³

2.2.2 Anlagenbau (Schema und Pläne)

Die am Standort Landwasser eingebaute Holzvergaseranlage hat eine elektrische Leistung von 180 kW und eine thermische Leistung von 220-250 kW, wobei etwa 70kW aus dem Holzvergassungsprozess ausgekoppelt werden. Bei einer durchschnittlichen jährlichen Laufzeit von 7.500h/a werden 1.350.000 kWh Strom und 1.820.000 kWh Wärme erzeugt.

Die gesamte Anlage besteht im Wesentlichen aus dem Holzvergaserreaktor inkl. Fördertechnik zum Eintrag der Pellets mittels einer Förderschnecke und zum Austrag der Asche, einer Gaskühlungs- und einer Gasreinigungseinheit sowie dem Holzgas-BHKW.

Die Pellets werden in einer dreistufigen Dosiereinrichtung chargenweise abgewogen. Die Feianteile (ca. 3% der gesamten Pelletsmenge) werden abgetrennt und zur weiteren Verwendung (Verbrennung) in Big Bags gefüllt. Die Pellets werden in 20 kg Chargen von unten durch eine Förderschnecke in den Reaktor eingeschleust und mit Hilfe eines Rührwerks homogen verteilt. Gleichzeitig wird ein Luftstrom von 180 kg/h mit Hilfe eines Seitenkanalverdichters erzeugt und von unten in den Reaktor eingeleitet. Der untere Bereich des Reaktors hat eine konische Form für die Regelung des Vergasungsprozesses, der aus vier Zonen / Temperaturbereichen besteht. Im unteren Bereich der Wirbelschicht wird ein Teil der Pellets verbrannt, um die für Pyrolyse und Vergasung erforderliche Energie zu erzeugen. Ab 200°C zersetzt sich das Holz und es beginnt die Bildung von sogenannten Primärteeren, die aus wasserlöslichen unterschiedlich substituierten einkernigen Phenolen bestehen. Oberhalb von 500°C werden die sauerstoffhaltigen funktionellen Gruppen abgespalten und die Ringsysteme in einer jetzt reduzierten Umgebung weiter dehydriert. Dabei entstehen CO, H₂, CO₂ und H₂O. Ein- bis zweikernige Aromaten entstehen, die als Sekundärteer bezeichnet werden. Oberhalb von 800°C zersetzen sich auch die übrig gebliebenen Ringsysteme. Dabei entstehen weiter H₂ und CO. Das Holzgas enthält ca. 28% CO, 19% H₂ und 2% CH₄. Die restlichen 51%igen Volumen beinhalten CO₂, H₂O und N₂. In **Abbildung 3** ist diese Prozessregelung im Reaktor der Fa. Burkhard ersichtlich.

