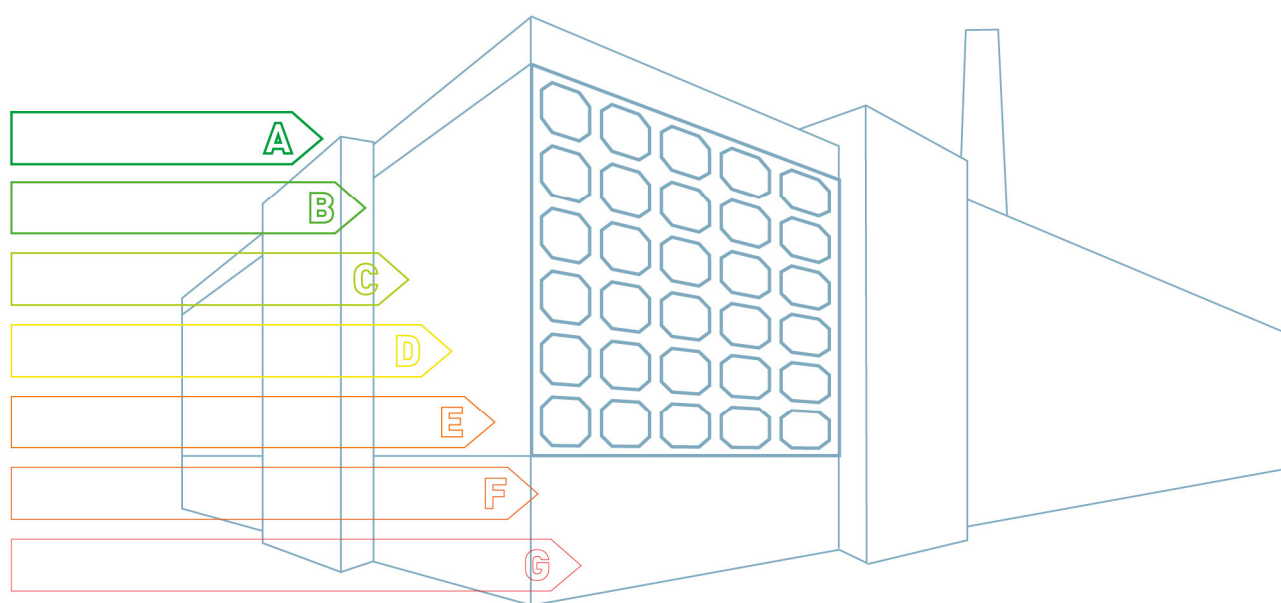




Innovative Niedertemperatur- und Abwärmenutzung im Zementherstellungsprozess unter Einsatz der Absorptionstechnik



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A stylized, handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, overlapping strokes.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink that reads 'Theresia Vogel' in a cursive script.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

Wopfinger Baustoffindustrie GmbH
Wopfung 156
A - 2754 Waldegg
TEL.: +43 (0) 2633 400
FAX: +43 (0) 2633 400-466
www.baumit.com



**Forschung, Entwicklung und Planung von Anlagen
zur Wärme- und Stromerzeugung aus Biomasse**

Inffeldgasse 21b A-8010 GRAZ, AUSTRIA
TEL.: +43 (0)316-481300; FAX: +43 (0)316-481300-4
EMAIL: OFFICE@BIOS-BIOENERGY.AT
HOMEPAGE: [HTTP://BIOS-BIOENERGY.AT](http://BIOS-BIOENERGY.AT)



Forschungsprojekt: Innovative Niedertemperatur - und Abwärmenutzung im Zementherstellungsprozess unter Einsatz der Absorptionstechnik

Wopfinger Baustoffindustrie GmbH

Projektleiter: Dipl.-Ing. Roland Hochwartner

BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH

Projektleiter: Dipl.-Ing. Alfred Hammerschmid

Sachbearbeiter: Dipl.-Ing. Erwin Reisenhofer

Wopfung, November 2010



2 Einleitung

2.1 Aufgabenstellung

In Österreich sind in vielen industriellen und gewerblichen Betrieben hohe, nicht genutzte Abwärmepotentiale vorhanden, welche wegen ihrer Eigenschaften oftmals nicht in innerbetrieblichen Prozessschritten einsetzbar sind. Um eine technisch sowie wirtschaftlich sinnvolle Integration von industriellen Abwärmequellen in innerbetrieblichen als auch kommunalen Wärmeversorgungssystemen gewährleisten zu können, bedarf es einer detaillierten und fachgerechten Beurteilung der Abwärmepotentiale. Generell steigert die Nutzung von industriellen Abwärmern die Effizienz von Industriebetrieben, reduziert den Einsatz von fossilen Energieträgern sowie die damit verbundenen Kosten und leistet aufgrund der Substitution von CO₂-emittierenden Energieträgern einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz.

2.2 Schwerpunkte des Projektes

Die wesentliche Zielsetzung war es, durch das Projekt die Basis für die Realisierung von Konzepten zur verstärkten Nutzung von Abwärmepotentialen im Zementwerk der Firma Wopfinger Baustoffindustrie GmbH zu schaffen. Die hierfür untersuchten Abwärmequellen lassen sich in die Bereiche *Nutzung von Abwärme aus prozessbedingten Abgasströmen* und *Nutzung von Abwärme des Drehrohrofens* untergliedern. Für beide Bereiche war die Zielsetzung optimierte technische Abwärmenutzungskonzepte zu erarbeiten und einer technischen sowie wirtschaftlichen Evaluierung zu unterziehen, um die Entscheidungsgrundlage bezüglich Realisierung der jeweils besten Varianten zu schaffen. Eine weitere übergeordnete Zielsetzung war die ökologische Bewertung der Abwärmnutzungskonzepte sowie die Ermittlung der nutzbaren CO₂-Reduktionspotentiale.

2.3 Einordnung in das Programm

Das durchgeführte Projekt ist vorwiegend im Themenfeld „Energie in Industrie und Gewerbe“ sowie teilweise auch im Themenfeld „Sonstige erneuerbare Energieträger“ der 3. Ausschreibung des Forschungs- und Technologieprogramms „Neue Energien 2020“ angesiedelt wobei folgende Zielsetzungen besonders auf das durchgeführte Projekt zutreffen:

Niedertemperaturwärmenutzung

Vorhaben: Entwicklung und Optimierung innovativer Niedertemperaturabwärmnutzungskonzepte im Zementherstellungsprozess unter Einsatz der Absorptionswärmepumpe.

Ein grundlegendes Ziel des durchgeführten Projektes war es, die Abwärmern die im Zementherstellungsprozess auf niedrigem Temperaturniveau zur Verfügung stehen mittels innovativen Technologien, wie z.B. mit der intelligenten Kopplung verschiedener Abwärmertemperaturniveaus über eine Absorptionswärmepumpe zur Nutzung von Niedertemperaturabwärmern (Rauchgaskondensation) und Niedertemperaturabwärmernutzung vom Drehrohrforn, bestmöglich mit vorhandenen Wärmesenken, im konkreten Fall einem Fernwärmernetz, zu verbinden. Gerade bei industrieller Abwärmernutzung galt es auch neue Technologien anzudenken bzw. für bestehende Verfahren Optimierungsmöglichkeiten zu

finden. Dazu stellte das Expertenwissen des BIOS gemeinsam mit dem Industrieunternehmen eine vorbildliche Kooperation dar.

Der Einsatz der Absorptionswärmepumpe zur optimalen Nutzung der Abwärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus und die technische Konzeption von High-Dust-Wärmetauscher zur Auskopplung der Abwärme aus stark staubbeladenen Abgasströmen sowie die Analyse und Bewertung des bei Rauchgaskondensationsanlagen anfallenden Kondensatwassers bzw. -schlammes stellen beachtliche Innovationen in der Zementindustrie dar.

Eine weitere Innovation ist die Nutzung der Abwärme im Bereich des Drehrohrofens zu Niedertemperaturtrocknungszwecken, dessen technische Konzeption mit Unterstützung von CFD-Simulationsmodellen durchgeführt wurde.

Wärmepumpen/Kälteanlagen

Analog zum Inhalt dieses Themenbereiches wurde anhand des beantragten Projektes der Einsatz von Absorptionswärmepumpen zur Nutzung von Abwärme geprüft und optimiert. Dazu wurde in diesem Projekt die Entwicklung eines energetisch optimierten Anlagenkonzeptes für die Abwärmenutzung unter spezieller Berücksichtigung einer Absorptionswärmepumpe durchgeführt. Mit diesem System können durch eine kaskadenförmige Nutzung die Niedertemperaturabwärmen hocheffizient eingesetzt werden.

2.4 Verwendete Methoden und Aufbau der Arbeiten

Im Rahmen des durchgeführten Projektes wurden energetisch, technisch, ökologisch und wirtschaftlich optimierte Konzepte für die Abwärmeauskopplung aus Abgasströmen im Zementwerk der Firma Wopfinger Baustoffindustrie GmbH entwickelt. Dabei wurden für die Abgaswärmenutzung auf hohem Temperaturniveau innovative High-Dust-Wärmetauscher für verschiedene Bereiche der Abgasstrecke und für die Wärmeauskopplung auf niederem Temperaturniveau eine Abgaskondensationsanlage für Abgase aus dem Zementprozess in Kombination mit einer Absorptionswärmepumpe konzipiert und evaluiert. Die derart auskoppelbare Abwärme soll zur Gänze in ein in Planung befindliches Fernwärmenetz eingespeist werden, welches in der Endausbaustufe einen Gesamtwärmebedarf von 60 GWh/a aufweist.

Die unterschiedliche qualitative Beschaffenheit der nutzbaren Abgasströme erforderte eine individuelle Entwicklung von technischen Lösungsansätzen zur energetisch optimierten Wärmeauskopplung. Dies betrifft vor allem die Bereiche Korrosion, Deposition und Abwasserbehandlung. Diesbezüglich wurden am Markt verfügbare Lösungen zur Wärmeauskopplung bewertet und an die jeweilige Aufgabenstellung angepasst. Zur Gewinnung neuer und derart nicht vorhandener Daten hinsichtlich Abgas- bzw. Kondensatzusammensetzung wurden von den relevanten Abgaswärmequellen Messungen und Analysen durchgeführt.

Weiters wurde die Integration eines Lastmanagements zur regelungstechnischen Optimierung der Lastgänge zwischen dem Fernwärmenetz und dem Zementherstellungsprozess unter Einsatz eines Pufferspeichers und eines Spitzenlastkessels berücksichtigt, um die Volllaststunden der geplanten Abwärmenutzungsanlage zu maximieren.

Zur Nutzung der Abwärme des Drehrohrofens wurde ein technisches Konzept mittels CFD-Modellierung (Computational Fluid Dynamics = numerische Strömungsmechanik) erarbeitet, mit dem Ziel eine

optimierte Abwärmenutzungstechnologie zur Niedertemperaturtrocknung von Sekundärbrennstoffen zu entwickeln. Entscheidend war dabei, dass durch die Wärmenutzung der Prozess im Inneren des Drehrohrofens nicht gestört wird. Zur Erarbeitung eines technischen Konzepts für die Drehrohrabwärmenutzung war eine Adaptierung bereits bestehender Basis-CFD-Simulationsmodelle für Festbett- und Flugverbrennungen erforderlich, um ein CFD-Simulationsmodell für den Drehrohrofenprozess zu erhalten. Damit konnten näherungsweise die Strömung, die Wärmeleitungs- bzw. -transportprozesse in diesem Bereich simuliert werden. Dazu wurde ein 3D-Temperaturfeld über den gesamten Drehrohrofen ermittelt, um den Wärmeübergang von Innen nach Außen transparent zu machen.

3 Inhaltliche Darstellung des Projektes

Das Gesamtprojekt wurde in 9 Arbeitspakete untergliedert, deren jeweiliger Inhalt nachfolgend erläutert wird.

3.1 Arbeitspaket 1: Projektmanagement

Das beantragte Projekt wurde in insgesamt 9 Arbeitspakete (AP) gegliedert, wovon AP2 bis AP9 mit geringfügigen Überschneidungen sequentiell bearbeitet wurden. Die Tätigkeiten für das AP1 erstreckten sich über den gesamten Projektzeitraum. Neben dem im Zuge des AP1 durchgeführten Projektmanagements inklusive Ressourcenplanung und Koordination der beteiligten Mitarbeiter sowie der laufenden Kontrolle der durchgeführten Arbeiten, des Zeitplanes und der erreichten Meilensteine war die Erstellung des Endberichtes zur Zusammenfassung wesentlicher Projektergebnisse und daraus ableitbarer Schlussfolgerungen bzw. zur Entwicklung einer Strategie für die weitere Vorgangsweise eines möglichen Demonstrationsprojektes ein wesentlicher Arbeitsschwerpunkt des AP1.

3.2 Arbeitspaket 2: Datengrundlage / Ist-Daten

Im Rahmen des AP2 wurden alle relevanten Basisdaten des Fernwärmenetzes sowie für die optimale Abwärmeauskopplung wie z.B. die jährliche Betriebsweise des Zementherstellungsprozesses, die verfügbaren Wärmemengen sowie die Temperaturniveaus der Abwärmequellen 1 bis 3 (siehe Anhang Punkt c) ermittelt und bewertet. Weiters wurde im Hinblick auf die ökologische Bewertung der einzelnen Abwärmenutzungsmöglichkeiten der zu substituierende Brennstoffeinsatz, welcher zur Versorgung potentieller Wärmeabnehmer des geplanten Fernwärmenetzes benötigt wird, ermittelt und darauf aufbauend die im AP9 zusammengefassten CO₂-Einsparungspotentiale berechnet. Auf Basis der ermittelten Jahresbetriebsweise des Zementherstellungsprozesses und des externen Wärmeversorgungsnetzes wurde die Ausnutzung der geplanten Abwärmenutzungsanlage definiert (siehe AP8).

Abwärmequelle 1 und Abwärmequelle 2

Die Abwärme der Abgase aus dem Zementherstellungsprozess der *Wopfinger Baustoffindustrie GmbH* soll zur Versorgung eines neu zu errichtenden Fernwärmenetzes im Raum Wiener Neustadt (Bucklige Welt) genutzt werden. Die technische Auslegung des geplanten Fernwärmenetzes erfolgte durch die Fernwärmegesellschaft *Bioenergie Bucklige Welt GmbH*. Alle relevanten Auslegungsdaten und Schnittstellen des Fernwärmenetzes wurden mit dem Projektteam abgestimmt und entsprechend an die Anforderungen der Wärmebereitstellung angepasst.

[illegible]

Erläuterungen: rote Linie...geplante Fernwärmeleitung von Wopfung nach Wiener Neustadt; blaue Linie...geplante Haupttrasse des Fernwärmenetzes im Raum Wiener Neustadt

großen Warmwasserverbrauchern werden Wärmeübergabestationen mit einem zusätzlichen Wärmetauscher zur Vorwärmung des zufließenden Kalt-Brauchwassers vorgesehen. Der zweite Wärmetauscher wird dabei primärseitig in Serie hinter den ersten Wärmetauscher geschaltet. Durch diese Maßnahme kann die primärseitige Rücklauftemperatur abgesenkt werden, was sich beim Betrieb des Fernwärmenetzes Effizienz steigernd bemerkbar macht und die durch die Warmwasserbereitung verursachte Lastspitze glättet. Durch ein Online-Datenübertragungssystem von den Fernwärmenetzen zur Prozesssteuerung der Wärmeerzeugungsanlage können plötzliche Lastschwankungen durch ein automatisiertes Lastmanagementsystem vermieden werden, was zu einer gleichmäßigeren Betriebsweise der Anlage führt.

NE 2020 Publizierbarer Endbericht Seite 6 von 36

Jahresdauerlinie des Fernwärmenetzes für vier Ausbaustufen dargestellt. Es kann zum derzeitigen Zeitpunkt davon ausgegangen werden, dass nach dem Start der Wärmeversorgung von Ausbaustufe 1 (Wärmeabnahme des Fernwärmenetzes ab Werk inklusive Netzverluste rund 10 GWh/a) in den darauf folgenden Jahren Ausbaustufe 2 (Wärmeabnahme 35 GWh/a) und Ausbaustufe 3 (Wärmeabnahme 45 GWh/a) umgesetzt werden. Das Endausbaupotential des Fernwärmenetzes in diesem Versorgungsgebiet wird eine Wärmeabnahme von rund 60 GWh/a aufweisen.

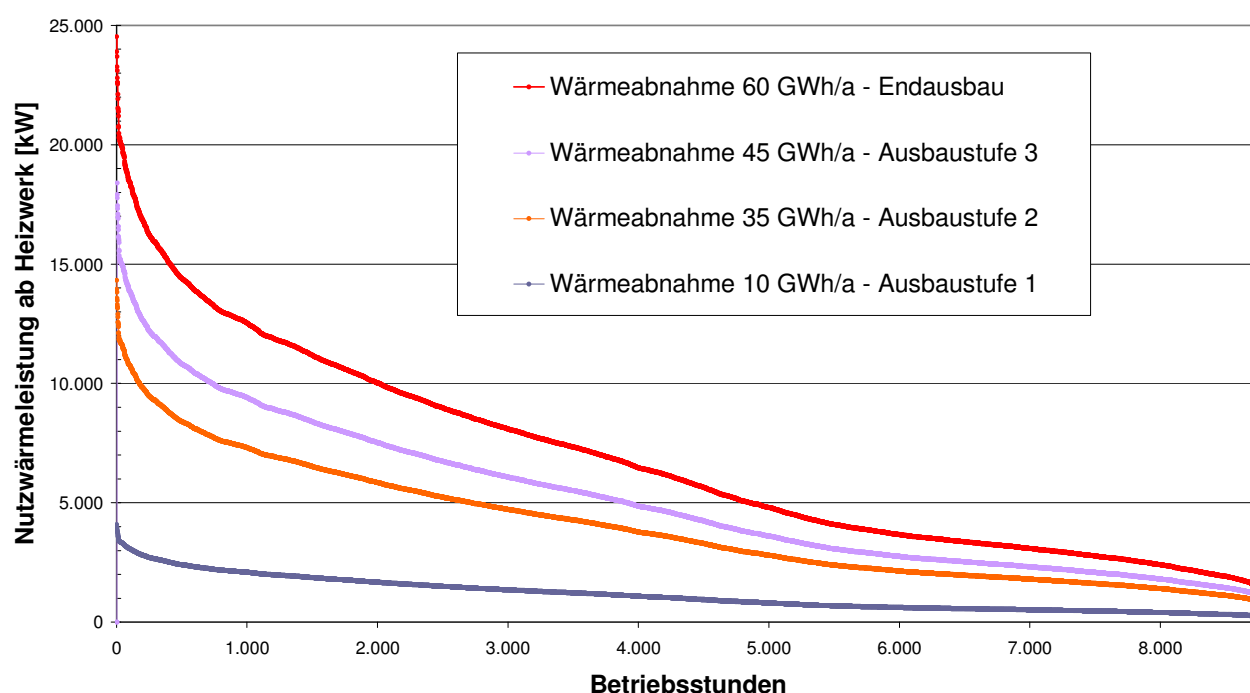


Abbildung 2: Geordnete Jahresdauerlinie Fernwärmenetz Bioenergie Bucklige Welt

Im Hinblick auf die Netzverluste, diese ergeben sich aus der Differenz der produzierten und der verkauften Wärmemenge, wird ein Wert von max. 10 bis 12% angestrebt. Somit ergibt sich ein erwarteter Jahresnutzungsgrad für das Fernwärmenetz von 88 bis 90%.

Zwischen der *Wopfinger Baustoffindustrie GmbH* und der Fernwärmegesellschaft *Bioenergie Bucklige Welt GmbH* wurde einvernehmlich festgelegt, dass die Schnittstelle zur Übergabe der Fernwärme ein Flansch im Hydraulikraum am Betriebsgelände der *Wopfinger Baustoffindustrie GmbH* ist und alle zur Wärmebereitstellung und -verteilung erforderlichen Komponenten wie z.B. Netzpumpen, Druckhalteanlage, Wasseraufbereitung, Hydraulik, Spitzenlastabdeckung und Ausfallsreserve von der Firma *Wopfinger Baustoffindustrie GmbH* bereitgestellt werden.

In Abbildung 3 sind die beiden Abwärmequellen für die Wärmeversorgung des Fernwärmenetzes dargestellt. Grundsätzlich wurden drei Varianten zur Wärmebereitstellung im Detail untersucht.

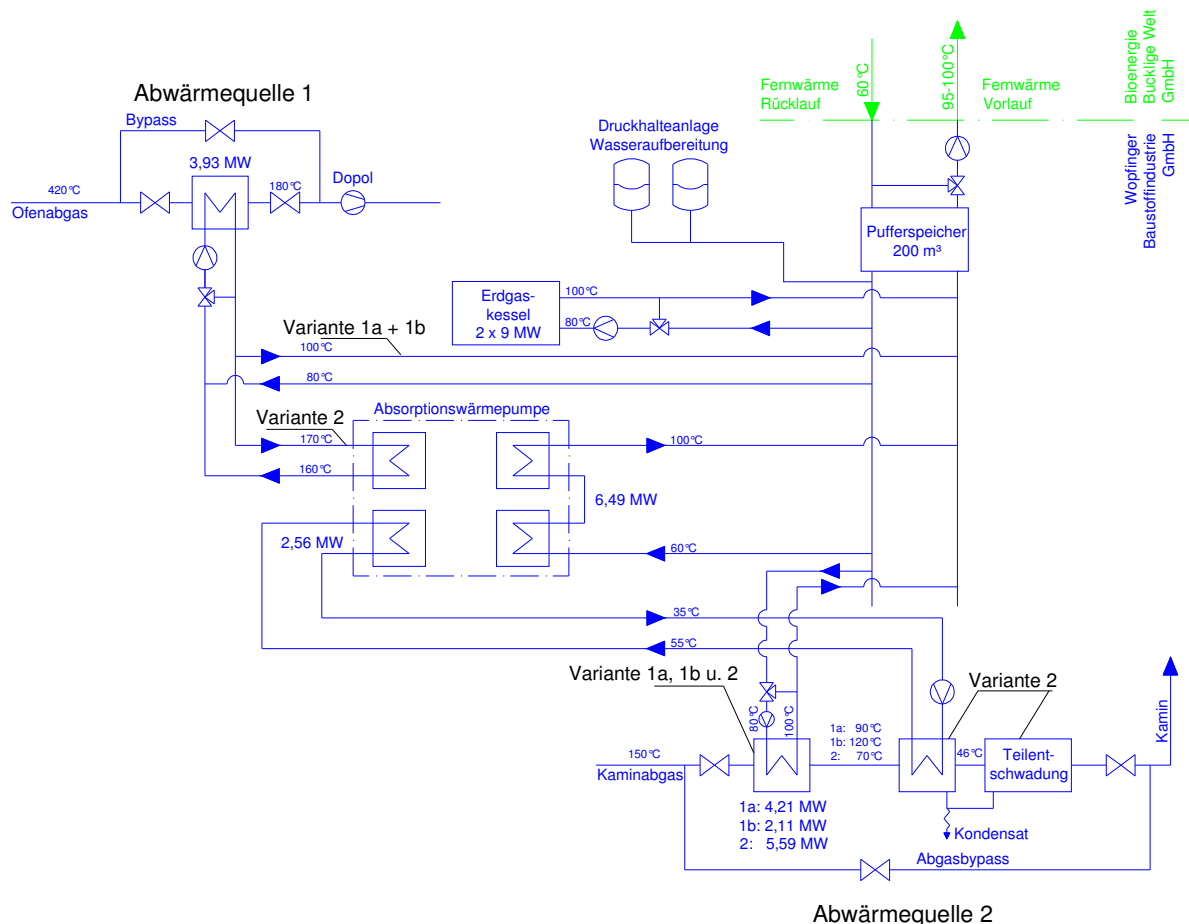


Abbildung 3: Vereinfachtes Schema des technischen Konzeptes für die untersuchten Varianten zur Fernwärmeauskopplung

Erläuterungen: Details bezüglich Auslegung der Abgaswärmetauscher und der Absorptionswärmepumpe sind in AP4, AP5 und AP6 erläutert.

Variante 1a bzw. Variante 1b berücksichtigen die Wärmeauskopplung auf einem Temperaturniveau, dass für die direkte Einspeisung in das Fernwärmenetz ausreichend ist. Hierfür werden Heißwasser-Abgaswärmetauschern in der Ofenabgasstrecke (Abwärmequelle 1: *Wärmetauscher Ofenabgas*) und in der Abgasstrecke vor dem Kamin (Abwärmequelle 2: *Wärmetauscher Kaminabgas*) positioniert.

Da speziell der *Wärmetauscher Ofenabgas*, in dem das Abgas von rund 420°C auf 180°C abgekühlt werden soll, einer hohen Staubbelastung ausgesetzt ist, wurde ein spezieller High-Dust-Wärmetauscher konzipiert (siehe AP4). Beim *Wärmetauscher Kaminabgas* ist eine spezielle Ausführung erforderlich, um bei einer Abkühlung des Kaminabgases von 150 auf 90°C Korrosionsrisiko, das durch die Unterschreitung von Säuretaupunkten gegeben ist, zu minimieren (siehe auch AP4 und AP5). Da dieses spezielle Design auch mit erheblichen Investitionskosten verbunden ist, wurde alternativ dazu eine Variante konzipiert und bewertet bei der das Abgas nur bis zu einer Temperatur von 120°C abgekühlt wird, um eine Unterschreitung von Säuretaupunkten zu vermeiden. Somit wurden in Abhängigkeit von der Abgasaustrittstemperatur aus dem *Wärmetauscher Kaminabgas* zwei Varianten (Variante 1a: 90°C und Variante 1b: 120°C) zur direkten Wärmeeinspeisung in das Fernwärmenetz erarbeitet und bewertet.

Variante 2 basiert auf der Möglichkeit zur Abwärmenutzung durch Kombination einer Absorptionswärmepumpe und einer Abgaskondensationsanlage. Die Absorptionswärmepumpe dient der Nutzbarmachung von Niedertemperaturabwärme, welche durch direkten Wärmeaustausch in ein Fernwärmenetz aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus nicht geeignet ist. Die Abgaskondensationsanlage dient dazu, einen möglichst großen Teil der im Abgas vor dem Kamin noch enthaltenen fühlbaren und latenten Wärme ebenfalls thermisch nutzen zu können, sowie eine Teilentschwadung des aus dem Kamin austretenden Abgases zu erreichen.

Wie bei Variante 1a und 1b wird vor der Abgaskondensationsanlage im *Wärmetauscher Kaminabgas* (Abwärmequelle 2 – Stufe 1) eine Abkühlung des Abgases erzielt. Die so rückgewinnbare Abwärme wird mit einer Vorlauftemperatur von maximal 100 °C direkt in das geplante Fernwärmenetz eingespeist.

Die, dem *Wärmetauscher Kaminabgas* nachgeschaltete Abgaskondensationsanlage besteht aus einem konvektiven Kondensationswärmetauscher (Abwärmequelle 2 – Stufe 2: *Kondensator*) und einem Wärmetauscher zur Vorwärmung von Außenluft (Abwärmequelle 2 – Stufe 3: *Luftvorwärmer*). Im *Kondensator* wird das Abgas unter den Taupunkt abgekühlt. Dabei kommt es zur Kondensation eines Teils des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes und somit zur Teilrückgewinnung der Kondensationswärme. Ein weiterer positiver Effekt der Kondensatorstufe ist, dass das Abgas einer Wäsche unterzogen und so eine zusätzliche Entstaubung erzielt wird.

Im *Luftvorwärmer* erfolgt ein Wärmeaustausch zwischen Abgas und Außenluft. Es erfolgt eine weitere Kondensation und Entstaubung des Abgases. Die vorgewärmte Luft wird zur Teilentschwadung des Abgases verwendet. Da das Abgas, das den *Kondensator* verlässt, wassergesättigt ist, wird ihm am Austritt aus dem *Luftvorwärmer* vorgewärmte Luft beigemischt, um einerseits die Kondensation von Wasserdampf in den folgenden Abgaskanälen und im Kamin zu vermeiden, und andererseits eine Teilentschwadung des den Kamin verlassenden Abgases zu erreichen.

Bei allen untersuchten Varianten (1a bzw. 1b und 2) wird durch die Abwärmenutzung die Grund- bzw. Mittellast des Fernwärmenetzes abgedeckt und zwei gasbefeuerte Spitzenlastkessel zur Abdeckung der Lastspitzen bzw. als Ausfallsreserve herangezogen. Zusätzlich wurde im Rahmen der Detailuntersuchung beschlossen, auch einen Pufferspeicher mit einem Volumen von rund 200 m³ im technischen Konzept jeder Variante zu berücksichtigen. Die Abgaswärmetauscher können durch die vorgesehenen Bypassklappen nur bedingt in Abhängigkeit von Lastanforderungen des Fernwärmenetzes geregelt werden. Durch den Pufferspeicher können Lastspitzen ausgeglichen werden, wodurch die Einsatzzeit der Erdgaskessel und der Erdgasverbrauch reduziert werden (siehe auch AP8).

Die Untersuchung der zu substituierenden Brennstoffe hat gezeigt, dass durch die Abwärmenutzung der Abwärmequellen 1 und 2 auf Seite des Fernwärmenetzes die Primärenergieträger Erdgas (45%), Heizöl (40%), Strom (10%) und holzartige Brennstoffe (5%) bei den Wärmekunden substituiert werden können. Die daraus resultierenden CO₂-Einsparungspotentiale sind im AP9 explizit für alle untersuchten Varianten dargestellt.

Abwärmequelle 3

Die Abwärme des Drehrohrofens der Fa. Wopfinger Baustoffindustrie GmbH (Abwärmequelle 3) soll für Trocknungsprozesse von Einsatzstoffen verwendet werden, welche dann als Brennstoffe für die Zementherstellung verwendet werden können. Mit der vorhandenen Abwärme des Drehrohrofens

können derzeit eingesetzte CO₂-emittierende Primärenergieträger durch CO₂-neutrale Ersatzbrennstoffe energetisch substituiert werden oder es können auch bisher verwendete nasse Ersatzbrennstoffe wie z.B. Kunststoffabfälle getrocknet und der Zementherstellung zugeführt werden. Dies führt einerseits zur Effizienzsteigerung in der Zementherstellung und andererseits könnte der Anteil von CO₂-emittierenden Primärenergieträgern reduziert werden.

Die technische Konzeption der Abwärmenutzung des Drehrohrofens sieht vor, dass die Umgebungsluft, welche rund um den Drehrohrofen durch Konvektion und Strahlung des Drehrohrofens erwärmt wird, mittels einer Schalenkonstruktion und einem Ventilator gezielt abgezogen wird und diese als Trocknungsluft zur Trocknungsanlage weitergeleitet wird. Dabei gilt zu beachten, dass der Zementherstellungsprozess im Bereich des Drehrohrofens durch Temperaturänderungen im Drehrohrinneren nicht unzulässig beeinflusst wird.

Zur Ermittlung der nutzbaren Abwärme wurde ein 3D-CFD Modell des Drehrohrofens (siehe Abbildung 4) entwickelt und mittels Oberflächentemperaturmessung validiert. Als Datenbasis wurden die Betriebsdaten von einem repräsentativen Betriebstag und Brennstoffanalysen sowie Materialdaten bezüglich der eingesetzten Schamottmaterialien und des angesinterten Belages auf der schamottierten Drehrohrinnenwand sowie Reaktionsenthalpien der Entsäuerung des Kalkmehls und der Sinterung des Kalkmehls herangezogen.

Rauchgas, Austritt

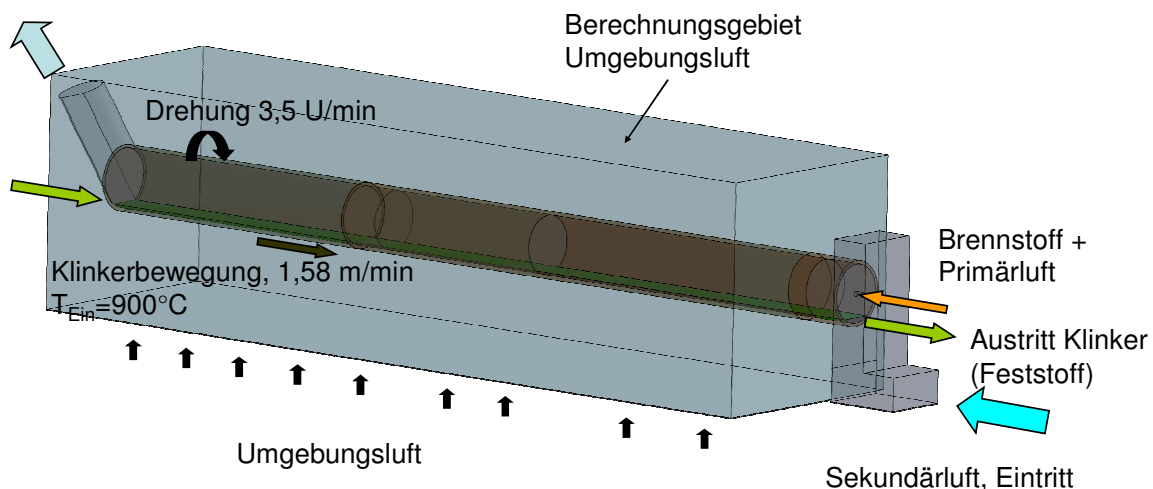


Abbildung 4: 3D-CFD Modell des Drehrohrofens

3.3 Arbeitspaket 3: Bewertung der Abwärmequellen (Korrosion und Deposition) und des Kondensats (Schwermetalle)

Es wurden kontinuierliche Rauchgasmessungen (CO, O₂), diskontinuierliche Abgasmessungen (SO₂, HCl und Staub) sowie Depositionsprobenahmen im Ofenabgas (Abwärmequelle 1) durchgeführt. Diese Daten stellten die Grundlage für die Auslegung der Wärmeauskopplung und die Bewertung der Abwärmequellen hinsichtlich Korrosions- und Abrasions- sowie Depositionsgefahren auf Wärmetauscherrohren dar. Die Bewertung erfolgte auf Basis der Temperaturen und der chemischen Zusammensetzung sowie des Staubgehaltes der Abgasströme. Die Gesamtstaubproben wurden bezüglich ihrer Gehalte an Ca, Si, Mg, Al, Fe, K, Na, Mn, P, S, Cl, Zn, Pb, Cu und Cr sowie TIC analysiert. Zur

Beurteilung des Depositionsaufbaus und des Korrosionspotentials erfolgten Probenahmen mit einer Depositionssonde, die mittels Elektronenmikroskopie untersucht wurden.