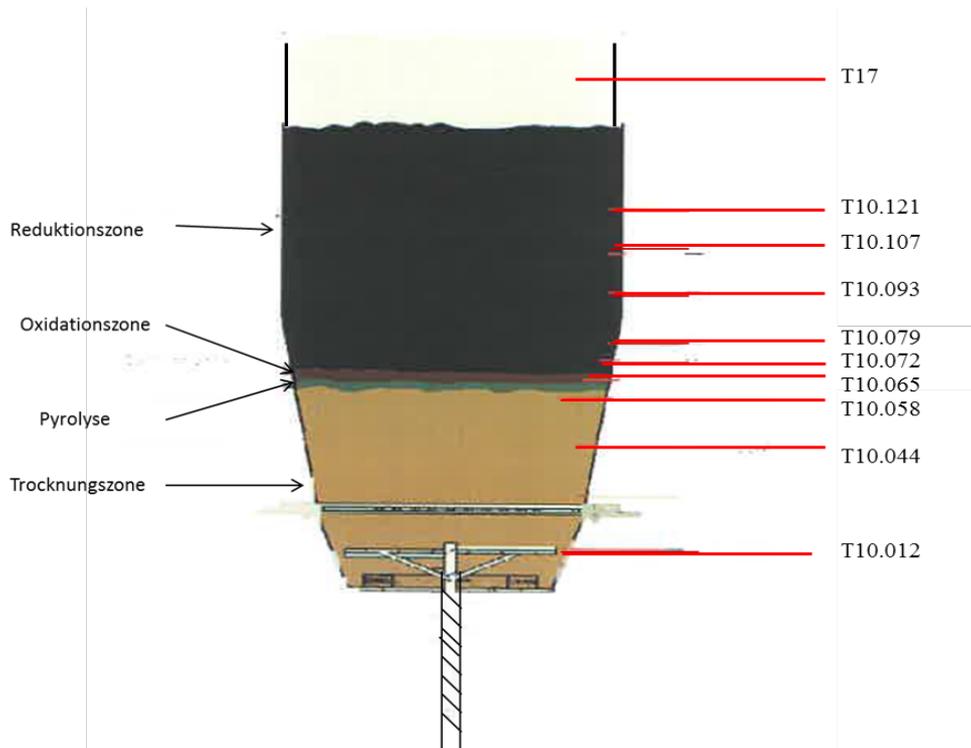


Abbildung 3: Prozessregelung im Vergaserreaktor

Das Produktgas verlässt den Reaktor mit ca. 800 °C und mit ca. 1013 mbar Absolutdruck. Anschließend wird es abgekühlt und von den mitgerissenen Kokspartikeln befreit. Das Gas wird dabei über zwei Wärmetauscher (Mantelrohrwärmetauscher und Rohrbündelwärmetauscher) von 800°C auf 120°C abgekühlt. Der Druck reduzierte sich bis auf 1000mbar. In der ersten Stufe wird der Mantelrohr-Wärmetauscher von oben nach unten durchströmt, in der zweiten Stufe der Rohrbündelwärmetauscher in umgekehrter Richtung. Nach der Abkühlung wird das Gas in einem Schlauchfilter von festen Stoffen und Partikeln befreit. Die Schlauchfilter werden in Abhängigkeit des Druckverlustes regelmäßig gesäubert. Der abgetrennte Koks wird über einen Schleusensystem ausgetragen und in Big Bags zur Entsorgung gesammelt. Die anfallende Koksmenge hängt von der Brennstoffqualität ab und liegt im Durchschnitt bei 2,5% der zugeführten Pelletsmenge. Der bei der Vergasung entstanden Wasserdampf wird im Kondensationskühler verflüssigt und in einem IBC-Behälter gesammelt. Da das Kondensat organische Moleküle beinhaltet, wird es entsorgt. Pro Stunde entstehen ca. 8 Liter Kondensat. Im Kondensationskühler wird das Holzgas weiter auf ca. 30-50°C abgekühlt. Gleichzeitig ist der Druck bis auf 950mbar gesunken.

Da das Gas 100% feucht ist, wird der Druck mit Hilfe eines Seitenkanalverdichters von 950mbar auf 1020mbar erhöht. Durch die gleichzeitige Erhöhung der Temperatur und dadurch reduzierte Gasfeuchtigkeit entsteht keine Kondensation in den Rohrleitungen. Das aufbereitete Gas wird auf die Inhalte analysiert und bei Einhaltung der Gaswerte strömt es über ein gesteuertes Ventil in das BHKW. Die bisher genannten Anlagenkomponenten und deren Eigenschaften sind in der **Tabelle 4** zusammengefasst. Die in **Tabelle 4** zusammengefassten Komponenten des Vergasers sind in **Abbildung 4** dargestellt.

Tabelle 4: Anlagenkomponenten und deren Eigenschaften

Anlagenkomponenten	Eigenschaften
Vergasung	
Fördertechnik	<ul style="list-style-type: none"> - Brennstoffwagesystem - pneumatisch angetriebene Klappen als Schleuse zum Reaktor mit Endlagenüberwachung - Vorlagebehälter mit Füllstandsüberwachung - Pelletszuführung zum Reaktor durch Förderschnecke - pneumatisch angetriebene Klappen als Schleuse zum Filter - vollautomatische Ascheaustragung von Schleuse zu Big Bag
Vergaserreaktor	<ul style="list-style-type: none"> - autothermer Gleichstrom-Wirbelschichtvergaser - vollautomatische Reaktor- und Prozessregelung (Temperatur-, Druck- und Kokshöhenüberwachung) - frequenzgesteuerte Seitenkanalverdichte zur Luft-, Gasförderung - Fackel incl. Zyklon und Aschefass
Gasaufbereitung, Wärmetauscher	<ul style="list-style-type: none"> - Kühlung des Gases durch Rohrbündel-WT und Mantelrohr-WT von ca. 800°C auf 120°C - automatische Wärmetauscherabreinigung - geregelte Heizungspumpe und Sicherheitseinrichtung
Gasaufbereitung, Schlauchfilter	<ul style="list-style-type: none"> - Befreiung des Gases von Feststoffen und Partikeln - Austragung von koks über ein Schleusensystem in Big Bag
Gasaufbereitung, Kondensation	<ul style="list-style-type: none"> - Abkühlung des Gases im Kondensationskühler auf 30-50°C
Gasanalysegerät	<ul style="list-style-type: none"> - CO₂-, CO-, CH₄ und H₂-Sensor, - Aufschaltung der Gasanalyse auf Anlagenvisualisierung - CO-Sicherheitswarnung
Verstromung	
BHKW	<ul style="list-style-type: none"> - Hersteller: MAN D26, 4 Takt Diesel mit Turboaufladung, 6 Zylinder - Elektrische Leistung: 180kW, - Drehzahl: 1500 U/min
Abgassystem	<ul style="list-style-type: none"> - Common-Rail Technologie mit Hochdruck-Abgas-Rückführung - Oxidationskatalisator zur Reduktion von CO, Formaldehyd, Geruch - Rauchgaskamin, DN 180, H:10m, Überdruck 5000Pa.
Wärmetauscher	<ul style="list-style-type: none"> - Primärkreislauf bestehend aus Motorkühlung, Ladeluftkühlung und Abgaswärmetauscher - liegender Rohrwärmetauscher - gelöteter Plattenwärmetauscher

Verfahrensschema

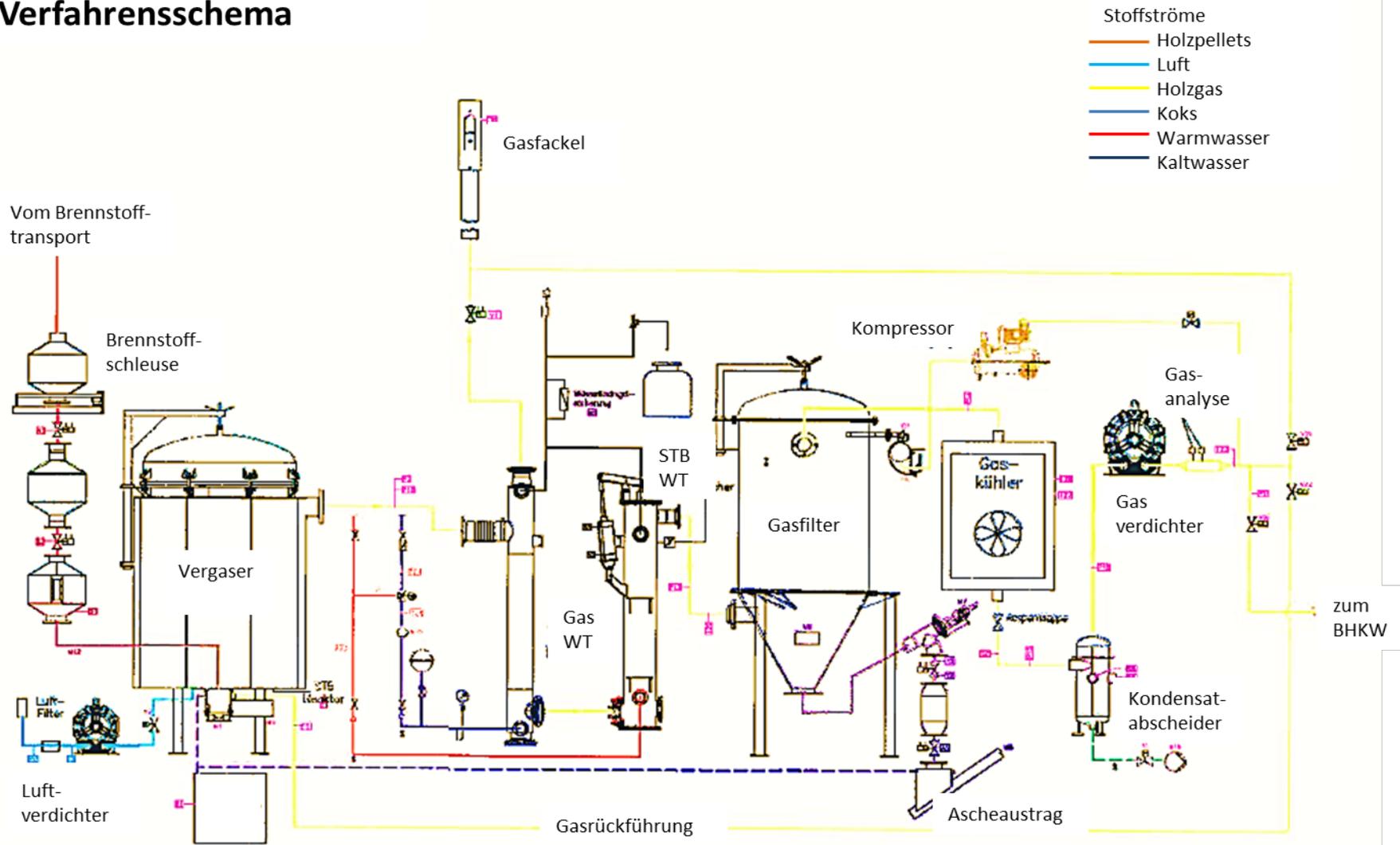


Abbildung 4: Verfahrensschema des Holzgasproduktion und -aufbereitung

Bei der Anfahrphase, in der der Reaktor seine Betriebstemperatur noch nicht erreicht hat, kann es zu erhöhten Emissionen an unverbrannten Stoffen kommen. Da das Gas für die Verbrennung im BHKW und auch in der Fackel nicht geeignet ist, wird das Gas in die Atmosphäre geleitet.

Die gesamte Anlage wurde modulweise errichtet. In dem ersten Modul (Holzgasmodul, **Abbildung 4**) befinden sich der Vergaser und die Komponenten der Gasaufbereitung. Alle Komponenten sind verrohrt und verkabelt. Die Steuerung des Moduls erfolgt an einem im Schaltschrank eingebauten Monitor. In dem zweiten Modul befindet sich die Motor-Generatoreinheit mit einem Kühlwasser- und mit einem Abgaswärmetauscher (**Abbildung 5**). Das ganze Kraftwerk ist in diesem Modul ebenfalls verrohrt und verkabelt. Dessen Bedienung erfolgt wie beim Holzgasmodul ebenfalls über einen Monitor.