Die gemessenen Staubfrachten und auch die Depositionsaufbauzeiten sind als relativ hoch zu bewerten. Allerdings sind die Depositionen locker und lassen sich relativ leicht abreinigen. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass beim Einsatz von einem Glattrohrwärmetauscher mit entsprechend großen Rohrteilungen (große Rohrabstände) und effizient arbeitenden automatischen Wärmetauscherabreinigungen Verschmutzung und Brückenbildung bei den Wärmetauscherrohren in einem vertretbaren Rahmen gehalten werden können. Hinsichtlich der Vermeidung von Abrasion an den Wärmetauscherrohren als Folge der hohen Staubbeladung (ca. 76 g/Nm³ bzw. 7,1 t/a) sollen niedrige Abgasgeschwindigkeiten im Wärmetauscher (Richtwert < 10 m/s), eine gleichmäßige Anströmung und die Vermeidung von Staubsträhnen sowie entsprechende Wandstärkenreserven beim Design des Wärmetauschers berücksichtigt werden. Der Gesamtstaub wie auch die Depositionen bestehen zu rund 1/3 aus Ca, wobei wiederum rund 1/4 des Ca als Karbonat gebunden ist. Cl ist lediglich in geringen Konzentrationen zu finden. Kritisch im Hinblick auf Korrosion sind die SO₂-Konzentrationen im Abgas zu bewerten. Speziell für die Wärmetauscher im Kaminabgas könnte es durch Säuretaupunktsunterschreitungen zu Korrosion und in weiterer Folge zu Leckagen durch Korrosionsangriff kommen. Mögliche Lösungsansätze zur Vermeidung von Korrosion bzw. zur Verminderung von negativen Folgen aufgrund von Korrosion sind Wärmetauscherkonzepte, bei denen die Oberflächentemperaturen der Wärmetauscherrohre über dem Säuretaupunkt liegen und korrosionsbeständige Werkstoffe bzw. entsprechende Wandstärkenreserven. Diese Maßnahmen wurden bei der Wahl und Auslegung der Wärmetauscher (siehe AP4 und AP5) berücksichtigt.

Im Kaminabgas (Abwärmequelle 2) wurde die Beprobung und nachfolgende Analyse des Staubes sowie des bei Kondensation des Abgases anfallenden Kondensates durchgeführt. Die im Abgas enthaltene Hg-Konzentration sowie die Konzentrationen im Abgas an NO_x, SO₂, CO, O₂, TOC und Staub waren laufend über die kontinuierlichen Emissionsmessungen der Firma Wopfinger Baustoffindustrie GmbH verfügbar.

Die Staubprobenahme (inklusive Staubmessung) und nachfolgende Analyse (Ca, Si, Mg, Al, Fe, K, Na, Mn, P, S, Cl, Cu, Zn, Co, Mo, As, Cr, Pb, Cd, V, Hg) war erforderlich, da bei der Wärmerückgewinnung in Variante 2 dieser Staub teilweise als Schlamm in der Abgaskondensationsanlage anfallen wird. Die Kondensatprobenahmen und Analysen waren von Relevanz, um die zu erwartende Kondensatzusammensetzung abschätzen zu können, da dieses in die Kanalisation eingeleitet werden muss und die für eine derartige Einleitung relevanten Emissionsgrenzwerte einzuhalten sind. Dazu wurde ein isokinetisch abgesaugter Abgasstrom kondensiert und das anfallende Kondensat entsprechend gesammelt und nachfolgend analysiert. Die Kondensatproben umfassten neben der Analyse von Hg auch alle weiteren für die Einleitung in einen Kanal relevanten Parameter (Cu, Zn, Co, As, Ni, Cr, Pb, Cd, Sn, Sb, AOX, BTXE, Cyanid, Fluorid, Nitrit-N, Phenolindex, POX, Sulfid, Sulfit, Summe Kohlenwasserstoffe). Dadurch konnten relevante Basisdaten für eine allenfalls erforderliche Behandlung des Kondensates vor dessen Einleitung in die Kanalisation verfügbar gemacht werden. Aufgrund der Hg-Konzentration im Kaminabgas wurde untersucht, ob signifikante Mengen an Hg ins Kondensat der Kondensationsanlage gelangen oder im Kaminabgas verbleiben. Die hierzu erstellte Hg-Bilanz auf Basis der Messungen und Analysen zeigte, dass rund 16% des gasförmig eintretenden Hg im Kondensat anfallen würden und daher Maßnahmen zur Abscheidung des Hg erforderlich sind, um die Hg-Grenzwert für die Einleitung in

die Kanalisation einhalten zu können (siehe auch AP5). Für alle anderen Einleitgrenzwerte werden keine Überschreitungen erwartet.

3.4 Arbeitspaket 4: Abwärmeauskopplung aus dem Zementherstellungsprozess

Als Basis für die technische Konzeption der einzelnen Wärmetauscher zur Abgaswärmeauskopplung wurden umfassende Recherchen bezüglich verfügbarer Wärmetauschertechnologien, deren Eignung und Einsatzgrenzen sowie potentieller Anbieter durchgeführt. In Zusammenarbeit mit renommierten Wärmetauscherlieferanten und basierend auf deren Erfahrung mit vergleichbaren Betriebsbedingungen wurde die technische Konzeption und Detailauslegung der Wärmetauscher durchgeführt.

Im Rahmen des AP4 konnte für die drei untersuchten Varianten jeweils ein Wärmetauscherkonzept entwickelt werden, dass den im AP3 aufgezeigten Lösungsvorschlägen hinsichtlich Korrosions-, Abrasions- und Depositionsproblematik entspricht.

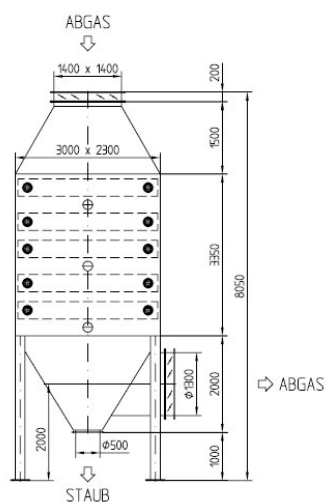
Der in jeder Variante enthaltene *Wärmetauscher Ofenabgas* wurde in Anbetracht der hohen Staubbelastung des Abgases (High-Dust-Wärmetauscher) mit ausziehbaren Registern aus fluchtend angeordneten Glattrohren und großzügigen Rohrabständen dimensioniert. Weiters weist das Gehäuse ausreichend Revisionsöffnungen auf und es wurden im laufenden Betrieb periodisch zum Einsatz kommende Lanzenschraubbläser zum Abreinigen der Rohre mit Druckluft sowie ein ausreichend großer Staubsammelbunker vorgesehen. Mit diesen Maßnahmen sind keine besonderen Probleme bezüglich Deposition zu erwarten. Zur Minimierung von Abrasionserscheinungen wurde beim Design der Abgas-einlaufstrecke auf eine gleichmäßige Anströmung der Rohrregister und auf niedrige Anströmgeschwindigkeiten Wert gelegt. Grundsätzlich wurden bei der Wahl der Rohrwandstärken entsprechende Reserven für etwaig auftretende Abrasion und Korrosion vorgesehen. In Anbetracht der Abgas- und Rohrwandtemperaturen ist beim *Wärmetauscher Ofenabgas* mit keinem erhöhten Korrosionsrisiko zu rechnen. Dennoch wurde entschieden, den Wärmetauscher nicht aus St35.8 sondern aus 1.4301 (V2A) zu fertigen.

Deutlich kritischer ist das Korrosionsrisiko für den *Wärmetauscher Kaminabgas* zu bewerten. Durchgeführte Berechnungen zeigen bei der teilweise auftretenden SO₂ Konzentration im Abgas zwischen 10 und 30 mg/Nm³ (bezogen auf 10 Vol.-% O₂ im trockenen Abgas) eine Säuretaupunkttemperatur im Bereich von 100 bis 110°C. Da bei Variante 1a und Variante 2 das Abgas deutlich unter diesen Säuretaupunkt abgekühlt wird, wurde eine entsprechend säurebeständige Ausführung des *Wärmetauschers Kaminabgas* gewählt. Es werden emaillierte und Kunststoffummantelte fluchtend angeordnete Stahlrohre zum Einsatz kommen. Für die Ummantelung der Rohre und auch für die Auskleidung der Lochböden sowie des Gehäuses wird PFA (ein Copolymer aus Polytetrafluorethylen und Polyperfluorvinylmethylether), welches beständig gegen nahezu alle Chemikalien ist und auch eine, sehr hohe Temperaturfestigkeit aufweist zum Einsatz kommen.

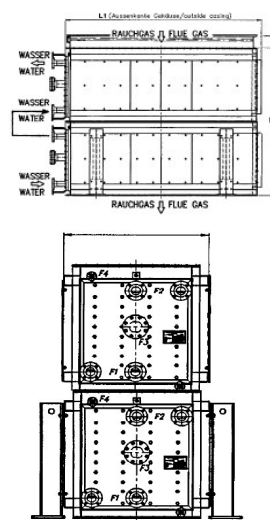
Da eine derartige Ausführung des Wärmetauschers mit sehr hohen Investitionskosten verbunden ist, wurde im technischen Konzept für Variante 1b vorgesehen, das Abgas nicht unter den Säuretaupunkt abzukühlen. Für diese Variante wurde durch die Abkühlung bis an die Nähe des Taupunktes zwar dieselbe säurebeständige Ausführung des Wärmetauschers vorgesehen, durch die geringere Wärme-

tauscherfläche, wenn das Abgas nicht soweit abgekühlt wird, ist allerdings eine signifikante Kosteneinsparung beim Wärmetauscher möglich.

Durch die Einbindung des *Wärmetauscher Kaminabgas* nach dem Filter ist zwar mit einer deutlich reduzierten Staubfracht im Vergleich zum *Wärmetauscher Ofenabgas* zu rechnen, dennoch wurde auch für diesen Wärmetauscher zur Vermeidung von Depositionen eine automatisierte Abreinigungsverfahren auf Basis von Wasserbläsern vorgesehen. Kunststoffummantelte Rohre dürfen nur mit Wasser abgereinigt werden, da andere Methoden (z.B. Dampf- oder Luftbläser) die Kunststoffummantelung beschädigen könnten. In Abbildung 5 sind Aufstellungszeichnungen des Wärmetauschers Ofenabgas und des Wärmetauschers Kaminabgas ausgelegt für Variante 1b beispielhaft dargestellt.



Wärmetauscher Ofenabgas – alle Varianten



Wärmetauscher Kaminabgas - Variante 1b

Abbildung 5: Aufstellungszeichnungen für Wärmetauscher (beispielhaft)

Erläuterungen: Zeichnungen basierend auf eingeholten Angeboten.

Der für Variante 2 zusätzlich erforderliche Kondensator wird gleich ausgeführt wie der Wärmetauscher Kaminabgas. Die zusätzlich erforderliche Kondensatführung sowie die Komponenten des Schlamm- und Kondensatsystems sind im AP5 beschrieben.

Zur Teilentschwadung der Abgase wird ein mehrteiliger Luftvorwärmer zur Vorwärmung der Außenluft und zur Abkühlung der gesättigten Abgase aus dem Kondensator vorgesehen. Der Wärmeaustausch wird in einem nach dem Kreuzstromprinzip arbeitenden Borosilikatglas-Wärmetauscher erfolgen. Das Gehäuse des Wärmetauschers wird aus dem Werkstoff 1.4571 (V4A) gefertigt werden. Die Abreinigung von Kondensator und Luftvorwärmer erfolgt durch Bedüsung mit Kondensat, welches im Kreis geführt.

Entsprechend der im AP2 definierten Abgasabkühlungsraten ergeben sich die in Tabelle 1 zusammengefassten aus der Abgasabwärmernutzung bereitgestellten Wärmeleistungen der einzelnen Wärmetauscher.

Tabelle 1: Zusammenfassung Abwärmenutzungspotentiale der untersuchten Varianten für die Abwärmequellen 1 und 2

Erläuterungen: Detailüberlegungen bezüglich der für die Variante 2 gewählten Abgasabkühlung sind in Kapitel zu AP5 angeführt. Die durchschnittlichen Volumenströme der jeweiligen Gasströme sind aufgrund von Leckageströmen und Teillaststunden gegenüber den Auslegungsvolumenströmen geringer.

		Variante 1a	Variante 1b	Variante 2
Wärmetauscher Ofenabgas				
Auslegungsvolumenstrom feucht (Eintritt)	Nm ³ /h	42.600	42.600	42.600
Abgastemperatur Eintritt	°C	420	420	420
Abgastemperatur Austritt	°C	180	180	180
Jährliche Durchschnittswärmeleistung	kW	3.930	3.930	3.930
Wärmetauscher Kaminabgas				
Auslegungsvolumenstrom feucht (Eintritt)	Nm ³ /h	210.000	210.000	210.000
Abgastemperatur Eintritt	°C	150	150	150
Abgastemperatur Austritt	°C	90	120	70
Jährliche Durchschnittswärmeleistung	kW	4.210	2.110	5.590
Kondensator				
Auslegungsvolumenstrom feucht (Eintritt)	Nm ³ /h			210.000
Abgastemperatur Eintritt	°C			70
Abgastemperatur Austritt	°C			46
Jährliche Durchschnittswärmeleistung	kW			2.560
Luftvorwärmer				
Auslegungsvolumenstrom feucht (Eintritt)	Nm ³ /h			208.200
Abgastemperatur Eintritt	°C			46
Abgastemperatur Austritt	°C			43
Jährliche Durchschnittswärmeleistung	kW			2.220
Wärmebereitstellung Abgaswärmetauscher	kW	8.140	6.040	5.590
Wärmebereitstellung Absorptionswärmepumpe	kW			6.490
Wärmebereitstellung aus Abgasabwärme gesamt	kW	8.140	6.040	12.080

3.5 Arbeitspaket 5: Rauchgaskondensation und Kondensatbehandlung

Im Rahmen von AP5 wurde die technische Konzeption bzw. Dimensionierung der Abgaskondensationsanlage und der Niedertemperaturabwärmeauskopplung auf Basis der örtlichen und technischen Rahmenbedingungen als Auslegungsbasis für die Absorptionswärmepumpe durchgeführt. Einen wesentlichen Schwerpunkt stellte die Recherche bzgl. anwendbarer Technologien und darauf aufbauend die Konzeption bzw. Integration einer Kondensatbehandlungsanlage zur Einhaltung aller relevanten Grenzwerte für die Einleitung des anfallenden Kondensates in einen Kanal dar (Hauptaugenmerk Quecksilber- und Schwermetall-Abscheidung).

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich ist, wird für die Variante inklusive Abgaskondensation und Absorptionswärmepumpe (Variante 2) der *Wärmetauscher Kaminabgas* so ausgelegt, dass eine Abkühlung des Abgases bis 70°C erreicht wird. Dies bringt den Vorteil, dass eine signifikant höhere Wärmemenge direkt zur Fernwärmebereitstellung genutzt werden kann und auch im nachgeschalteten *Kondensator* gesichert der Taupunkt unterschritten wird und so das Kondensationswärmepotential bestmöglich genutzt werden kann.

Zur Vorwärmung der Außenluft wird ebenfalls größtenteils Kondensationswärme genutzt. Die Außenluft wird hierfür über einen Zuluftschacht durch den *Luftvorwärmer* gesaugt. Die Mischung von vorgewärmter Außenluft und Abgas (Teilentschwadung) erfolgt in einer Mischkammer, deren Konstruktion eine optimale Durchmischung der beiden Ströme gewährleistet. Um das Mitreißen von Kondensattropfen aus dem *Kondensator* und dem *Luftvorwärmer* zu verhindern, wird vor der Mischkammer ein Tropfenabscheider positioniert.

Das technische Konzept sieht vor, dass die im *Kondensator* und im *Luftvorwärmer* anfallende Kondensatschlamm-Wasser-Mischung von einem Auffangbecken in ein Sedimentationsbecken gefördert wird. Im Sedimentationsbecken soll der Feststoffanteil nach dem Verfahren der Gegenstromsedimentation vom Kondensatwasser getrennt werden. Der anfallende Kondensatschlamm soll in einem Schlamm-sammelbecken zwischengelagert und anschließend ordnungsgemäß entsorgt werden.

Die Löslichkeit von Schwermetallen im Kondensatwasser ist vom pH-Wert des Systems abhängig, weshalb ein Kontrollsystem mittels Natronlaugeneindüsung (Neutralisation) für einen konstanten pH-Wert von 7,5 sorgt. Dieser Wert garantiert, dass es kaum zu Auswaschungen von Schwermetallen aus dem Kondensatschlamm und damit zu einer Belastung des Kondensatwassers kommt.