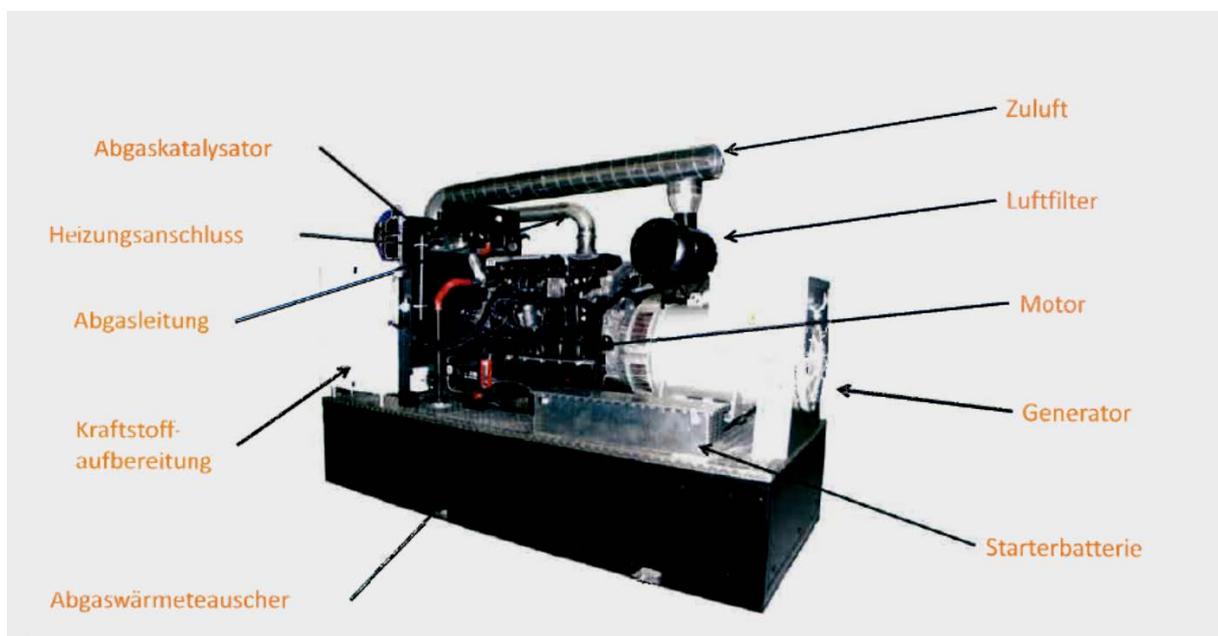


Abbildung 5: BHKW mit einem Kühlwasser- und mit einem Abgaswärmetauscher

2.3 Anlagenbetrieb

Beim Anfahrprozess wird der Reaktor mit Pellets befüllt und flach verteilt. Darauf wird eine Koks-schicht zwischen 50l -200l aufgebracht und ebenfalls flach verteilt. Dieses Koks-bett wird nur einmalig mit Diesel besprüht und der Reaktor zugeschraubt. Anschließend werden alle gasführenden Komponenten mit Luft gespült (2 Minuten) und die Pellets angezündet. Während der Anfahrphase des Vergasers werden keine Brennstoffe (Pellets) zugeführt, erst nach der Erreichung zur Betriebstemperatur. Nach dem Starten der Druckprobe werden die Abluft-werte überprüft. Da gleich bei der Inbetriebnahme keine brennbare Gasqualität produziert werden kann, wird das Gas über den Kamin in die Atmosphäre geleitet. Liegt die Gasqualität im definierten optimalen Wert, z.B. Temperatur $T_{10.121} > 700^{\circ}\text{C}$ für 120 Sec., wird das Holzgas zum BHKW geleitet. Falls die Temperatur T_{17} nach 60 Minuten immer noch $< 500^{\circ}\text{C}$ liegt, muss die Inbetriebnahme wiederholt werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass der

Vergaser nicht überfüllt wird. In **Abbildung 6** ist der Ablauf zum Anfahren der Anlage mit den definierten Soll-Bedingungen zu sehen.

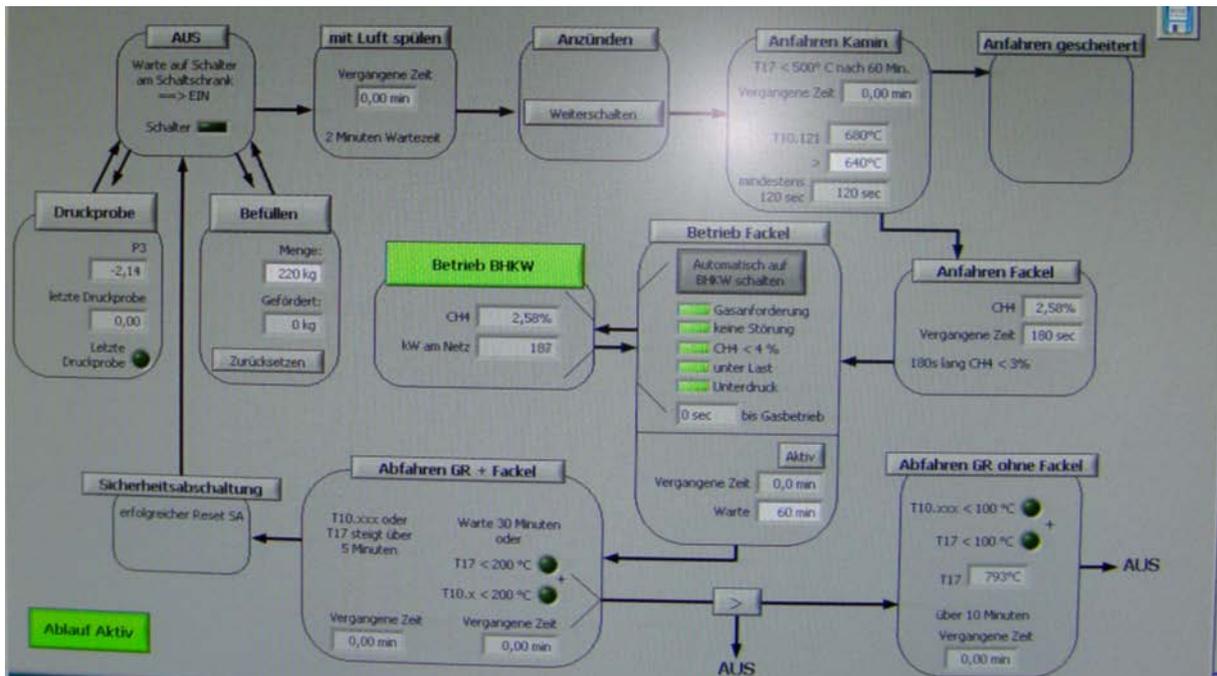


Abbildung 6: Ablauf zum Anfahren der Anlage

Im Reaktor muss ein Unterdruck von mindestens -35mbar aufgebaut werden, damit das Gas durch den Bernoullischen Effekt strömen kann. Falls der Unterdruck von -35mbar nicht erreicht wird, muss der Reaktor auf Undichtigkeiten überprüft werden. Gleichzeitig wird die Temperaturentwicklung im Reaktor beobachtet. Der Anzündmodus dauert ca. 10-15 Minuten. Zunächst wird eine Luftmenge von 120-140 kg/h eingestellt. Beim Vorhandensein von wenig Koks muss die Luftmenge erhöht werden, damit kein Koksaustrag entsteht. Da bei der Anfahrphase keine Pellets gefördert werden, muss während der Anfahrdauer von 10-15 Minuten auf die Gefahr der leeren Ausbrennung im Reaktor geachtet werden. Nach 15 Minuten wird auf „Anfahren Kamin“ weitergeschaltet.

Beim Regelbetrieb erreicht die Temperatur (T17) im freien Raum bis 800°C. In **Abbildung 7** ist ein Bildschirm der Anlagensteuerung dargestellt, die die Temperaturentwicklung im Vergaser und in der Gasaufbereitung zeigt. Auf der Darstellung ist noch der Vergaserdifferenzdruck (P11-P12) zu sehen, der die Strömung des Holzgases ermöglicht.

Die Gasmenge und die Gaszusammensetzung hängen von der Qualität der Pellets, dem Reaktorfüllstand und dem Zustand des Koksbetts ab. Pellets werden nach der Temperaturentwicklung und der Kokshöhenregelung in den Reaktor zugeführt. Gleichzeitig wird abhängig von der Pelletsdosierung die Luftzugabe eingestellt. Die Kokshöhe im Reaktor zeigt die Entwicklung der Prozessstufen. Je nach Kokshöhe ändert sich die Pyrolysefläche, da der Reaktor in einer konischen Form hergestellt wurde. Bei Unterschreitung der Füllhöhe werden mehr Pellets zugefügt und bei Überschreitung wird sie reduziert. Die Kokshöhe wird gegen ein Gefahr der Leerverbrennung mit einem Minimum-Wert und gegen ein Gefahr der Vollverbrennung ($\lambda > 1$) ei-

nem Maximum-Wert geregelt. Damit die Kokshöhe in diesem definierten Min. und Max.-Wert liegt, wird noch ein Parameter, Lambda, für die Einstellung der Brennstoffdosierung definiert. Wenn die Temperatur über den Sollwert liegt, wird der Brennstoff nach dem unteren Lambda (0,22) gefördert. Liegt die Temperatur unter dem Sollwert, dann wird der Brennstoff nach dem hohen Lambda (0,40) gefördert.

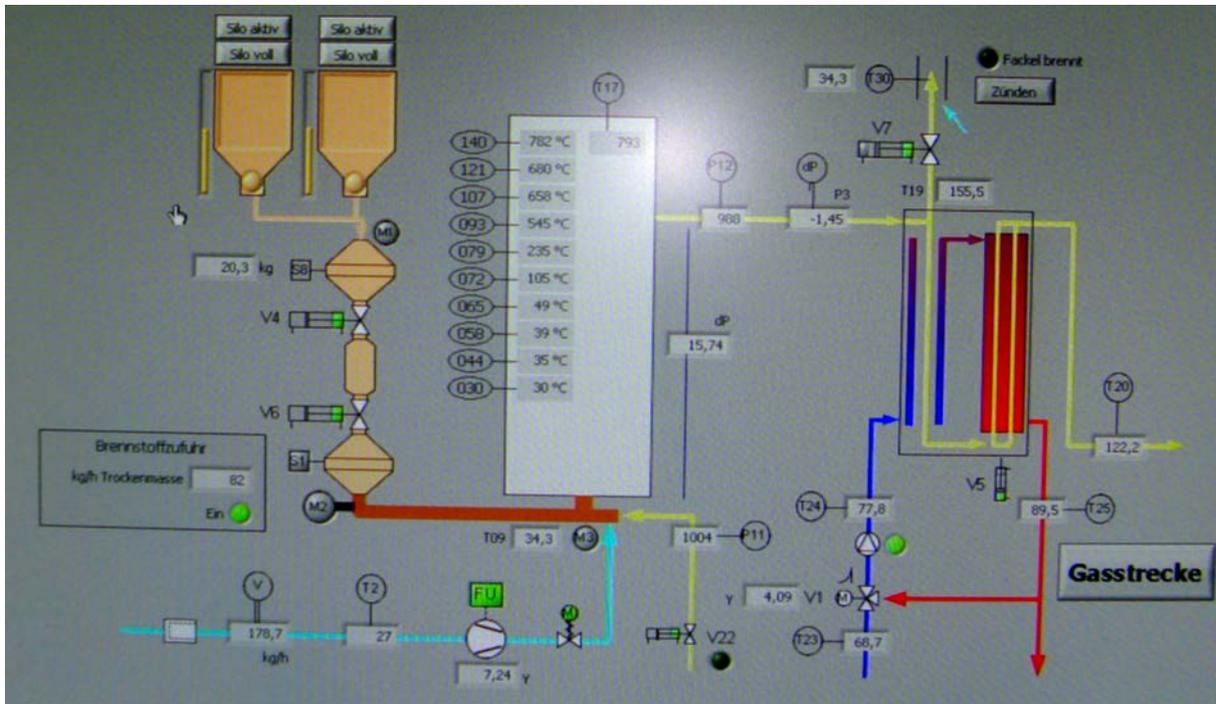


Abbildung 7: Temperaturentwicklung bei Holzgasproduktion

Das Holzgas wird vor der Weiterleitung an das BHKW einer Aufbereitung unterzogen, die aus Kühlung, Filterung und Trocknung besteht. Die aus der Gaskühlung gewonnene Wärme (Gaswärmetauscher) wird auf das Fernwärmenetz übertragen. Die Vorlauf- (ca. 90°C) und Rücklauftemperaturen (ca. 67°C) des Gaswärmetauschers sind für einen Regelbetrieb ebenfalls in **Abbildung 7** dargestellt. Sowohl der Wärmetauscher als auch der Gasfilter werden in regelmäßigen Abständen gereinigt. Die Häufigkeit der Reinigung wird nach dem Differenzdruck über dem Filter (15mbar) bestimmt. Mit Hilfe von Druckstößen mit komprimiertem Holzgas wird der Filter abgereinigt. Der dabei anfallende Koks wird mit einer Austragungsschnecke entfernt.