Die Hg-Konzentrationen im Abgas (siehe auch AP3) sind für derartige Prozesse als relativ niedrig einzustufen und entsprechen auch den Emissionsauflagen für den Betrieb des Werkes. Trotzdem ist auf Basis der durchgeführten Messungen und Berechnungen zu erwarten, dass die im Kondensat auftretende Hg-Fracht über dem Grenzwert für die Einleitung des Kondensates in die Kanalisation liegen wird. Um die Hg-Konzentration im Kondensat unter den Grenzwert für die Einleitung des Kondensates zu bringen, könnte die Dosierung von Calciumchlorid in das neutralisierte Kondensat realisiert werden. Durch die Calciumchloridzugabe bildet sich Calciumhydroxid, welches als Spurenfänger Hg aber auch andere Schwermetalle bindet. Eine Alternative Hg-Abscheidungsmethode wäre, das Kondensatwasser nach der Neutralisation mit einem Fällungsmittel zu versetzen, um das Hg in stabiler Sulfidform zu binden. Das Sulfid könnte über eine Filterpresse aus dem Kondensat abgeschieden werden. Das Organosulfid TMT 15® (eine 15 %ige wässrige Lösung von Trimercapto-s-triazin, Trinatriumsalz - $C_3N_3S_3Na_3$, CAS-RN 17766-26-6) reagiert mit Hg zu sehr stabilen, nahezu unlöslichen Schwermetall-TMT-Verbindungen und könnte daher als Fällungsmittel zum Einsatz kommen. Bei Verwendung im neutralen bis schwach alkalischen pH-Bereich bildet sich ein Feststoff, der leicht abgetrennt werden kann. Das gereinigte Kondensat wird in die Kanalisation geleitet. Beide Optionen sind aus der Abwasseraufbereitungstechnik bekannt, sind aber mit relativ hohem apparativem und regelungstechnischem Aufwand und mit hohen Betriebskosten verbunden. Aus diesem Grund wurde der Ansatz gewählt, Hg bereits im Abgas soweit abzuscheiden, dass die schlussendlich im Kondensat auftretenden Hg-Konzentrationen unter den Einleitgrenzwerten liegen und für das Kondensat mit Ausnahme der pH-Wert-Regelung keine weiteren Aufbereitungsschritte erforderlich sind.

Zur Hg-Abscheidung in Abgasen werden vermehrt Trockensorptionsverfahren eingesetzt. Beim Einsatz von Aktivkohle sind Abscheideraten von über 90% erreichbar, wobei die Aktivkohle rund 3% des Filterkuchens ausmachen sollte. In Anbetracht der relativ hohen Staubbelastungen im Abgas wäre der erforderliche Anteil an Aktivkohle relativ schwer zu realisieren. Außerdem müsste der gesamte anfallende Filterstaub im Hinblick auf die ordnungsgemäße Entsorgung mit höheren Entsorgungskosten bewertet werden. Aus diesem Grund wurde entschieden, als erste Stufe den bestehenden Filter zu belassen (um einen Großteil des Staubs abzuscheiden) und dann zusätzlich als zweite Stufe einen

Gewebefilter mit Trockensorption zu schalten. Bei diesem Konzept wird das kohlenstoffhaltige Sorbens staubförmig in den Abgasstrom vor dem neu zu errichtendem Gewebefilter eingeblasen. Die Abscheidung des Sorbens erfolgt gemeinsam mit dem prozessseitig am neuen Gewebefilter anfallenden Staub (weitere Entstaubung). Der abgeschiedene Filtermischstaub wird kontinuierlich ausgetragen und in einem Silo zwischengelagert und anschließend entsorgt. Durch diese Maßnahmen kann eine zusätzliche Entstaubung und vor allem eine signifikante Reduktion der Hg-Emissionen im Abgas erzielt werden und auch der Einleitgrenzwert im Kondensat gesichert eingehalten werden. Die für die Hg-Abscheidung eingesetzte Aktivkohle wird mittels Silofahrzeug angeliefert und pneumatisch in ein Vorlagesilo gefördert. Über eine Dosiereinrichtung wird die Aktivkohle anschließend pneumatisch mittels Druckluft zur Einblasstelle gefördert. Dieses Konzept wird auch im Rahmen von AP9 einer wirtschaftlichen Bewertung unterzogen.

3.6 Arbeitspaket 6: Integration bzw. Optimierung der Absorptionswärmepumpe

Basierend auf AP4 und AP5 erfolgte die technische Dimensionierung und Integration der Absorptionswärmepumpe. Dabei wurden die Anforderungen an die Wärmepumpe, insbesondere die Betriebsweise, die verfügbare Wärmemenge, die maximale Wärmeleistung und das Temperaturniveau sowie deren Schwankungsbreiten definiert und die Auswirkungen der verfügbaren Temperaturen und deren Schwankungen auf die Effizienz und Leistung der Absorptionswärmepumpe untersucht.

Hierfür erfolgte ein Marktscreening hinsichtlich geeigneter und verfügbarer Absorptionswärmepumpen und die Einholung von Angeboten und der erforderlichen technischen Daten.

Grundsätzlich arbeiten Absorptionswärmepumpen mit einem Gemisch aus einem Arbeitsmittel (Kältemittel) und einem Lösungsmittel. Die Kältemittel nehmen bei niedriger Temperatur und niedrigem Druck Wärme auf und können die Wärme dann durch Druckerhöhung mit höheren Temperaturen wieder abgeben. Ein Arbeitsstoffpaar ist Ammoniak als Arbeitsmittel und Wasser als Lösungsmittel. Ein weiteres gängiges Stoffpaar in Absorptionswärmepumpen für Industrieanwendungen, das auch entsprechend für dieses Projekt zum Einsatz kommen würde, besteht aus Wasser als Arbeitsmittel und Lithiumbromid als Lösungsmittel.

In der Absorptionswärmepumpe wird im Austreiber dem Arbeitsstoffpaar Energie auf höherem Niveau (Hochtemperaturrenergiezufuhr durch Wärmeauskopplung aus Abwärmequelle 1) zugeführt und das Kältemittel wird vom Lösungsmittel getrennt. Der Kältemitteldampf wird in einen Wärmeübertrager (Kondensator) geleitet, wo er im Wärmeaustausch mit Heizungswasser (2. Stufe der Wärmeauskopplung), abgekühlt wird und wieder in einen flüssigen Zustand übergeht. Anschließend wird das verflüssigte Kältemittel in den Verdampfer geleitet, in dem durch Niedertemperaturrenergiezufuhr durch Wärmeauskopplung aus Abwärmequelle 2 das Kältemittel wieder in den dampfförmigen Zustand übergeht. Der Kältemitteldampf gelangt dann in den Absorber und wird dort vom Lösungsmittel, welches aus dem Austreiber kommt, absorbiert: Die im Absorber freigesetzte Wärmemenge wird als 1. Stufe der Wärmeauskopplung genutzt. Der Fernwärmerücklauf wird somit in den beiden beschriebenen Stufen (Absorber und Kondensator) von 60°C auf 100°C aufgewärmt. Die entstandene Lösung aus Kältemittel und Lösungsmittel gelangt dann vom Absorber wieder in den Austreiber gepumpt und der Kreislauf beginnt von neuem. Die Hochtemperaturrenergiezufuhr zum Austreiber der Absorptionswärmepumpe

wird mittels Druckheißwasser in einem Druckheißwasserkreislauf mit einem Systemdruck von rund 11 bar_(a) erfolgen.

In Abbildung 3 und in Tabelle 1 sind die im Nennauslegungsfall für die Absorptionswärmepumpe berücksichtigten Medientemperaturen am Ein- und Austritt von Austreiber, Kondensator, Verdampfer und Absorber sowie die korrespondierenden Leistungen bzw. auch die durch die Integration der Absorptionswärmepumpe erzielbaren Wärmeleistungen zusammengefasst. In Abbildung 6 ist die Leistungszahl der Absorptionswärmepumpe in Abhängigkeit der Eintrittstemperatur des Heißwassers in den Generator dargestellt.

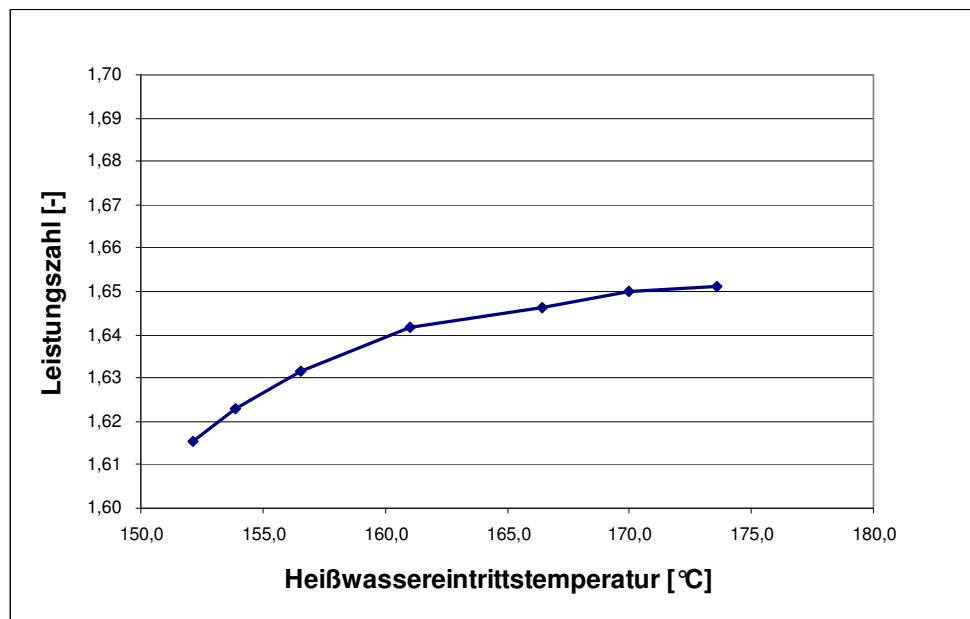


Abbildung 6: Leistungszahl der Absorptionswärmepumpe in Abhängigkeit von der Eintrittstemperatur des Heißwassers in den Austreiber

Erläuterungen: Leistungszahl (COP...Coefficient Of Performance) = Nutzbare Wärme / Antriebswärme); Temperatur Vorlauf Fernwärme am Austritt aus dem Kondensator: 100°C bei einer Spreizung von 40°C; Temperatur Niedertemperaturheizungswasser am Eintritt in den Verdampfer: 55°C bei einer Spreizung von 20°C; Spreizung Hochtemperaturheizungswasser im Austreiber: 10°C

Die Druckheißwassereintrittstemperatur in den Austreiber wird im Nennauslegungsfall 170°C betragen. Eine höhere Eintrittstemperatur würde die Leistungszahl der Absorptionswärmepumpe nur marginal verbessern und bringt daher keinen relevanten Vorteil. Es ist jedoch anzumerken, dass eine Auslegung auf signifikant niedrigere Heißwassereintrittstemperaturen in den Austreiber deutlich höhere Investitionskosten verursachen würde, um die gleiche Fernwärmeleistung bereitstellen zu können. Wie aus Abbildung 7 ersichtlich ist, kann eine Absenkung der der Fernwärmeverlauftemperatur auf 95°C im Vergleich zu 100°C gemäß Nennauslegung eine Verbesserung der Leistungszahl bewirken. Dieser COP-Vorteil kann und soll im Betrieb der Anlage durch die geplante gleitende Festsetzung der maximalen Vorlauftemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur genutzt werden.

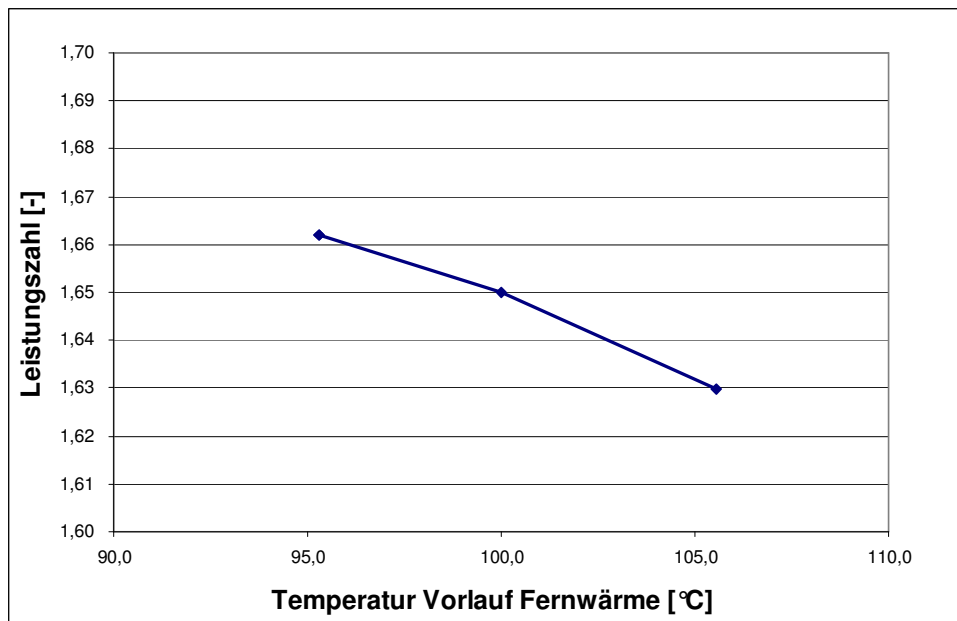


Abbildung 7: Leistungszahl der Absorptionswärmepumpe in Abhängigkeit von der Vorlauf-temperatur für die Fernwärmebereitstellung

Erläuterungen: Leistungszahl (COP...Coefficient Of Performance) = Nutzbare Wärme / Antriebs-wärme); Temperatur Hochtemperaturheizungswasser am Eintritt in den Generator: 170°C bei einer Spreizung von 10°C; Temperatur Niedertemperaturheizungswasser am Eintritt in den Ver-dampfer: 55°C bei einer Spreizung von 20°C; konstante Spreizung des Fernwärmewassers von rund 40°C

3.7 Arbeitspaket 7: Abwärme Drehrohrofen

Im Rahmen von AP7 wurde die technische Konzeption bzw. Dimensionierung der Anlagen zur Abwärmenutzung des Drehrohrofens für Trocknungsprozesse durchgeführt (Abwärmequelle 3). Das Konzept sieht vor, dass über Konvektion und Strahlung die Abwärme des Drehrohrofens an die unmittelbare Umgebungsluft innerhalb einer Ummantelungs-Schalenkonstruktion (= „Haube“) rund um den Drehrohrofen abgegeben und über einen Ventilator zu einer Trocknungsanlage weitergeleitet wird. Die technische Konzeption der Abwärmenutzungsanlage wurde mittels eines 3D-CFD Modells durchgeführt. Die wesentlichen Ziele der technischen Konzeption der Abwärmenutzungsanlage sind das Erreichen der Luftaustrittstemperatur von ca. 90°C (Trocknungslufttemperatur) und eine möglichst hohe Abwärmeleistung. Dabei war zu beachten, dass der Zementherstellungsprozess im Innenbereich des Drehrohrofens durch Temperaturänderungen nicht wesentlich beeinflusst wird. In einem ersten Schritt wurde ein Basiskonzept erstellt (siehe Abbildung 8), welches den kompletten Wärmedurchgang vom Drehrohrinneren bis zur Außenfläche der Schalenkonstruktion (inkl. 100 mm Isolierung an der Außenseite) berücksichtigte.

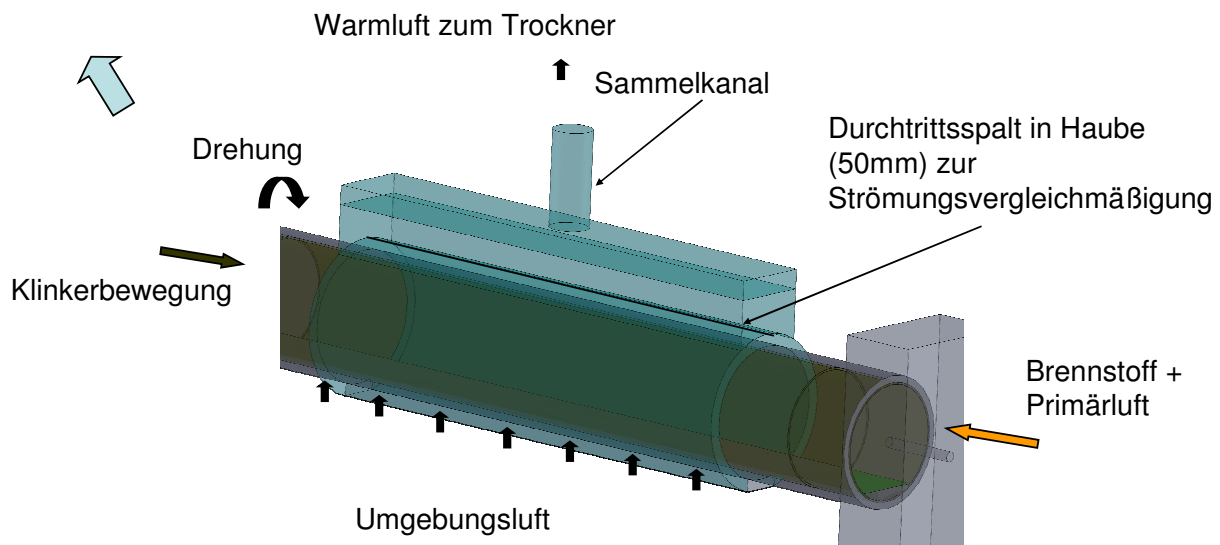


Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung der Ummantelungskonstruktion

Nach der Evaluierung des Basiskonzepts wurden vier Varianten mit unterschiedlichen Abständen der Ummantelung zur Oberfläche des Drehrohrofens sowie mit und ohne Längsrippen auf der Innenseite der Ummantelungskonstruktion simuliert, mit dem Ziel, die Abwärmenutzung zu optimieren.