Während der Trocknung des Holzgas werden die im Gas gelöst vorhandenen organischen Verbindungen zum Schutz des BHKW entfernt. Im Kondensationstrockner wird das Gas um ca. 80°C gekühlt (**Abbildung 8**). Anschließend wird es noch Mal mit Hilfe eines Seitenkanalverdichters verdichtet, um die Feuchtigkeit des Gases zu reduzieren und dadurch einen möglichen Kondensatausfall im BHKW zu verhindern.

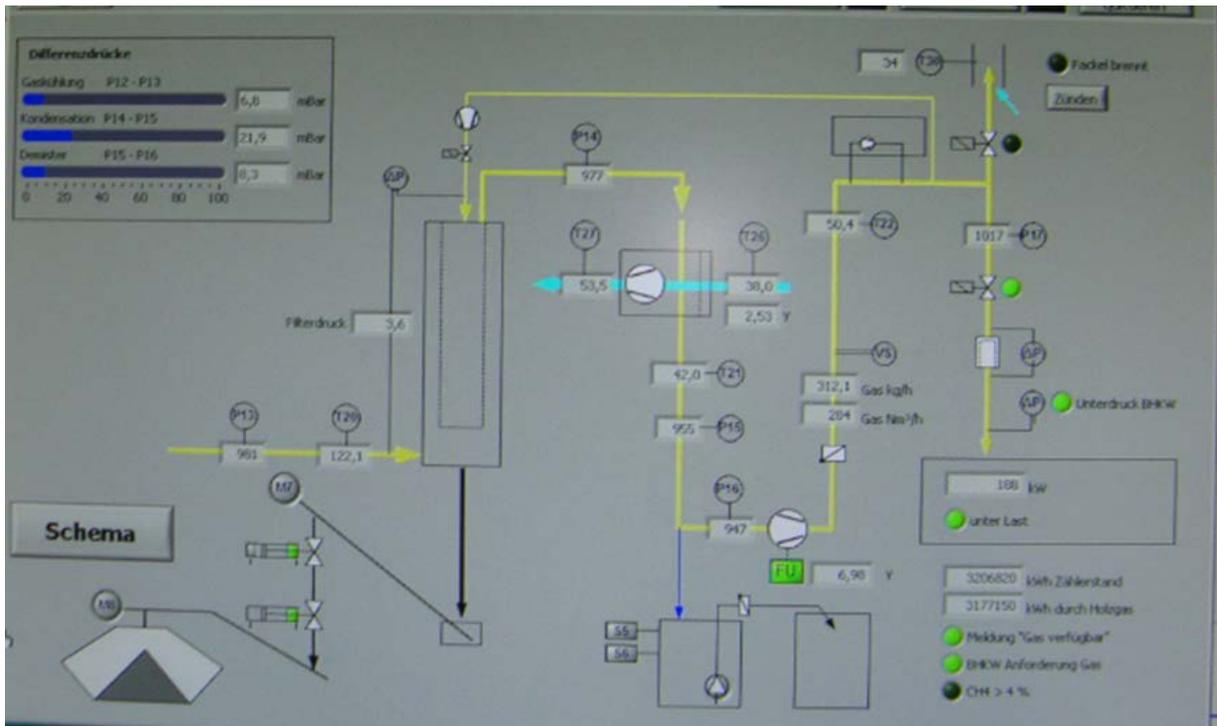


Abbildung 8: Holzgaskühlung

Nach der Aufbereitung wird das Holzgas auf dessen Inhalte analysiert. Wenn die Gasgrenzwerte (z.B. CH_4 -Wert < 4%) eingehalten sind und wenn die Anzeige „Automatisch auf BHKW Schalten“ grün leuchtet (d.h. die Gasanforderung und Unterdruck sind vorhanden), geht das BHKW in Betrieb.

Bei Vollastbetrieb des Vergasers werden täglich ca. 2.750 kg Pellets verbraucht und ca. 3,5 % davon als Feinanteil (Abrieb) abgeschieden. Ebenfalls abgeschieden wird Kondensat (ca. 3 l/d) und Koks (ca. 70 kg/d), welche in regelmäßigen Abständen zur Entsorgung abgeholt werden. Täglich werden durchschnittlich 7.500 kg Synthesegas mit durchschnittlich 2,5% CH_4 , 24% CO und 16% H_2 produziert. Von dieser Gasmenge werden pro Tag ca. 4.500 kWh Wärme und 4.300 kWh Strom produziert. Bei der Verstromung hat die Diesel-Zugabe den Anteil von ca. 7%. Der Eigenstromverbrauch des BHKW liegt durchschnittlich bei 1,5% der erzeugten Strommenge. Der Eigenstromverbrauch der Vergasereinheit liegt bei 2,5% der erzeugten Strommenge.