Variante V03 (Ringspalt 240 mm und Anordnung von Längsrippen auf der Schalenkonstruktion) wurde als Bestfall der untersuchten Varianten mit der maximal erzielten Austrittstemperatur der Luft bzw. der maximalen mit der Luft abgeführten Wärmeleistung bei gegenüber dem Drehrohr ohne Ummantelungskonstruktion kaum geänderten Oberflächentemperaturen ausgewählt und für die gesamte zugängliche Länge (Variante V05) simuliert. Die Variante V05 stellt die finale Variante dar. Eine vereinfachte Darstellung der finalen Ummantelungskonstruktion ist in Abbildung 9 ersichtlich.

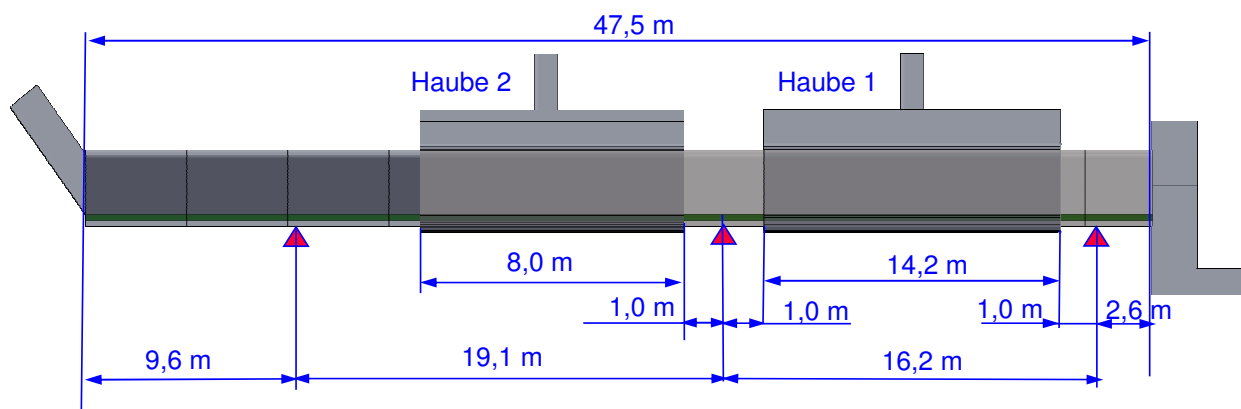


Abbildung 9: Vereinfachte Darstellung der Ummantelungskonstruktion (Haube 1 und Haube 2) entsprechend Variante V05 für die zugänglichen Stellen des Drehrohres

In Abbildung 10 ist der Stromlinienverlauf der Luft für Variante V03 dargestellt und entsprechend der Temperatur unterschiedlich eingefärbt.

In Abbildung 11 sind die Simulationsergebnisse für die Oberflächentemperaturen des Drehrohrofens mit und ohne Ummantelungskonstruktion dargestellt. Es zeigt sich, dass die Abwärmenutzung kaum Auswirkung auf die Drehrohroberflächentemperaturen hat.

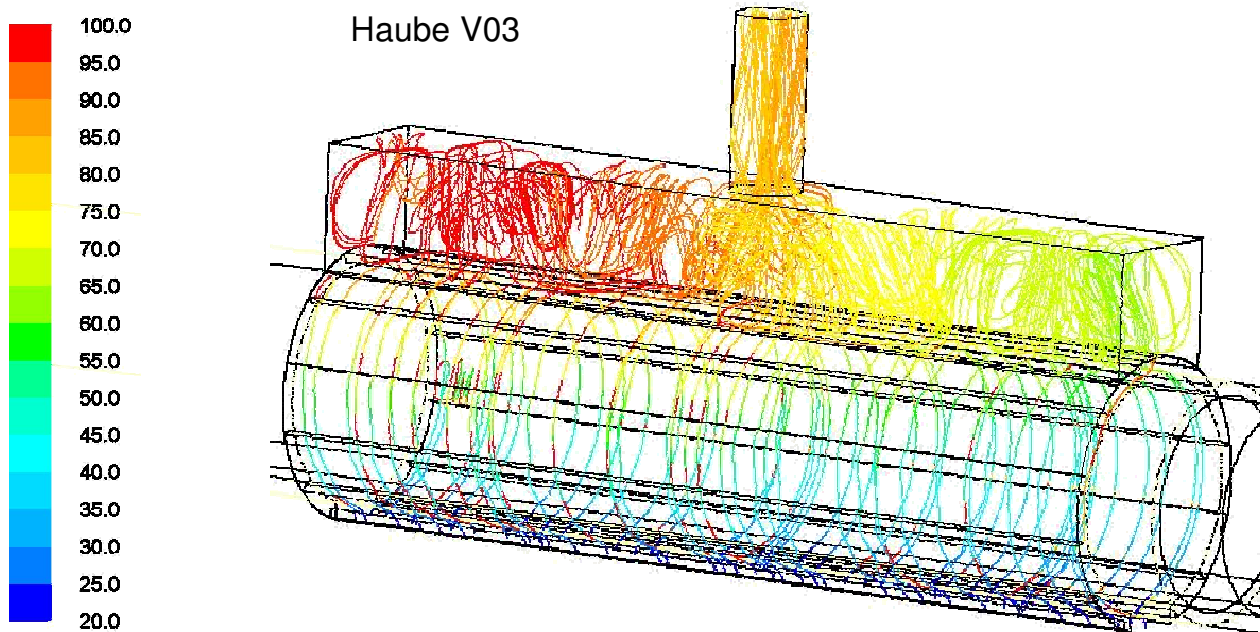


Abbildung 10: Stromlinien der Luft eingefärbt nach der Temperatur [°C] für Variante V03

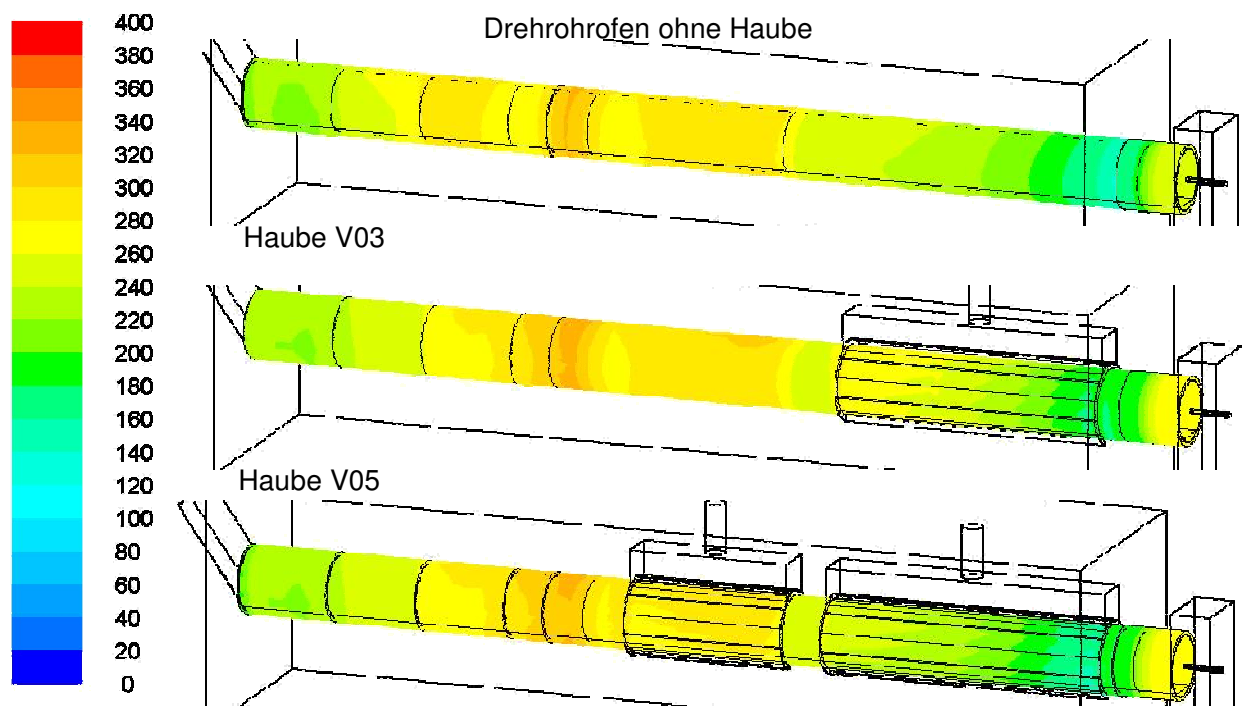


Abbildung 11: Isoflächen der luftseitigen Oberflächentemperaturen des Drehrohrföfens [°C] für Variante ohne Haube sowie Varianten V03 und V05

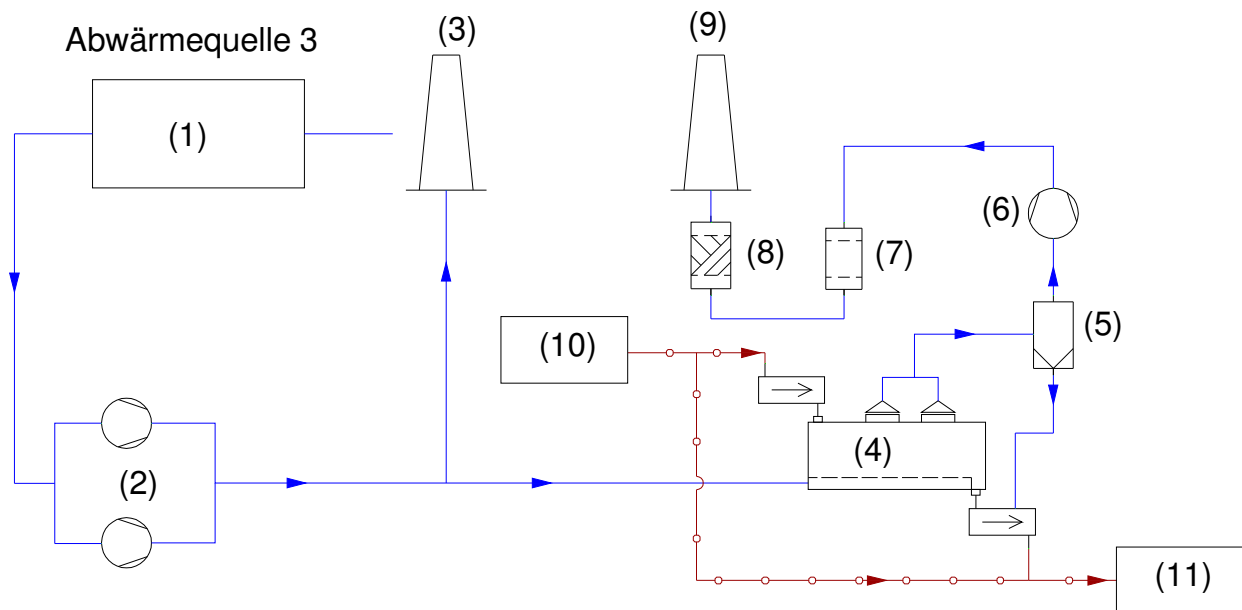


Abbildung 12: Anlagenschema Abwärmenutzungsanlage Drehrohrföfen

Erläuterungen: (1) Abwärme–Drehrohrföfen; (2) Abluftventilator 1 (redundant); (3) Notkamin (4) Trockner; (5) Impulsfilteranlage; (6) Abluftventilator 2; (7) Hochleistungswäscher; (8) Biofilter; (9) Biofilter Kamin; (10) Lager Trocknungsgut „feucht“; (11) Einsatzort des Trockenguts im Produktionsprozess;

In Abbildung 12 ist ein vereinfachtes Schema des technischen Konzeptes zur Abwärmenutzung aus dem Drehrohrföfen dargestellt. Die aus der Abwärme des Drehrohrföfens gewonnene Nutzwärme wird einem vibrierenden Fließbettrockner zugeführt, welcher in unmittelbarer Nähe des Drehrohrföfens situiert ist. Zur Gewährleistung der Anlagensicherheit ist die Wärmeabführung aus dem Drehrohrföfen mit redundant ausgeführten Abluftventilatoren ausgerüstet, welche weiters noch an einer Notstromversorgung angebunden sind. Die Abwärme kann dann im Störfall über den Notkamin an die Umgebung abgeführt werden. Das Trocknungsgut wird aus dem Brennstofflager zum Trockner gefördert, getrocknet und danach zum Einsatzort des trockenen Trocknungsguts geleitet. Bei Ausfall der Trocknungsanlage kann das Trocknungsgut direkt dem Einsatzort zugeführt werden. Die vom Trocknungsgut abgekühlte und organisch beladene Trocknungsluft wird durch einen Biofilter geleitet und danach an die Umgebung abgegeben. Als Trocknungsgut wurde in den weiterführenden Betrachtungen eine bereits derzeit eingesetzte Kunststofffraktion berücksichtigt, welche in der konzipierten Trocknungsanlage von ca. 15 % Wassergehalt auf ca. 1 % Wassergehalt getrocknet werden kann.

In Tabelle 2 sind die Auslegungsdaten, Leistungen und Energiemengen des Abwärmenutzungspotentials für den Drehrohrföfen und der Trocknungsanlage zusammengefasst.

Tabelle 2: Zusammenfassung Abwärmenutzungspotentiale Drehrohrofen und Trocknungsanlage

Drehrohrofen - Abwärme		
Luftvolumenstrom (feucht)	Nm ³ /h	48.700
Luftmassenstrom (feucht)	kg/h	62.500
Zulufttemperatur	°C	18,6
Ablufttemperatur	°C	92,9
Abwärmeleistung Drehrohrofen	kW	1.300
Volllaststunden	h/a	7.100
Energie Abwärme	MWh/a	9.230
Trocknungsanlage (Trockengut - Kunststoff)		
Trocknerdurchsatz	tFS/h	4,9
	tTS/h	4,2
Temperatur Eintritt Trocknungsluft	°C	92,9
Temperatur Austritt Trocknungsluft	°C	56,6
Temperatur Eintritt Trockengut	°C	15,0
Temperatur Austritt Trockengut	°C	50,0
Wassergehalt Trockengut Eintritt	Gew%	15,0
Wassergehalt Trockengut Austritt	Gew%	1,0
Wärmeleistung Trockner	kW	600
Volllaststunden	h/a	7.100
Energiemenge Trocknung	MWh/a	4.260

Von der Drehrohr-Abwärmeleistung von rund 1,3 MW können ca. 600 kW für die nachgeschaltete Trocknungsanlage genutzt werden. Der Rest wird über die Trocknerabluft in den Kamin abgeführt, da diese nur bis ca. 56°C im Trockner abgekühlt werden kann (im Vergleich zur Ansaugluft für die Drehrohrkühlung mit 18,6°C). Ausgehend von 7.100 Volllaststunden pro Jahr für die Nutzung der Abwärme aus dem Drehrohrofen zu Trocknungsprozessen, ergibt sich eine jährliche Nutzwärmemenge von ca. 4,3 GWh/a.

3.8 Arbeitspaket 8: Lastmanagement und Fernwärmeinfrastruktur

Im Zuge dieses Arbeitspaketes wurden Lastschwankungen und Betriebszeiten auf Seiten der Wärmeerzeugung und auf Seiten der Fernwärmeversorgung identifiziert und evaluiert und darauf aufbauend ein intelligentes Lastmanagement unter Berücksichtigung der Abwärmequellen (1 und 2), des Pufferspeichersystems und der Spitzenlastkessel erarbeitet. Die Abwärmequelle 3 spielt bei diesen Betrachtungen keine Rolle.

In Abbildung 13 sind der Wärmebedarf des Fernwärmenetzes im Endausbau (als ungeordnete Jahresganglinie) sowie die zur Deckung des Fernwärmebedarfs verfügbaren bzw. zum Einsatz kommenden Wärmequellen (Abwärmenutzung, Pufferspeicher und Spitzenlastkessel) für die Variante 2 beispielhaft dargestellt. Für die Varianten 1a und 1b wurden analoge Diagramme erstellt.

Das Werk hat im Winter jedes Jahr einen fünfwöchigen Wartungsstillstand. In diesem Zeitraum sowie in Betriebsphasen in denen die Klinkerproduktion bzw. die Wärmerückgewinnungsanlagen nicht verfügbar sind und zur Spitzenlastabdeckung muss der Wärmebedarf über die Erdgaskessel bereitgestellt werden.