Nach den Input- und Output-Werten wurde die Leistung der gesamten Anlage bewertet und in Tabelle 4 zusammengefasst. Aus den umgerechneten Parametern können folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Der Holzvergaser und das Holzgas-BHKW laufen weitestgehend stabil
- Die erhöhte Stromerzeugung von 173 kWh/h auf 185 kWh/h bei gleichbleibendem stündlichen Pelletsverbrauch weist darauf hin, dass der Holzvergaser optimiert wurde. Ein im ersten Betriebsjahr aufgetretenes Problem war der hohe Abrieb der Holzpellets im Vergasungsreaktor. Durch das Herabsetzen der Kokshöhe im Reaktor konnte das Zermahlen der Pellets verhindert und das Problem gelöst werden.

- Der reduzierte Dieselanteil bei der Einspeisung weist ebenfalls darauf hin, dass der Holzvergaser optimiert wurde, da keine Einstellung bei den BHKW-Parametern vorgenommen wurde.
- Die eingespeiste Wärme pro kg Pellets wurde von 0,65 kWh/kg auf 0,68 kWh/kg erhöht.
- Im Jahr 2016 wurde eine erhöhte Koksmenge pro Betriebsstunde festgestellt. Das kann durch die Verschiebung der Reaktionen im Vergaserreaktor erklärt werden.
- Die Auslastung des BHKW ist immer niedriger als die Auslastung des Vergasers, da das Holzgas bei Inbetriebnahme und bei nicht eingehaltenen Gasqualitäten verbrannt wird.
- Durch die erhöhte Betriebsdauer des BHKWs und die sinkende Fackeldauer ist der Eigenstromverbrauch ebenfalls gesunken.

Tabelle 4: Bewertung der Anlagen

	Größe	Einheit	2014	2015	2016
Input	Pelletsverbrauch	kg	704.498	810.775	326.414
	Dieserverbrauch	Liter	27.636	33.323	11.172
	Strom-Eigenbedarf BHKW	kWh	18.718	20.325	6.811
	Strom-Eigenbedarf HVG	kWh	27.483	30.753	13.046
Output	Koksanfall	kg	15.270	3.600	9.200
	Kondensatanfall	kg	3.000	4.000	500
	Wärmeerzeugung BHKW	kWh	1.218.320	1.415.220	576.030
	Wärmeerzeugung HVG	kWh	457.330	541.840	222.370
	Stromerzeugung	kWh	1.111.522	1.369.586	542.418
Zähler	Betriebsstunden HVG	h	6.465	7.529	3.024
	Betriebsstunden BHKW	h	6.427	7.443	2.945
	mögliche Betriebsstunden	h	7.536	8.784	3.192
umgerechnet	Fackel	h	38,00	86,00	79,00
	Erzeugte Holzgasmenge *	kWh	1.032.640	1.274.473	510.530
	Erzeugtes. Holzgas/ Pelletsmenge	kWh/kg	1,47	1,57	1,56
	Erzeugte Wärme/ Pelletsmenge	kWh/kg	0,65	0,67	0,68
	Durchschnitt Stromerzeugung	kWh/h	172,95	184,01	184,18
	Pelletsverbrauch/Betriebsstd. HVG	kg/h	108,97	107,69	107,94
	Koksmenge/Betriebsstd. HVG	kg/h	2,36	0,48	3,04
	Koksmenge/Pelletsmenge	kg/kg	0,02	0,00	0,03
	Dieselanteil bei Einsp.	%	7,10%	6,94%	5,88%
	Eigenbedarf (BHKW+HVG)	%	4,16%	3,73%	3,66%
	Auslastung HVG	%	85,8%	85,7%	94,7%
	Auslastung BHKW	%	85,3%	84,7%	92,3%

*Da keinen Gaszähler vorhanden ist, wurde das Holzgas durch den Abzug des Dieselanteils von den gesamten eingespeisten kWh berechnet.

Aus den Auswertungen geht hervor, dass die Anlage, die vom Hersteller genannten Garantiewerte erbracht hat. Dadurch wurde das Ziel erreicht.

2.4 Ökologischer Nutzen

Die umweltschonende Betriebsweise der Holzvergaserereinheit leistet nochmals einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz. So werden durch den Betrieb des Holzvergasermoduls im Vergleich zu konventionellen Kraftwerken und der getrennten Energieerzeugung jährlich rd. 1.100 Tonnen CO₂ –Emissionen eingespart.

Im direkten Vergleich mit herkömmlicher Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis von Erdgas ergibt sich noch eine jährliche CO₂-Einsparung von rd. 500 Tonnen.

2.5 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit der Anlage wurde unter drei Betrachtungsweisen bewertet: Investition, Betriebskosten und Erlöse.

2.5.1 Investitionen

Die tatsächlich angefallenen Investitionskosten sind nach Kostenart in **Tabelle 5** aufgelistet. Laut der Tabelle hat die Anlage (Holzvergaser + BHKW) den höchsten Investitionsanteil von 68%. Die anderen Investitionen bestehen aus den Kosten zur Planung/Projektleitung (12%) und den zusätzlichen Heizungs- und Elektroinstallationen (30%) am Standort der Anlage.

Tabelle 5: Aufteilung Investitionskosten

Kostenart	Kosten €	Anteil
Planung / Genehmigungsplanung	49.000	6 %
Projektleitung	48.000	6 %
Lieferung und Montage der Holzvergaser-Anlage	548.000	68 %
Erd- und Fundamentarbeiten	34.000	4 %
Heizungsinstallation	34.000	4 %
Elektroinstallation	53.000	7 %
MSR-Technik	37.000	5 %
Gesamt	803.000	100%

2.5.2 Betriebs- und Verbrauchskosten

Die jährlichen Betriebs- und Verbrauchskosten lagen 2015 bei rund 318.000 €. Darin enthalten sind Verbrauchskosten (Pellets, Biodiesel, Strom), Personalkosten, Instandhaltung-/Wartungskosten und Entsorgungskosten (Koks und Kondensat).