Jahresdauerlinie Variante 2 für Endausbaustufe (60 GWh/a)

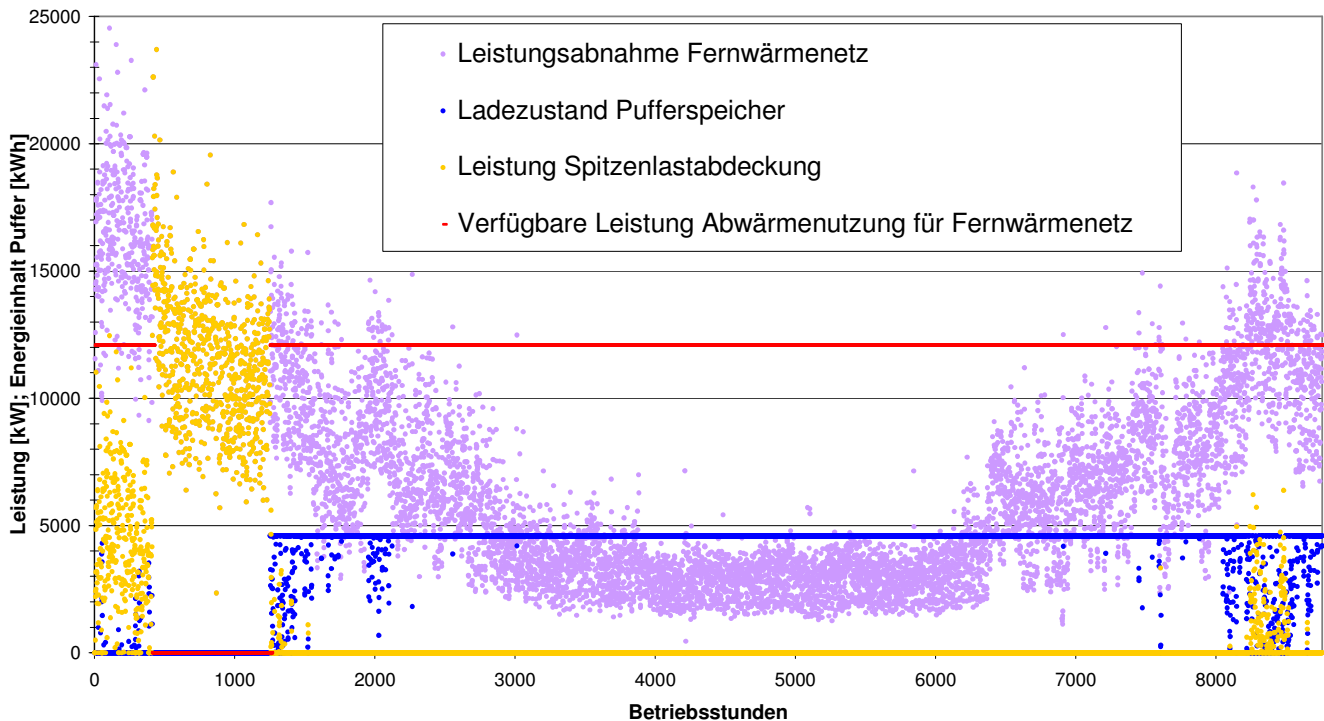


Abbildung 13: Jahresdauerlinie und Lastmanagement für Variante 2 im Endausbau des Fernwärmenetzes

Erläuterungen: 5-wöchiger Wartungsstillstand des Werkes ist berücksichtigt. Betriebsphasen in denen die Abwärmenutzungsanlage nicht verfügbar ist, sind im Diagramm nicht dargestellt, wurden aber bei der Berechnung der Jahresenergiebilanz und der Pufferspeicherberechnung berücksichtigt.

Im für alle Varianten berücksichtigten Pufferspeicher mit einem Wasservolumen von rund 200 m³ können bei einer Temperaturdifferenz von 40 °C (Vorlauf 100 °C und Rücklauf 60 °C) rund 9 MWh thermische Energie gespeichert werden. Durch den Pufferspeicher kann zum Einen die schlechte Regelbarkeit der Abgaswärmetauscher ausgeglichen werden und zum Anderen Erdgas eingespart werden, da durch den Ausgleich von Lastspitzen und durch die Überbrückung von kurzen betrieblichen Ausfällen die Betriebszeit der Erdgaskessel reduziert werden kann. Aus den in Tabelle 3 für die 3 Varianten zusammengefassten Jahresenergiebilanzen sind die über die Abwärmenutzung inklusive Pufferspeicher bzw. die Spitzenlastkessel bereit gestellten Energiemengen ersichtlich. Die Variante 2 mit der Absorptionswärmepumpe kann durch die erweiterte Niedertemperaturnutzung die größte Abwärmenutzungsenergie bereitstellen.

Tabelle 3: Jahresenergiebilanzen der Varianten für die Abwärmequellen 1 und 2

Erläuterungen: Darstellung für Endausbaustufe des Fernwärmenetzes.

		Variante 1a	Variante 1b	Variante 2
Wärmebedarf Fernwärmenetz (ab Werk) für Endausbaustufe	MWh/a	60.000	60.000	60.000
Energiebereitstellung Spitzenlastkessel	MWh/a	21.696	26.956	17.049
Energiebereitstellung Abwärmenutzung inkl. Pufferspeicher	MWh/a	38.304	33.044	42.951

3.9 Arbeitspaket 9: Ökologische und ökonomische Bewertung des Gesamtprojekts

Im Rahmen von AP9 wurden die für die Abwärmequellen 1 und 2 untersuchten drei Varianten einer wirtschaftlichen und ökologischen Beurteilung unterzogen, um eine Entscheidungsbasis bezüglich Realisierung des technisch und wirtschaftlich besten Abwärmenutzungskonzeptes in Form eines Demonstrationsprojektes zu haben.

Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen umfassten eine Kostenrechnung in Anlehnung an die VDI2067 zur Ermittlung der Kapitalkosten, der Instandhaltungskosten und der verbrauchs- und betriebsgebundenen Kosten sowie der spezifischen Wärmegestehungskosten und eine dynamische Amortisationsrechnung inklusive Sensitivitätsanalysen für alle untersuchten Varianten.

In Tabelle 4 sind die Investitionskosten für die untersuchten Varianten zusammengefasst. Für alle in den vorangehenden Arbeitspaketen beschriebenen, wesentlichen Komponenten wurden Angebote von potentiellen Lieferanten eingeholt und der Abschätzung der Investitionskosten zugrunde gelegt.

Tabelle 4: Investitionskosten der untersuchten Varianten für Abwärmequellen 1 und 2

Erläuterungen: Die Planungskosten wurden mit 7% der Investitionskosten für die Anlagentechnik und zusätzlichen pauschalen Kostenansätzen für Bautechnik (Statik), Infrastruktur, Einreichplanung, Gutachten, etc. berücksichtigt.

	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2
	€	€	€
Baukosten			
Stützkonstruktion für Wärmetauscher			
Heizhaus, Fundamente	304.000	304.000	394.000
Aufschließung, Infrastruktur	88.000	88.000	88.000
Fernwärmenetz			
Lieferumfang Netzbetreiber	0	0	0
Maschinenbauliche Investitionen			
Wärmetauscher inkl. Einbindung	2.048.000	1.134.000	2.480.000
Absorptionswärmepumpe	0	0	900.000
E-Installation u. Regelung	378.000	264.000	560.000
H-Installation inkl. Pufferspeicher	680.000	650.000	780.000
Spitzenlastabdeckung	400.000	400.000	400.000
Gewebefilter mit Trockensorption	0	0	1.800.000
Kondensat- u. Schlammssystem	0	0	60.000
Planung			
Bautechnik u. Maschinenbau	359.000	284.000	622.000
Sonstiges			
Unvorhergesehenes	213.000	156.000	300.000
Gesamtinvestitionskosten	4.470.000	3.280.000	8.384.000

Die Ermittlung der kapitalgebundenen Kosten erfolgte durch Multiplikation der Investitionskosten mit dem, vom Betrachtungszeitraum (Nutzungsdauer) und Kalkulationszinssatz abhängigen, Kapitalwiedergewinnungsfaktor, woraus sich die jeweilige Annuität ergibt. Die Nutzungsdauer und die Instandhaltungskosten wurden entsprechend den Vorgaben der VDI 2067 berücksichtigt. Die berücksichtigten betriebs- und verbrauchsgebundenen Kosten umfassen Erdgaskosten (35 €/MWh Hu x Erdgasbedarf

der jeweiligen Variante), Personalkosten (800 h x 28 €/h), Strombezugskosten (0,09 €/kWh x Strombedarf der jeweiligen Variante auf Basis eines spezifischen Stromverbrauchs von 15 kWh/MWh erzeugter Energie) und sonstige Kosten (1% der Investitionskosten für Versicherung, Buchhaltung, Rechtskosten, etc.) sowie zusätzliche Kosten für Aktivkohle und Flugmischstaubentsorgung bei Variante 2. Für das Projekt ist eine Investitionsförderung im Rahmen der betrieblichen Umweltförderung zu erwarten, diese wurde in Abstimmung mit der Förderstelle mit 30% der Investitionskosten bzw. mit einer maximalen Obergrenze von 1,5 Millionen € mit einem Jahr Auszahlungsverzögerung nach Projektrealisierung berücksichtigt. Die Erlöse aus dem Wärmeverkauf ergeben sich aus einem Wärmepreis von 30 €/MWh sowie der entsprechend der jeweiligen Ausbaustufe gelieferten Wärmemenge. Sämtliche Kosten und Erlöse wurden im Rahmen der dynamischen Amortisationsrechnung mit 3% indexiert. Im Rahmen der Amortisationsrechnung wurde ein Eigenkapitalanteil von 40% und eine Kreditlaufzeit von 8 Jahren (Kreditvariante Annuitäten-Rückzahlung) sowie ein Eigen- und Fremdkapitalzinssatz von je 5% berücksichtigt. Der kumulierte diskontierte Cash Flow (CDCF) entspricht dem Kapitalwert am Ende des Betrachtungszeitraums. In Tabelle 5 sind alle wesentlichen Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 5: Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen für die Varianten der Abwärmequellen 1 und 2

Erläuterungen: Die entsprechend VDI2067 ermittelten Kosten und Wärmeerlöse sind für die Endausbaustufe jedoch monetär bezogen auf das 1. Betriebsjahr dargestellt.

		Variante 1a	Variante 1b	Variante 2
Investitionskosten	€	4.470.000	3.280.000	8.384.000
Förderanteil bezogen auf die Gesamtinvestitionskosten	-	30,0%	30,0%	17,9%
Spezifische Wärmegegestehungskosten (ohne Förderung)	€/MWh	24,6	25,4	29,2
Spezifische Wärmegegestehungskosten (mit Förderung)	€/MWh	22,9	24,2	27,2
Spezifischer Wärmeverkaufserlös	€/MWh	30,0	30,0	30,0
Differenz aus Erlös und Kosten (ohne Förderung)	€/MWh	5,4	4,6	0,8
Differenz aus Erlös und Kosten (mit Förderung)	€/MWh	7,1	5,8	2,8
Kapitalgebundene Kosten (ohne Förderung)	€/a	345.367	250.575	654.701
Instandsetzungskosten	€/a	139.740	90.020	224.820
Verbrauchsgebundene Kosten	€/a	924.733	1.129.289	744.017
Betriebsgebundene Kosten	€/a	67.100	55.200	128.040
Summe Wärmegegestehungskosten (ohne Förderung)	€/a	1.476.940	1.525.084	1.751.578
Erlöse Wärmeverkauf (Endausbau)	€/a	1.800.000	1.800.000	1.800.000
Differenz aus Erlös und Kosten (ohne Förderung)	€/a	323.060	274.916	48.422
Dynamische Amortisationszeit	Jahre	7,1	6,5	13,2
Kumulierter diskontierter Cash Flow (CDCF) nach 15 Jahren	€	3.578.000	3.048.000	849.000

Im Rahmen von Sensitivitätsanalysen wurden die Auswirkungen wichtiger Einflussparameter auf das wirtschaftliche Ergebnis der einzelnen Varianten untersucht. Hierfür wurden der Wärmepreis, der Erdgaspreis, die Investitionskosten und der Fördersatz um jeweils 10% variiert. Diese Ergebnisse wurden im Endbericht aufgrund der großen Datenmenge nicht angeführt sind aber bei der im Kapitel 2.3

beschriebenen Entscheidungsfindung bezüglich der weiteren Vorgangsweise entsprechend eingeflossen.

In der Endausbaustufe beträgt die Wärmebereitstellung ab Werk rund 60 GWh/a. Berücksichtigt man Netzverluste von 10% ergibt sich nach dem Endausbau des Fernwärmenetzes eine Nutzwärmemenge von rund 54 GWh/a die derzeit über die Energieträger Erdgas (45%), Heizöl (40%), Strom (10%) und holzartige Brennstoffe (5%) erzeugt wird. In Tabelle 6 sind die bei der derzeitigen Wärmeerzeugung verursachten CO₂-Emissionen dargestellt.

Tabelle 6: Derzeitige CO₂-Emissionen durch individuelle Wärmeerzeugung der Fernwärmenetzkunden

Erläuterungen: Für die Berechnung des Primärenergiebedarfes wurden folgende Jahresnutzungsgrade der Feuerungsanlage angenommen: Erdgas-Feuerung 0,77, Heizöl-Feuerung 0,75; Biomasse-Feuerung: 0,66 (Quelle: STANZEL W., JUNGMEIER G., SPITZER J, 1995: Emissionsfaktoren und energietechnische Parameter für die Erstellung von Energie- und Emissionsbilanzen im Bereich Raumwärmeversorgung, Endbericht, Institut für Energieforschung, Joanneum Research). Die Emissionsfaktoren sind der CO₂-Studie des Ökofonds entnommen und werden von der Kommunalkredit Public Consulting GmbH für Emissionsprognosen zur Beurteilung von Projekten vorgegeben.

	Primärenergie	Emissionsfaktor	CO ₂ -Emission
	MWh/a	t CO ₂ /MWh	t/a
Erdgas	31.560	0,229	7.227
Heizöl	28.990	0,338	9.799
Strom	5.400	0,803	4.336
Holzartige Brennstoffe	4.090		
Summe CO ₂ -Emissionen			21.362

Nach Realisierung des Projektes wird die Bandlast des Fernwärmebedarfs durch die Abwärmenutzung bereitgestellt, wodurch sich für diesen Teil der Wärmeerzeugung keine neuen CO₂-Emissionen ergeben. Die CO₂-Emissionen, die durch die Abdeckung der Lastspitzen mittels der hierfür vorgesehenen Erdgaskessel auftreten werden, sind entsprechend der erarbeiteten Jahresenergiebilanzen für alle drei untersuchten Abwärmenutzungsvarianten in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: CO₂-Emissionen nach Projektrealisierung durch fossile Spitzenlastabdeckung für die Abwärmequellen 1 und 2

Erläuterungen: Für die Erdgaskessel wurde ein Jahresnutzungsgrad von 0,90 angesetzt.

	Primärenergie	Emissionsfaktor	CO ₂ -Emission
	MWh/a	t CO ₂ /MWh	t/a
Erdgas - Spitzenlast Variante 1a	24.110	0,229	5.521
Erdgas - Spitzenlast Variante 1b	29.950	0,229	6.859
Erdgas - Spitzenlast Variante 2	18.940	0,229	4.337

Die für die Endausbaustufe des Fernwärmenetzes mit einer Wärmeabnahme (ab Werk) von rund 60 GWh/a durch die innovative Abwärmenutzung resultierenden CO₂-Einsparungen sind für die betrachteten Varianten in Tabelle 8 zusammengefasst. Alle drei Varianten weisen ein sehr hohes CO₂-Einsparungspotential auf und sind aus ökologischer Sicht sehr empfehlenswert.

Tabelle 8: CO₂-Einsparung der drei untersuchten Varianten für die Abwärmequellen 1 und 2Erläuterungen: für Endausbaustufe des Fernwärmenetzes ermittelt.

		Variante 1a	Variante 1b	Variante 2
Derzeitige CO ₂ -Emission	t/a	21.362	21.362	21.362
Zukünftige CO ₂ -Emission	t/a	5.521	6.859	4.337
CO ₂ -Einsparung	t/a	-15.841	-14.504	-17.025

Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen für die Abwärmenutzung zur Brennstofftrocknung (Abwärmequelle 3) umfassten gleich wie die Fernwärmenetzvarianten eine Kostenrechnung in Anlehnung an die VDI2067. In Tabelle 9 sind die Investitionskosten zusammengefasst.

Tabelle 9: Investitionskosten Abwärmenutzung Drehrohröfen (Abwärmequelle 3)Erläuterungen: Die Planungskosten wurden mit rund 7% der Investitionskosten für die Anlagen- und Bautechnik angesetzt

Baukosten		
Stützkonstruktion, Fundamente, Durchbrüche usw.	€	100.000
Maschinenbauliche Investitionen		
Ummantelungskonstruktion für Abwärmenutzung	€	570.000
Bandrockener inkl. Fördereinrichtungen Trockengut	€	700.000
Biofilter	€	600.000
E-Installation u. Regelung	€	240.000
Planung		
Bautechnik u. Maschinenbau	€	150.000
Sonstiges		
Unvorhergesehenes	€	110.000
Gesamtinvestitionskosten	€	2.470.000

Die berücksichtigten betriebs- und verbrauchsgebundenen Kosten umfassen Personalkosten (600 h x 28 €/h), Strombezugskosten (0,09 €/kWh x Strombedarf von rund 1,3 GWh_{el}) und sonstige Kosten (1% der Investitionskosten für Versicherung, Buchhaltung, Rechtskosten, etc.) sowie zusätzliche Betriebskosten für das Filtermaterial des Biofilters und für Frisch- und Abwasser im Bereich des Biofilters. Für das Projekt ist eine Investitionsförderung im Rahmen der betrieblichen Umweltförderung mit max. 30% der Investitionskosten zu erwarten (mit einem Jahr Auszahlungsverzögerung nach Projektrealisierung). Die Erlöse ergeben sich durch Einsparung des Brennstoffes Braunkohle (rund 6.400 t/a, welche mit 100 €/t bewertet sind). Die Brennstoffeinsparung ergibt sich einerseits dadurch, dass durch die Kunststofftrocknung mehr Kunststoff im Prozess eingesetzt werden kann und andererseits durch die Erhöhung der Effizienz des Klinkerherstellungsprozesses, welche sich durch die Erhöhung des mittleren Heizwertes und durch die Verringerung der Abgasverluste ergibt. Die Kosten für Kunststoff wurden mit 0 €/t bewertet. Weitere Basisdaten wurden gleich wie bei den Wirtschaftlichkeitsrechnungen für die Abwärmequellen 1 und 2 angesetzt.

In Tabelle 10 sind alle wesentlichen Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 10: Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen für die Abwärmequelle 3

Erläuterungen: Die entsprechend VDI2067 ermittelten Kosten und Erlöse sind monetär bezogen auf das 1. Betriebsjahr dargestellt.

Investitionskosten	€	2.470.000
Förderanteil bezogen auf die Gesamtinvestitionskosten	-	30%
Kapitalgebundene Kosten (ohne Förderung)	€/a	194.146
Instandsetzungskosten	€/a	53.743
Verbrauchsgebundene Kosten	€/a	118.648
Betriebsgebundene Kosten	€/a	56.500
Summe Energiegestehungskosten (ohne Förderung)	€/a	423.038
Erlöse Brennstoffeinsparung	€/a	638.055
Differenz aus Erlös und Kosten (ohne Förderung)	€/a	215.017
Dynamische Amortisationszeit	Jahre	5,5
Kumulierter diskontierter Cash Flow (CDCF) nach 15 Jahren	€	2.736.016

Im Rahmen von Sensitivitätsanalysen wurden die Auswirkungen wichtiger Einflussparameter auf das wirtschaftliche Ergebnis untersucht. Hierfür wurden die Brennstoffkosten für Braunkohle, die Investitionskosten und die Stromkosten um jeweils 10% variiert sowie der Fördersatz mit 0% und 15 % angesetzt. Diese Ergebnisse wurden im Endbericht aufgrund der großen Datenmenge nicht angeführt, sind aber bei der im Kapitel 2.3 beschriebenen Entscheidungsfindungen bezüglich der weiteren Vorgangsweise entsprechend eingeflossen. Mögliche weitere Kosteneinsparungen aufgrund von vermiedenen CO₂-Emissionen sind darüber hinaus noch möglich, wurden aber in dieser Kostenrechnung nicht berücksichtigt.

Die Realisierung der Abwärmenutzung des Drehrohrofens für Trocknungsprozesse von Brennstoffen bringt bei der Fa. Wopfinger eine Effizienzsteigerung im Klinkerherstellungsprozess aufgrund geringerer Abgasvolumenströme sowie der Senkung des spezifischen Energieverbrauches bei der Klinkerherstellung durch Verwendung höherwertigerer, trockener Brennstoffe (höherer mittlerer Heizwert). Ein Teil (ca. 6.400 t/a bzw. 28%) der derzeit eingesetzten Braunkohle kann durch die Verwendung trockener Ersatzbrennstoffe (Kunststofffraktion) reduziert werden.

In Tabelle 11 ist das CO₂ – Einsparungspotential aufgrund der Kunststofftrocknung dargestellt.

Tabelle 11: CO₂-Einsparung durch Abwärmenutzung

Erläuterungen: *) Bezogen auf die Frischsubstanz wird mit und ohne Brennstofftrocknung dieselbe Jahresmenge an Kunststofffraktion eingesetzt. Jedoch hat die trockene Kunststofffraktion einen höheren Heizwert als die nasse Kunststofffraktion

	Primärenergie		Emissionsfaktor	CO ₂ Emission
	t FS/a	GJ/a	kg CO ₂ /GJ	t CO ₂ /a
Brennstoffeinsparung Braunkohle	-6.381	-133.991	97,4	-13.045
Mehrverbrauch Kunststofffraktion *)	0	123.529	80,1	9.898
CO ₂ Einsparung				-3.147

Wesentlich größere CO₂-Einsparungspotentiale ergeben sich, wenn derzeit eingesetzte fossile Primärenergieträger durch CO₂-neutrale Einsatzbrennstoffe energetisch substituiert werden (z.B. durch biogene Abfälle aus Industrie und Gewerbe, Energiepflanzen, Holz bzw. Holzabfälle aus Industrie und Gewerbe, Klärschlämme, Nutzpflanzenabfälle, Nebenprodukte oder Abfälle aus der Papierherstellung,

Fraktionen aus der Mechanisch-biologischen Aufbereitung). Dieses Einsparpotential wurde nicht dargestellt, da derzeit keine konkreten Konzepte bzw. Daten bezüglich dieser angeführten Brennstoffe vorliegen. Für zukünftige Verwendungen dieser Fraktionen wäre aber durch das Abwärmekonzept der Weg bereitet.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Das im Rahmen der einzelnen Arbeitspakete erarbeitete technische Konzept zur Nutzung von Abwärmequelle 1 und Abwärmequelle 2 kann grundsätzlich für alle drei untersuchten Varianten (1a, 1b und 2) als technisch machbar bewertet werden.

Die in Anbetracht des neuartigen Konzeptes im Detail untersuchten Risiken können durch ein entsprechend angepasstes Design von am Markt verfügbaren Komponenten minimiert werden, sodass jede der drei Varianten die Anforderungen, die typischerweise an solche Projekte im Hinblick auf das Betriebsverhalten, den Bedienungs- und Wartungsaufwand sowie die Verfügbarkeit gestellt werden, einhalten kann. Auch ist bei keiner der drei Varianten eine negative Beeinflussung des Klinker-Herstellungsprozesses zu erwarten.

Die wesentlichen bei den Abgaswärmetauschern zu erwartenden Probleme sind Abrasion, Verschmutzung und Brückenbildung sowie Korrosion. Diese technischen Risiken wurden bei der Konzeption und Auslegung der Wärmetauscher beachtet und resultieren in entsprechenden Maßnahmen um diesen Problemen entgegen zu wirken, wie gleichmäßige Anströmung der Wärmetauscherrohre bei niedrigen Anströmgeschwindigkeiten, ausreichend große Wandstärkenreserven, Glattrohrregister mit großen Rohrteilungen und automatischen Wärmetauscherabreinigungen sowie säurebeständiger Ausführung der Wärmetauscher in denen das Abgas unter den Säuretaupunkt abgekühlt wird. Diese aufwendige Ausführung der Wärmetauscher spiegelt sich auch in den jeweiligen Investitionskosten wieder und war letztendlich auch der Grund warum die Variante 1b, bei der das Kaminabgas nicht unter 120 °C abgekühlt und somit keine Korrosionsprobleme zu erwarten sind, ebenfalls im Detail untersucht wurde.

Variante 2 weist durch die erforderlichen zusätzlichen Komponenten (Kondensator, Luftvorwärmer, Absorptionswärmepumpe, Gewebefilter mit Trockensorption) signifikant höhere Investitionskosten als die beiden anderen Varianten auf, bietet aber auch den Vorteil einer deutlich höheren auskoppelbaren Abwärmemenge aus dem Abgas und somit einer Reduktion des fossilen Spitzenlastanteils für die Fernwärmeversorgung der *Bioenergie Bucklige Welt GmbH* im Vergleich zu Variante 1a und 1b und daraus resultierend das größte Potential zur Einsparung von CO₂-Emissionen (Variante 1a: 15.800 tCO₂/a; Variante 1b: 14.500 tCO₂/a; Variante 2: 17.000 tCO₂/a). Wie anhand des für das Fernwärmenetz ermittelten Basisdaten ersichtlich ist, kann dieses höhere Wärmeauskopplungspotential im Fernwärmenetz mit einer maximalen Wärmeabnahme von 60 GWh/a und dem typischen jährlichen Wärmebedarfsverlauf von Fernwärmenetzen in dieser Größenordnung allerdings nicht zur Gänze genutzt werden. Dies wird auch anhand einer einfachen Abschätzung des theoretischen Wärmeauskopplungspotentials und des daraus ableitbaren Anteils an der Fernwärmeversorgung auf Basis der Jahresenergiemengen verdeutlicht.

Wie in Tabelle 12 dargestellt, ergibt sich durch Multiplikation der auskoppelbaren Nennwärmeleistung mit den maximalen Jahresvolllaststunden der Wärmerückgewinnungsanlage das theoretische Nutzungs-

potential für jede der drei untersuchten Varianten. Die Division dieser Werte durch den Jahresenergiebedarf des Fernwärmenetzes zeigt den jeweiligen Anteil an der Fernwärmeversorgung.

Das theoretische Wärmeauskopplungspotential der Variante 2 liegt rund 41% über dem Wärmebedarf des Fernwärmenetzes im Endausbau.

Für Variante 2 wäre somit ein deutlich höherer Wärmebedarf zur besseren Auslastung wünschenswert bzw. erforderlich. Dies ist auch aus der wirtschaftlichen Bewertung klar ersichtlich.

Tabelle 12: Theoretisches Nutzungspotential der Wärmeauskopplung aus Abwärmquelle 1 und Abwärmquelle 2 und Anteil der Wärmeauskopplung an der Fernwärmeversorgung

Erläuterungen: Die maximal möglichen Volllaststunden der Wärmerückgewinnungsanlage pro Jahr wurden auf Basis der jährlichen Betriebsstunden des Klinkerherstellungsprozesses sowie unter Berücksichtigung einer Verfügbarkeit von 90% für die Klinkerproduktion und einer Verfügbarkeit von 98% für die Wärmerückgewinnungsanlage ermittelt. Die Deckung der Wärmeleistungen zwischen Abwärmefall und Fernwärmebedarf bleibt bei dieser Betrachtung unberücksichtigt.

		Variante 1a	Variante 1b	Variante 2
Wärmebereitstellung aus Abgasabwärme	kW	8.140	6.040	12.080
Betriebsstunden Wärmerückgewinnungsanlage	h/a	6.985	6.985	6.985
Theoretisches Nutzungspotential der Wärmeauskopplung	MWh/a	56.861	42.192	84.384
Vorgesehene Fernwärmeauskopplung (Endausbau)	MWh/a	60.000	60.000	60.000
Anteil der Wärmeauskopplung an Fernwärmeversorgung	%	95	70	141

In Abbildung 14 ist der Verlauf des kumulierten, diskontierten Cash Flows für alle 3 Varianten nochmals zusammenfassend dargestellt. Die dynamische Amortisationszeit von Variante 2 beträgt rund 13,2 Jahre und liegt somit in einer typischen Größenordnung für derartige Wärmeversorgungsprojekte. Dennoch ist, bedingt durch die deutlich höheren Investitionskosten bei gleichen Erlösen aus dem Wärmeverkauf, das wirtschaftliche Ergebnis der Variante 2 deutlich schlechter als für Variante 1a und Variante 1b.

Die Einsparung an fossilem Brennstoff zur Spitzenlastabdeckung fällt bei Variante 2 nicht so stark ins Gewicht wie aufgrund der im Vergleich zu Variante 1a und Variante 1b deutlich höheren Wärmeleistung, die aus der Abwärme zur Verfügung steht, erwartet werden würde, da der zusätzliche Beitrag zur Wärmeabdeckung durch die Absorptionswärmepumpe nur bei hoher Lastabnahme im Fernwärmenetz erfolgt und dieser Wärmebedarf speziell in der warmen Jahreszeit nicht ausreichend gegeben ist. Auf Basis der wirtschaftlichen Bewertung stellt die Variante 2 derzeit das größere wirtschaftliche Risiko dar. Sofern ein höherer Wärmebedarf gegeben wäre, würde das entwickelte technische Konzept der Variante 2 eine interessante und viel versprechende Möglichkeit zur Steigerung des Wärmeauskopplungspotentials durch die zusätzliche Nutzung von Kondensationswärme und Abgaswärme auf niedrigem Niveau sowie zur Maximierung des CO₂-Einsparungspotentials sein.

Variante 1b weist mit rund 6,5 Jahren die kürzeste Amortisationszeit auf. Die Amortisationszeit von Variante 1a liegt mit rund 7 Jahren etwas höher als bei Variante 1b, durch den steileren Anstieg der Kurve ist der kumulierte diskontierte Cash Flow nach 15 Jahren allerdings mit rund 3,6 Millionen € am höchsten. Die Variante 1a zeigt somit bezogen auf diesen Betrachtungszeitraum das beste wirtschaftliche Ergebnis.

Alle Varianten zeigen ähnliche Abhängigkeiten bei der Sensitivitätsanalyse. Die Variation des externen Wärmepreises hat die größte Auswirkung auf das wirtschaftliche Ergebnis. So bewirkt die eine Veränderung des Wärmepreises um $\pm 10\%$ bei Variante 1b eine Veränderung der Amortisationszeit von ca. -1,5 bzw. +2,5 Jahre. Die Variation des Erdgaspreises und der Investitionskosten zeigen eine

ähnliche Auswirkung auf das wirtschaftliche Ergebnis. Eine Veränderung des Erdgaspreises um $\pm 10\%$ bei Variante 1b bewirkt eine Veränderung der Amortisationszeit von ca. - 1 bzw. +1 Jahre. Die Variation der Förderquote hat einen geringeren Einfluss auf das wirtschaftliche Ergebnis.

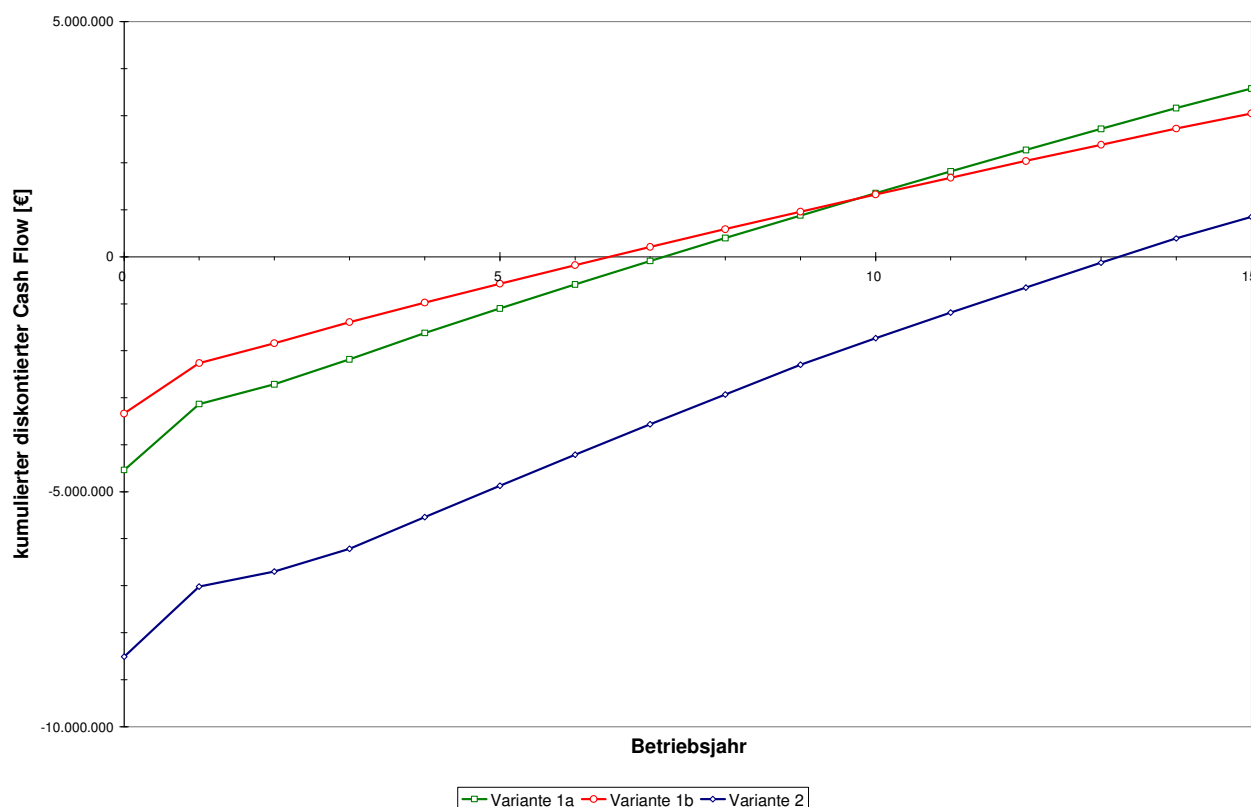


Abbildung 14: Grafische Zusammenfassung der Ergebnisse der dynamischen Amortisationsrechnung für Variante 1a, Variante 1b und Variante 2 der Abwärmequellen 1 und 2

Erläuterungen: die Rahmenbedingungen der Wirtschaftlichkeitsrechnung sind in AP9 erläutert. Der Knick nach dem ersten Betriebsjahr ist der Zahlungseingang der Investitionsförderung.