2.5.3 Erlöse

Die Erlöse werden durch den Verkauf der erzeugten Wärme und des eingespeisten Stroms erwirtschaftet. Der eingespeiste Strom wird nach dem EEG 2004 vergütet, da es sich bei dem BHKW-Modul um eine Anlage handelt, die erstmals 2006 als EEG-Anlage angemeldet wurde. Der Betreiber bekommt neben der Grundvergütung einen Technologiebonus für den Vergasungsprozess und einen KWK-Bonus für die Wärmenutzung.

Grundvergütung (inkl. „Nawaro“-Bonus):

- 17,50 Ct/kWh für die ersten 150kW elektrische Leistung
- 15,90 Ct/kWh für die 150 kW übersteigende Leistung bis einschließlich einer elektrischen Leistung von 500kW

Technologiebonus: Die Grundvergütung erhöht sich bis einschließlich einer Leistung von 5,0 MW um weitere 2 Ct/kWh, wenn der Strom in Anlagen gewonnen wird, die auch in KWK betrieben wird und die Biomasse durch thermochemische Vergasung umgewandelt wird.

KWK-Bonus: Die Grundvergütungen bis einschließlich einer elektrischen Leistung von 20 MW erhöhen sich zusätzlich um jeweils 2 Ct/kWh, soweit es sich um Strom des KWK-Gesetzes handelt und dem Netzbetreiber ein Nachweis vorgelegt wird. Aus der gemessenen Wärmemenge und der Stromkennzahl (=elektrischer Wirkungsgrad/ thermischer Wirkungsgrad) lässt sich dann errechnen, wie viel Strom erzeugt werden musste, um die gemessene Wärmemenge auszukoppeln. Nur für diese errechnete elektrische Arbeit wird der KWK-Bonus zusätzlich zur Stromvergütung bezahlt.

Die Erlöse aus dem Wärme- und Stromverkauf der Holzvergaseranlage lag im Jahr 2015 bei rund 399.000 €.

Das Betriebsergebnis lag 2015 somit bei rund 81.000 € ohne Berücksichtigung der kapitalgebundenen Kosten (Invest: 803.000,- €).

2.6 Wirkung der Umsetzung (Ausblick)

Der Wärmebedarf in Landwasser liegt bei rund 34.000 MWh/a. Durch die beiden Biogas-/Deponiegas-BHKW-Motoren werden jährlich 12.800 MWh/a Strom und 13.600 MWh/a Wärme produziert (vgl. Abbildung 1). Durch die Inbetriebnahme des Holzvergasers werden zusätzlich 1.370 MWh/a Strom und 1.950 MWh/a Wärme (im Jahr 2015) produziert, so dass der Anteil an regenerativ erzeugter Energie nochmals wesentlich gesteigert werden konnte.

Durch die stabile Betriebsweise seit der Inbetriebnahme hat sich die innovative Technik der Holzvergasung etabliert und technisch gesehen für weitere Anwendungen empfohlen.

Durch die veränderten gesetzlichen Rahmenbedingungen hinsichtlich der garantierten Einspeisevergütung für den regenerativ erzeugten Strom ist ein wirtschaftlicher Betrieb für Neuanlagen derzeit allerdings nicht möglich.

3 Zusammenfassung

Um den regenerativen Anteil der Wärme- und Stromversorgung im Blockheizkraftwerk Freiburg-Landwasser zu erhöhen, wurde eine für badenovaWÄRMEPLUS neue Technik in Form einer Holzvergaseranlage geplant. Zur Erlangung der Wirtschaftlichkeit des Projekts wurde ein Antrag auf Förderung aus dem Innovationsfonds der badenova gestellt. Ein Drittel der Investition (Tabelle 5) wird durch die Förderung (Tabelle 2) gedeckt.

In diesem Bericht wurde zuerst die Funktionsweise des Verfahrens (Holzvergasung) erklärt, danach die Anlage bau- und steuertechnisch beschrieben. Zuletzt wurden die jährlichen Betriebsdaten bewertet und diese mit umgerechneten Energiekennwerten dargestellt. Die nach dem Zeitplan installierte gesamte Anlage (Holzpelletsvergaser und Holzgas-BHKW) wird seit 2,5 Jahren betrieben. Die Anlage wurde im ersten Betriebsjahr optimiert. Seitdem läuft die Anlage nach den Garantiewerten des Herstellers. Ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlage ist aufgrund des Innovationsfonds gegeben. Das Betriebsergebnis lag im Jahr 2015 bei rund 81.000 Euro. Nicht berücksichtigt sind dabei die kapitalgebundenen Kosten aus den Investitionen von rund 803.000 Euro abzgl. den Fördergeldern aus dem Innovationsfond.

Mit dem Projekt wurde der Anteil an regenerativ erzeugter Wärme um 15% erhöht. Insgesamt macht die durch die Holzvergaseranlage erzeugte Wärmemenge 6% des gesamten Wärmebedarfs aus.

LITERATURVERZEICHNIS

1. Fabio Emiro Sierra Vargas [2006]; Zur katalytischen Vergasung von Biomasse; vom Fachbereich 15 – Maschinenbau – der Universität Kassel Kassel
2. Regenerative Energie Biomasse [1]: Springer Verlag
3. Energie aus Biomasse [2]: Springer Verlag
4. Bridgewater A.V. [2005]: Fast Pyrolysis of Biomass: A Handbook (Eds. A. Bridgewater et al.), CPL Press, Newbury, UK.