Die Variante 1b zeigt aufgrund der geringeren Investitionskosten die kürzeste Amortisationszeit und die Variante 1a aufgrund der größeren Abwärmenutzung und der daraus resultierenden Kosteneinsparung beim Erdgasverbrauch den höchsten kumulierten diskontierten Cash Flow nach 15 Jahren. Um die Vorteile beider Varianten kombinieren zu können, ist ein gestufter Ausbau der Abwärmenutzung zu empfehlen, der an die Entwicklung der Wärmeabnahme im Fernwärmenetz angepasst ist. Zuerst könnte nur ein Wärmetauscher für Abwärmequelle 2 zur Abkühlung des Kaminabgases von 150°C auf 120°C und später mit voranschreitendem Fernwärmenetzausbau ein zweiter zusätzlicher Wärmetauscher zur weiteren Abkühlung von 120°C auf 90°C nachgerüstet werden. Hierdurch kann das Investitionsrisiko reduziert und der Erdgasverbrauch zur Spitzenlastabdeckung optimiert und die Einsparung an CO₂-Emissionen maximiert werden.

Der gestufte Ausbau der Nutzung von Abwärmequelle 1 und Abwärmequelle 2 soll in weiterer Folge für die Realisierung eines Demonstrationsprojektes betrachtet werden.

Die Untersuchung der Abwärmequelle 3 (Abstrahlungswärme des Drehrohres) hatte das Ziel einen Außenluftstrom gezielt zu erwärmen, um diesen anschließend in einem Trocknungsprozess für die Trocknung von Sekundärbrennstoffen für den Drehrohrprozess einzusetzen.

Die Ergebnisse aus der durchgeführten CFD Simulation sowie der technischen Konzeption zeigten, dass durch eine geeignete Konstruktion um das Drehrohr ein realistisches Abwärmepotential von 1,3 MW genutzt werden kann und die Luft auf etwa 90 °C (bei einer Umgebungstemperatur von 19°C) erwärmt werden kann. Mit diesem Warmluftstrom könnte dann eine Kunststofffraktion, welche bereits derzeit als Brennstoff eingesetzt wird, von 15% auf 1% Restwassergehalt getrocknet werden. Beim Einsatz dieses getrockneten Brennstoffs kann andererseits fossiler Brennstoff (Braunkohle) teilweise substituiert werden. Diese Abwärmenutzung mit integrierter Trocknung für Ersatzbrennstoffe zur Klinkerherstellung ist mit einem moderaten technischen Risiko verbunden ist und das Restrisiko kann durch die Verwendung von am Markt verfügbaren Komponenten weiter minimiert werden kann. In der Detailplanung ist auf die entsprechenden Brandschutz- und Ex-Schutz-Bestimmungen Rücksicht zu nehmen. Eine negative Beeinflussung des Klinker-Herstellungsprozesses ist bei Ausführung entsprechend der vorgeschlagenen Konzeption grundsätzlich nicht zu erwarten.



Abbildung 15: Ergebnisse der dynamischen Amortisationsrechnung der Abwärmequelle 3

Erläuterungen: die Rahmenbedingungen der Wirtschaftlichkeitsrechnung sind im AP9 erläutert. Der Knick nach dem ersten Betriebsjahr ist der Zahlungseingang der Investitionsförderung.

In Abbildung 15 ist der Verlauf des kumulierten, diskontierten Cash Flows dargestellt. Die Amortisationszeit von knapp über 5 Jahren und der kumulierte diskontierte Cash Flow nach 15 Jahren von rund 2,7 Millionen € zeigen ein wirtschaftliches interessantes Ergebnis. Bezüglich einer Sensitivitätsanalyse zeigen die Variation des Braunkohlepreises sowie der Investitionsförderungen die größte Auswirkung auf das wirtschaftliche Ergebnis. So bewirkt die Veränderung der Investitionsförderungsanteils auf 15% bzw. auf 0% eine Veränderung der Amortisationszeit von ca. +1

bzw. +2 Jahre. Die Veränderung des Braunkohlepreises um $\pm 10\%$ bewirkt eine Veränderung der Amortisationszeit von ca. $-0,7$ bzw. $+1$ Jahr. Die Variation der Investitionskosten um $\pm 10\%$ hat einen geringeren Einfluss auf das wirtschaftliche Ergebnis und die Variation der Stromkosten um $\pm 10\%$ hat ebenfalls geringe wirtschaftliche Auswirkungen. In der gegenständlichen Betrachtung für die Fa. Wopfinger könnte der Primärbrennstoff Braunkohle teilweise (ca. 6.400 t/a) durch die getrocknete Kunststofffraktion als Ersatzbrennstoff substituiert werden. Es ergibt sich durch die Effizienzsteigerung des Klinkerherstellungsprozesses ein relevantes CO₂ Einsparungspotential in der Höhe von rund 3.150 t/a, welches durch den Einsatz und die Trocknung biogener Einsatzbrennstoffe noch wesentlich gesteigert werden könnte (Potential von bis zu ca. 13.000 t/a CO₂ Einsparung).

Aufgrund der nun vorliegenden Erkenntnisse, Basisdaten und Konzepte für die Abwärmenutzung der Abwärmequellen 1 und 2 (zur Nutzung für eine Fernwärmeversorgung) sowie der Abwärmequelle 3 (zur Trocknung von Sekundärbrennstoffen wie z.B. Kunststofffraktionen) kann das Projektteam die nächsten Schritte für die Realisierung von Demonstrationsprojekten einleiten.

Für die Abwärmenutzung zur Fernwärmeversorgung müssen insbesondere mit dem potentiellen Fernwärmebetreiber *Bioenergie Bucklige Welt GmbH* die entsprechenden Rahmenbedingungen im Detail geklärt werden. Für die Abwärmenutzung der Abwärmequelle 3 müssen bei Wopfinger intern die entsprechenden Abklärungen und Potentiale im Detail verifiziert werden, um dann eine Grundsatzentscheidung für eine Projektrealisierung treffen zu können.

Die Projektergebnisse sind grundsätzlich auch für andere Branchen (Feuerfestindustrie, Stahlindustrie, Metallverarbeitende Industrie, etc.) und Zielgruppen relevant und interessant, da sie das Potential einer wesentlichen Effizienzsteigerung gepaart mit signifikanten CO₂- Reduktionspotentialen aufweisen.

5 Ausblick und Empfehlungen

Die im Rahmen des Projektes erarbeiteten technischen Konzepte bilden eine fundierte Basis für die Umsetzung von Projekten entsprechend aller untersuchten Varianten zur Nutzung von Abwärmequelle 1 und Abwärmequelle 2 und zur signifikanten Einsparung von CO₂-Emissionen.

Alle drei Varianten haben unter den gegebenen Rahmenbedingungen interessante wirtschaftliche Ergebnisse gebracht, wobei eine Kombination aus Variante 1b und Variante 1a in Form eines gestuften Ausbaus der Abwärmenutzung als am sinnvollsten erscheint. Im Falle eines höheren zukünftigen Wärmebedarfs im Fernwärmenetz bzw. am Standort (Wärmesenke) könnte auch Variante 2 (Integration der Absorptionswärmepumpe) eine interessante Alternative sein.

Weiterführender Forschungs- und Entwicklungsbedarf ist nach der Anlagenrealisierung für die wissenschaftlich fundierte Begleitung und Evaluierung der ersten Betriebsphase sowie die Optimierung des Anlagenbetriebs und des Wartungs- und Instandhaltungsaufwandes gegeben.

Hierfür wären gezielte Testläufe zur Untersuchung der technischen Leistungsmerkmale bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen und Langzeitanlagenmonitorings zum Aufbau von Betriebs- und Langzeiterfahrung hinsichtlich Verschmutzungsempfindlichkeit und optimierten Einsatz von automatisierten Abreinigungseinrichtungen, Anlagenverfügbarkeit und Standzeit bzw. Lebensdauer einzelner Anlagenkomponenten empfehlenswert.

Im Hinblick auf die Abwärmequelle 3 beim Drehrohrofen stellen die durchgeführten CFD-Simulationen eine besondere Neuheit dar. Die darin entwickelten Ansätze, Modellentwicklungen und Erkenntnisse können sowohl für grundsätzliche Überlegungen des Klinkerprozesses im Drehrohrinneren wie auch für die Abwärmenutzung auf der Außenseite des Drehrohres genutzt werden. Insbesondere ist aber auf der Drehrohrinnenseite aufgrund der sehr komplexen stofflichen, chemisch-physikalischen und wärmetechnischen Vorgänge ein weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf gegeben, um die erstellten Basismodelle weiterzuentwickeln und mit Messdaten zu validieren. Diese Untersuchungen können zu einer weiteren Effizienzsteigerung des Klinkerherstellungsprozesses führen, wobei auch der weitere verstärkte Einsatz von Sekundärbrennstoffen und biogenen Brennstoffen berücksichtigt werden sollte.

Hinsichtlich der Abwärmenutzung auf der Drehrohraußenseite sollte bei Umsetzung eines möglichen Demonstrationsprojektes jedenfalls eine CFD-Nachsimulation im Zuge des Anlagenmonitoring durchgeführt werden, um die entwickelten Modelle und Kalkulationen ebenfalls validieren zu können und gegebenenfalls anzupassen.

6 Anhang

a) Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Geplantes Fernwärmeversorgungsnetz der Fernwärmegesellschaft „Bioenergie Bucklige Welt GmbH“ im Raum Wiener Neustadt	6
Abbildung 2:	Geordnete Jahresdauerlinie Fernwärmenetz Bioenergie Bucklige Welt	7
Abbildung 3:	Vereinfachtes Schema des technischen Konzeptes für die untersuchten Varianten zur Fernwärmeauskopplung	8
Abbildung 4:	3D-CFD Modell des Drehrohrofens	10
Abbildung 5:	Aufstellungszeichnungen für Wärmetauscher (beispielhaft)	13
Abbildung 6:	Leistungszahl der Absorptionswärmepumpe in Abhängigkeit von der Eintrittstemperatur des Heißwassers in den Austreiber	17
Abbildung 7:	Leistungszahl der Absorptionswärmepumpe in Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur für die Fernwärmebereitstellung	18
Abbildung 8:	Vereinfachte Darstellung der Ummantelungskonstruktion	19
Abbildung 9:	Vereinfachte Darstellung der Ummantelungskonstruktion (Haube 1 und Haube 2) entsprechend Variante V05 für die zugänglichen Stellen des Drehrohres	19
Abbildung 10:	Stromlinien der Luft eingefärbt nach der Temperatur [°C] für Variante V03	20
Abbildung 11:	Isoflächen der luftseitigen Oberflächentemperaturen des Drehrohrofens [°C] für Variante ohne Haube sowie Varianten V03 und V05	20
Abbildung 12:	Anlagenschema Abwärmenutzungsanlage Drehrohrofen	20
Abbildung 13:	Jahresdauerlinie und Lastmanagement für Variante 2 im Endausbau des Fernwärmenetzes	20

Abbildung 14:	Grafische Zusammenfassung der Ergebnisse der dynamischen Amortisationsrechnung für Variante 1a, Variante 1b und Variante 2 der Abwärmequellen 1 und 2	20
Abbildung 15:	Ergebnisse der dynamischen Amortisationsrechnung der Abwärmequelle 3	20

b) Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenfassung Abwärmenutzungspotentiale der untersuchten Varianten für die Abwärmequellen 1 und 2	14
Tabelle 2:	Zusammenfassung Abwärmenutzungspotentiale Drehrohrofen und Trocknungsanlage	20
Tabelle 3:	Jahresenergiebilanzen der Varianten für die Abwärmequellen 1 und 2	20
Tabelle 4:	Investitionskosten der untersuchten Varianten für Abwärmequellen 1 und 2	20
Tabelle 5:	Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen für die Varianten der Abwärmequellen 1 und 2	20
Tabelle 6:	Derzeitige CO ₂ -Emissionen durch individuelle Wärmeerzeugung der Fernwärmenetzkunden	20
Tabelle 7:	CO ₂ -Emissionen nach Projektrealisierung durch fossile Spitzenlastabdeckung für die Abwärmequellen 1 und 2	20
Tabelle 8:	CO ₂ -Einsparung der drei untersuchten Varianten für die Abwärmequellen 1 und 2	20
Tabelle 9:	Investitionskosten Abwärmenutzung Drehrohrofen (Abwärmequelle 3)	20
Tabelle 10:	Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen für die Abwärmequelle 3	20
Tabelle 11:	CO ₂ -Einsparung durch Abwärmenutzung	20
Tabelle 12:	Theoretisches Nutzungspotential der Wärmeauskopplung aus Abwärmquelle 1 und Abwärmquelle 2 und Anteil der Wärmeauskopplung an der Fernwärmeversorgung	20

c) Gesamtprozessübersicht

In der nachfolgenden Abbildung A1 wurden schematisch die bestehenden Hauptkomponenten und Abgasströme des Zementwerks Wopfung grafisch dargestellt. Die betrachtete Anlage besteht grundsätzlich aus folgenden Hauptkomponenten:

- Drehrohrofen,
- Zyklonvorwärmer,
- Kalzinator,
- Klinker-, Verdampfungs-, Abgas- und Mischkühler,
- Trockner,

- Rohmühle,
- Schlauch- und E-Filter,
- Silos für Rohmehl, Heißmehl, Klinker und Brennstoff und
- Kaminen.

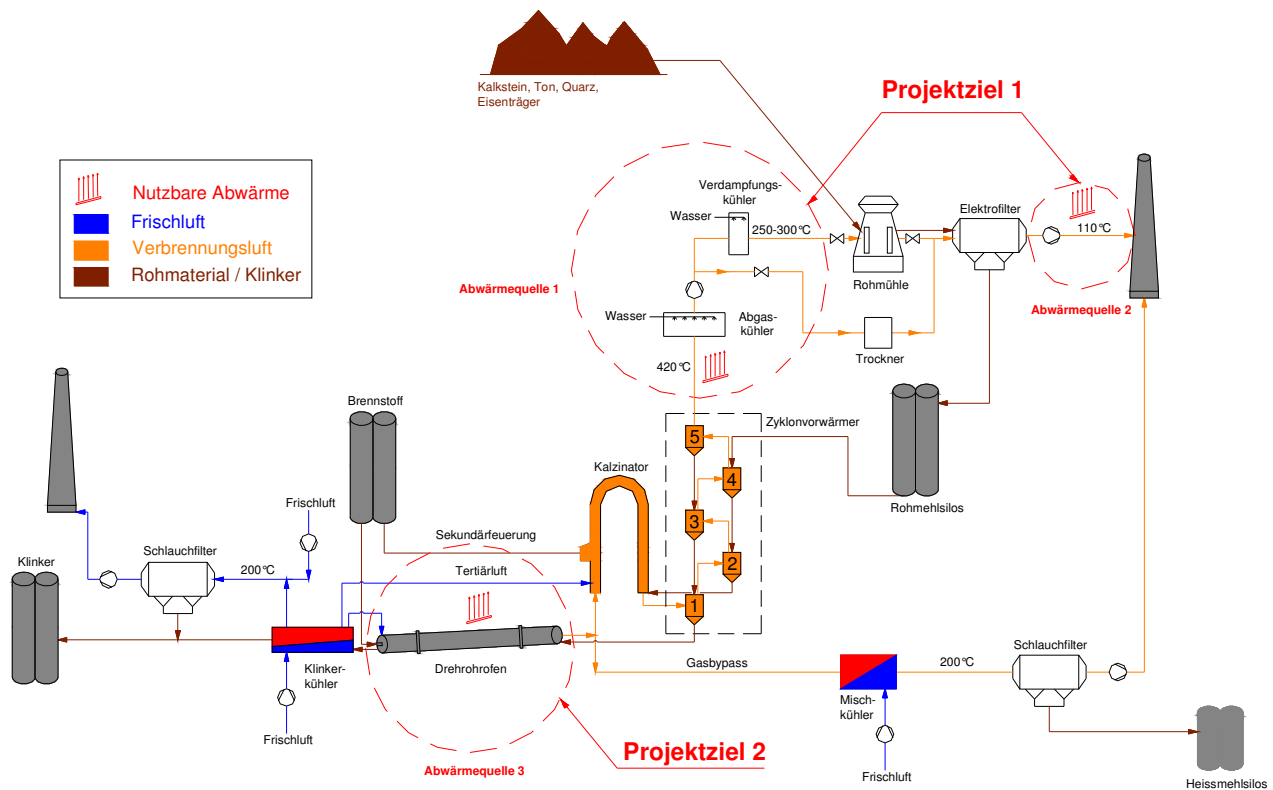


Abbildung A1: Schematische Darstellung der wichtigsten Hauptkomponenten und Abwärmequellen des Zementwerks (Bestand)

Weiters wurden in der Abbildung A1 die im Projekt untersuchten nutzbaren Abwärmequellen sowie die Projektziele graphisch dargestellt. Grundsätzlich wurden folgende Abwärmequellen betrachtet werden:

- Abwärmequelle 1: Abwärme aus dem Abgas nach dem Zyklonvorwärmer
- Abwärmequelle 2: Abwärme aus dem Abgas nach dem E-Filter
- Abwärmequelle 3: Abwärme des Drehrohrofens

IMPRESSUM

Verfasser

Wopfinger Baustoffindustrie GmbH
Wopfing 156, 2754 Waldegg
Tel.: +43 (0)2633/400-0
Fax: +43 (0)2633/400-266
E-Mail: office@wopfinger.baumit.com
Projektleiter: Roland Hochwartner

Projektpartner

BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH
Projektleiter: Alfred Hammerschmid
Sachbearbeiter: Erwin Reisenhofer

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
E-Mail: office@klimafonds.gv.at
Web: www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Weder der Klima- und Energiefonds noch die Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) sind für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH