

Rauchgaskondensation aus Biomassekesseln mit einer multifunktionalen Tau- und Feinstaubabscheidung

H. Walter, M. Haider, D. Huber, et al.

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

59/2011

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Rauchgaskondensation aus Biomassekesseln mit einer multifunktionalen Tau- und Feinstaubabscheidung

Ao. Univ. Prof. DI Dr. Heimo Walter,
Univ. Prof. DI Dr. Markus Haider, DI David Huber
TU-Wien, Institut für Energietechnik und Thermodynamik

Dr. Georg Beckmann
Technisches Büro Dr. Beckmann

Dr. Morteza Fesharaki, Ing. Jürgen Pallisch
Herz Armaturen Ges. m.b.H.,
Geschäftsbereich Feuerungstechnik

Wien, 2011

Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus der Programmlinie ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT. Sie wurde 2003 vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften als mehrjährige Forschungs- und Technologieinitiative gestartet. Mit der Programmlinie ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT soll durch Forschung und Technologieentwicklung die Gesamteffizienz von zukünftigen Energiesystemen deutlich verbessert und eine Basis zur verstärkten Nutzung erneuerbarer Energieträger geschaffen werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements und der großen Kooperationsbereitschaft der beteiligten Forschungseinrichtungen und involvierten Betriebe konnten bereits richtungsweisende und auch international anerkannte Ergebnisse erzielt werden. Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt über den hohen Erwartungen und ist eine gute Grundlage für erfolgreiche Umsetzungsstrategien. Mehrfache Anfragen bezüglich internationaler Kooperationen bestätigen die in ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT verfolgte Strategie.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist, die Projektergebnisse – sei es Grundlagenarbeiten, Konzepte oder Technologieentwicklungen – erfolgreich umzusetzen und zu verbreiten. Dies soll nach Möglichkeit durch konkrete Demonstrationsprojekte unterstützt werden. Deshalb ist es auch ein spezielles Anliegen die aktuellen Ergebnisse der interessierten Fachöffentlichkeit leicht zugänglich zu machen, was durch die Homepage www.ENERGIESYSTEMEderZukunft.at und die Schriftenreihe gewährleistet wird.

Dipl. Ing. Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

1. Einleitung

Aufgabenstellung

Noch heute wird zu einem überwiegenden Teil der weltweite Energiebedarf von den Primärenergieträgern Öl, Kohle und Gas gedeckt. Diese Energieträger haben u.a. folgende grundlegende Nachteile:

- die derzeit bekannten Ressourcen sind, abhängig vom Primärenergieträger, zum Teil gering
- die bei der Verbrennung entstehenden Abgase tragen zur Erhöhung der Treibhausgase (u.a. CO₂) in der Atmosphäre bei
- es ist mit diesen Energieträgern kein auf Nachhaltigkeit beruhendes Energiesystem möglich.

Um ein auf Nachhaltigkeit beruhendes Energiesystem in Zukunft zu ermöglichen, stehen eine Reihe von alternativen Energieformen zu Verfügung an denen zurzeit weltweit intensive Forschungstätigkeiten vorgenommen werden, damit diese in der Zukunft einen wesentlichen Beitrag zur Deckung des Energiebedarfs ermöglichen. Aufgrund der chemischen Verwandtschaft der Biomasse zu den heute etablierten Primärenergieträgern Öl, Kohle und Gas und seiner guten Verfügbarkeit wird diesem Energieträger mit hoher Wahrscheinlichkeit eine besondere Rolle zukommen.

Neueste Prognosen bestätigen den am Markt bereits zu sehenden Trend der Abkehr von den Primärenergieträgern Öl, Kohle und Gas hin zu regenerativen Energieträgern wie z. B. Solarenergie oder Biomasse. Dieser Trend wird durch gesetzliche Vorgaben und Rahmenbedingungen verstärkt, indem die Verwendung von z.B. Solaranlagen, Pelletöfen oder Wärmepumpen zur Wärmebereitstellung, aber auch die Wärmedämmung von Häusern bzw. die Errichtung von Niedrigenergiehäusern gefördert werden. Dies führt dazu, dass ein höherer Bedarf an Kleinkesseln gegeben bzw. in naher Zukunft noch vermehrt zu erwarten ist.

Zielsetzung des Projektes war die Nutzung von Niedertemperaturwärme durch die Rauchgaskondensation in der Biomasseverbrennung, die Erhöhung des Kessel- und Anlagenwirkungsgrades und die gleichzeitige Feinstaubabscheidung in einem Apparat zu bewerkstelligen. Bei der Feinstaubabscheidung sollte auf den Einbau eines separaten (Elektro)-Filters verzichtet werden können. Um die Akzeptanz und die Verbreitung biomassegefeuerter Einrichtungen weiter zu erhöhen (in Hinsicht auf eine CO₂-neutrale Wärmebereitstellung), strebte das Projekt einen geringen Aufwand entsprechend der Installations- und Betriebskosten sowie des Platzbedarfs an. Die Zielgruppe waren kleine und mittlere Biomassefeuerungen. Das Projekt sollte belastbare Aussagen liefern, um in eine nächste Stufe der Pilot- bzw. Demonstrationsanlage mit einem verminderten Risiko einzusteigen. Eine kurz- bis mittelfristige Umsetzung der Projektergebnisse sollte erreicht werden.

Schwerpunkte des Projektes

- Signifikanter Wärmerückgewinn aus den Rauchgasen von Biomassefeuerungen, vor allem bei minderwertigeren feuchten Biomassebrennstoffen; erhöhter Anlagenwirkungsgrad; Kesselgesamtwirkungsgrade um 100 % und darüber - diese Wirkungsgrade sind mit konventionellen Kesseln ohne Rauchgaskondensation nicht erreichbar.
- Selbstreinigend, ohne Bedienungsaufwand
- Keine zusätzlichen Betriebsmittel wie Hochspannung oder Druckluft

- Geringer Druckverlust, keine wesentliche Erhöhung der Gebläseleistung des Saugzuges
- Lautlos, keine zusätzliche Lärmquelle
- Kein Filter-Bypassbetrieb beim Anfahren und bestimmten Betriebszuständen (dieser Bypassbetrieb ist eine bisher wenig beachtete Emissionsquelle, da beim Anfahren durch die noch unvollständige Verbrennung erhöhte Emissionen auftreten und bei einer bedarfsgerechten Energiedeckung auch öfter angefahren wird)
- Kosteneffizient

Einordnung in das Programm

Energiesysteme der Zukunft

a. Sicherung des Wirtschaftsstandortes:

Da das Forschungsprojekt sowohl auf die Energie- als auch auf die Kosteneffizienz abzielte, wird sowohl der Bau und Betrieb von Biomassefeuerungen gegenüber fossil gefeuerten Anlagen als auch die Produktion derartiger Anlagen am österreichischen Wirtschaftsstandort wettbewerbsfähig.

Der Wärmerückgewinn und die Feinstaubabscheidung sind nicht nur Themen von nationalem Interesse. Mit einer Problemlösung auf diesem Technologiefeld hätte man gute Voraussetzungen für den Ausbau einer internationalen Führungsrolle bzw. von Kooperationen. Die Produktion derartiger Anlagen und die stete Weiterentwicklung des Konzepts (z. B. für größere Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen) schaffen qualifizierte Arbeitsplätze. Das Projekt wurde in Kooperation und Partnerschaft zwischen Wissenschaft, K(M)U und Wirtschaft abgearbeitet. Dabei wurden nicht nur Qualifikationen in den angestammten Ingenieur-Wissenschaften: Energietechnik und Luftreinhaltung sowie eine Vernetzung dieser Disziplinen gefordert, sondern auch die Wissensvermehrung auf neuen Teilgebieten (z.B.: Taubildung) sowie die Qualität und Qualifikationen im Energiebereich damit gefördert. Zur Überleitung in eine marktfähige Innovation ist der Eintritt in das Pilot- und Demonstrationsstadium Voraussetzung und das Vorhaben konnte dazu die Grundlagen schaffen.

b. Erhöhung der F&E-Qualität:

Durch die unkonventionelle Lösungsmethode und die konsequente Anwendung moderner Handwerkzeuge wie CFD-Simulationen und Technikumseinrichtungen, wurden die Kompetenz und die Exzellenz im Bereich der Forschung weiter ausgebaut. Ansätze aus der Bionik und der Kreativtechnik halfen, Denkbarrieren zu überwinden; die Interdisziplinarität erforderte das Überspringen enger Fachgrenzen. Der Partner aus der Wirtschaft (Biomasse-Kessel-Hersteller, GU) brachte sich durch sein Fachwissen von Anfang an mit ein.

c. Nachhaltiges Energiesystem:

Die vorgeschlagene einfache Technologie ermöglicht eine robuste, wenig anfällige und effiziente Energieversorgung. Die Substitution von fossilen Brennstoffen, die Einsparung von Biomasse sowie die Produktion derartiger Anlagen im Inland reduziert die Importabhängigkeit. Die vorgeschlagene multifunktionale Rauchgaskondensation mit Feinstaubabscheidung könnte

zu einer Schlüsseltechnologien für Biomassefeuerungen für kleine und mittlere Anlagegrößen werden und berücksichtigt die ökologische Verträglichkeit. Die vorgeschlagene Technologie erweitert das biogene Brennstoffband hin zu problematischen biogenen Brennstoffen mit hohem Wassergehalt und hohem Feinstaubanteil, führt also zu einer Optionenvielfalt bei biogenen Energieträgern.

d. Reduktion der Klimawirkungen:

Durch die Substitution der fossilen Brennstoffe und die Möglichkeit fossil gefeuerte Anlagen zu ersetzen wird der Verbrauch fossiler Primärenergieträger reduziert. Hand in Hand geht damit die Senkung bzw. Vermeidung klimarelevanter Emissionen (CO₂-neutraler Brennstoff; Feinstäube sind auch klimarelevant, die Wasserdampfemission und Abwärmeemission werden geringfügig gesenkt). Die kosteneffiziente, praktikable und bedienerfreundliche Lösung der angesprochenen Probleme führt zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger, mögliche zukünftige Behinderungen dieses Trends werden durch die Lösung der Feinstaubproblematik aus dem Weg geräumt.

Verwendete Methoden

In einem ersten Schritt des Projekts erfolgte eine umfassende Recherche bezüglich des Standes der Technik, des Wissens und der Umfeldbedingungen (legistische Vorgaben, Markt, Mitbewerber, Patentsituation); diese Recherche wurde zumindest halbjährlich auf den jeweils aktuellen Stand gebracht. Als Methodik für diesen Projektschritt wurden Recherchen im Internet, in Fachzeitschriften und Tagungsbänden, Fachbüchern, Datenbanken und Firmenbroschüren sowie der Besuch von Fachmessen bzw. Konferenzen gewählt.

Parallel zu den Recherchetätigkeiten wurden bereits im Anfangsstadium des Projekts mögliche Schaltungsvarianten für die Einbindung des multifunktionalen Apparats in den Heizkreislauf von den Projektpartnern diskutiert und entworfen. Diese Heizkreisläufe wurden danach mittels einer Prozesssimulation abgebildet, um aussagekräftige Daten für die zu erwartenden Wärmeströme zwischen den einzelnen am Wärmeaustausch beteiligten Medien (Wasser und Abgas) usw. zu erhalten. Auf Grundlage dieser Daten wurde eine energetische Optimierung des Systems durchgeführt, wobei die Wärmeintegration zwischen den einzelnen Prozessströmen ein wichtiges Kriterium darstellte. Am Ende dieses Prozesses erfolgte eine Evaluierung für die Umsetzbarkeit der ermittelten Lösungen unter ökonomischen Gesichtspunkten.

Mit Hilfe von Kreativtechniken wurde eine Variantenvielfalt für den zu entwickelnden Apparat hergestellt, in der möglichst unterschiedliche Typen (z. B.: zylindrisch oder quadratisch, für Klein- oder Großfeuerungen geeignet) des innovativen Apparats vertreten sein sollten. Eine anschließende technisch/wissenschaftliche Untersuchung dieses Variantenbündels unter Zuhilfenahme von CFD-Simulationen und der Berücksichtigung von Fertigungstechniken sowie wirtschaftlichen Gesichtspunkten engte dieses Bündel im Zuge von Expertenrunden und Fortschrittsgesprächen, sowie weiteren ingenieurmäßigen Basisuntersuchungen, auf eine für die Versuchsanlage geeignete Lösungsvariante ein.

Die weiteren Schritte entsprachen der guten Praxis der Projektabwicklung bzw. des Anlagenbaus: Basic Engineering und Fertigung der Versuchsanlage, Montage und Versuchsaufbau mit einem vorgeschalteten, konventionellen Biomassekessel aus einer Großserie, Erprobung und Monitoring sowie Auswertung der Messdaten und Re-Design.

Um aussagekräftige Daten zum Abscheideverhalten des multifunktionalen Apparats zu erhalten, wurden Experimente bei unterschiedlichen Parametern im Technikumsmaßstab durchgeführt, bei denen der im Abgas enthaltene Feinstaub gemessen wurde. Die einzelnen Messungen der Feinstaubkonzentration fanden zeitgleich am Ein- und Austritt des innovativen Apparats statt. Die bei der Feinstaubmessung zur Anwendung kommende Methode kann den Referenzen [17] und [18] entnommen werden.

Zur Bestimmung der zusätzlichen Wärmeleistung des entwickelten Apparats wurden die Massenströme bzw. Temperaturen des Wassers und des Abgases am Ein- und Austritt aus dem Apparat gemessen. Die Genauigkeit der einzelnen Messpunkte wurde unter Zuhilfenahme der DIN 1319 [15] sowie der Referenz [16] ermittelt.

Aufbau der Arbeit

Der Beginn des Forschungsprojektes war gleichzeitig der Beginn für eine umfassende Recherche bezüglich des Standes des Wissens, der Technik und der Umfeldbedingungen (legistische Vorgaben, Markt, Mitbewerber, Patentsituation) durch das Technische Büro Dr. Beckmann mit Unterstützung des IET.

Gleichzeitig mit der Literaturrecherche hat die Gruppe am IET unter Beteiligung des technischen Büros Dr. Beckmann damit begonnen Möglichkeiten der Niedertemperaturwärmenutzung zu erkennen und entsprechende Schaltungsvarianten für die Einbindung des multifunktionalen Apparats in den Heizkreislauf zu entwerfen, wobei während dieser Phase des Projektes nur die technische Realisierbarkeit der Strömungsführung gewährleistet sein musste. Ökonomische Aspekte sowie räumliche Gegebenheiten und sicherheitstechnische Beschränkungen sollten in diesem frühen Stadium der Identifizierung von Niedertemperaturwärmenutzungsmöglichkeiten noch keine Rolle spielen.

Am IET wurde dazu eine Software für stationäre Kreislaufberechnungen zur Niedertemperaturnutzung entwickelt, welches in eine Excel-Datei implementiert werden konnte. Nach Abschluss dieser Softwareentwicklung inklusive einer Überprüfung der Ergebnisse sowie der Festlegung der Randbedingung durch die beteiligten Projektpartner hat die TU Wien damit begonnen die Kreislaufberechnungen zur Niedertemperaturnutzung für die einzelnen Schaltungsvarianten durchzuführen. Im Zuge der Ergebnisdiskussion und unter Abwägung der wirtschaftlichen Standpunkte des Kesselherstellers sowie der sicherheitstechnischen Beschränkungen wurde eine der Varianten für den zeitlich später stattfindenden Technikumsversuch ausgewählt.

Um für die Entwicklung des multifunktionellen Apparats notwendige Daten zu erhalten wurden nach Abschluss der stationären Kreislaufberechnungen experimentelle Vorversuche durchgeführt, welche dazu dienten ein besseres physikalisches Verständnis sowie experimentelle Daten zu erhalten um eine verbesserte Auslegung des zu entwickelnden multifunktionalen Apparates zu ermöglichen. Zu diesem Zwecke wurden entsprechende Versuchstände, unter verschiedener und wechselnder Beteiligung der einzelnen Projektpartnern, ausgelegt, entworfen, gefertigt, errichtet und betrieben. Die bei den Vorversuchen gewonnenen Daten wurden von der Gruppe am IET unter Beteiligung des technischen Büros Dr. Beckmann ausgewertet und analysiert.

Danach wurde damit begonnen den multifunktionellen Apparat zu entwickeln. Zuerst wurde mit Hilfe von Kreativtechniken eine Variantenvielfalt des zu entwickelnden Apparats erzeugt. In

Expertenrunden und Fortschrittsgesprächen wurde diese Variantenvielfalt unter Berücksichtigung der experimentell erhaltenen Daten und der begleitend (zeitlich versetzt) zu der Entwicklung des Apparats durchgeführten CFD-Simulationen eingeengt. Viele dieser erzeugten Varianten mussten auch ausgeschieden werden, da diese technisch nicht oder nur mit einem sehr hohen fertigungstechnischen Aufwand umsetzbar waren. Nachdem die Variantenvielfalt auf eine geringe Anzahl eingeschränkt war, wurden diese noch aus einer betriebstechnischen und ökonomischen Sicht geprüft. Am Ende dieses gesamten Vorgangs lag ein Vorschlag für die Ausführung des multifunktionalen Apparats vor, welche für den Technikumsversuch realisiert werden sollte.

Die Gruppe am IET und das technische Büro Dr. Beckmann führten unter Einbindung der Firma Herz, nach der Festlegung der geometrischen Ausführung des Apparats, das Basic Engineering desselben durch. Das Detailengineering und die Fertigung des multifunktionalen Abscheiders zur Erprobung im Technikumsbetrieb wurden von der Firma Herz übernommen. Parallel dazu wurden im Labor des IET die notwendigen Adaptionen für den Aufbau und Betrieb des Technikumsversuchsstands vorgenommen.

Nach Anlieferung des Apparats im Labor des IET wurde dieser in den Versuchsstand integriert und die experimentellen Untersuchungen vorgenommen. Nach Vorliegen der Messdaten wurden diese ausgewertet, interpretiert und Vorschläge für etwaige Verbesserungen vorgenommen. Die gewonnenen und Know-how-relevanten Ergebnisse und Erkenntnisse wurden dokumentiert.

2. Inhaltliche Darstellung

Arbeitspaket: Recherchen zum Stand der Technik und zum Umfeld

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde entsprechend dem Förderungsantrag mit dem Arbeitspaket zur Analyse (Recherche) zum Stand der Technik und zum Umfeld der Rauchgaskondensation und Feinstaubabscheidung, d.h. der Erhebung des Ist-Zustandes, begonnen. Dieses Arbeitspaket lieferte belastbare Aussagen darüber, ob die im Forschungsprojekt erarbeiteten Lösungen durch andere Veröffentlichungen, Patente oder Marktaktivitäten vorweggenommen oder behindert werden. Diese Recherchen wurden mindestens im Halbjahresabstand auf den letzten Stand gebracht, wobei an der Methodik selbst festgehalten wurde. Diese Aktualisierung betrifft insbesondere die Patentsituation (Wurde etwa aus einer Offenlegungsschrift ein Patent oder gibt es eine neue Anmeldung?) aber auch dem Beobachten der gesetzlichen Rahmenbedingungen. Die herkömmlichen Recherchemethoden, wie die Durchsicht von Fachbüchern, wie z.B. für die Reinigung von Abgasen [1] oder für Biomassen [2], [3], [4] und [5], Fachzeitschriften und Firmenbrochüren sowie der Besuch von Tagungen und Messen wurden um die Möglichkeiten des Recherchierens im Internet und um die Durchsicht von E-Journalen ergänzt und dienten ebenfalls der Feststellung des Ist-Zustandes.

Abgerundet wurde dieses Arbeitspaket durch eine Recherche bezüglich der gesetzlichen Rahmenbedingungen zur Feinstaubabscheidung bei kleinen und mittleren biomassegefeuerten Kesseln. Beim Festlegen der Zielwerte bezüglich der Emissionen in Luft und Wasser wurde auch der Markterfolg dieser Technologie Rechnung getragen. D.h., dass im gegenständlichen Forschungsprojekt nicht nur den bestehenden Regulierungen, sondern auch zukünftig zu erwartende Grenzwerte berücksichtigt wurden.

Arbeitspaket: Variantenentwürfe und -auswahl

Um eine möglichst breite Palette an Varianten des zu entwickelnden Apparates zu erhalten wurde versucht durch die Zerlegung der komplexen Zusammenhänge bei der gleichzeitigen Abgaskondensation und Feinstaubabscheidung in abgrenzbare Teile die Gestaltvariation der Einzelkomponenten zu erhöhen. Dazu wurden Hilfen beim Finden von Lösungsmöglichkeiten für die Gesamtproblematik in der Form von Kreativtechniken, wie z.B. der in Tabelle 1 dargestellten morphologischen Matrix oder der Triz-Methode genommen um Anregungen für die Lösungsvorschläge eines physikalisch möglichen Apparats zu finden.

Teilprobleme für das Rohgas:	Ausprägung #1	Auspräg. #2	Auspräg. #3	Auspräg. #4	Auspräg. #5
A: Kühlung	Verdunstung, Spray	Verdunstung, Oberfläche	Verdunstung, Gasblasen	Konvektiv	Strahlung
B: Führung	horizontal	senkrecht, aufsteigen	senkrecht, fallend	ansteigend	abfallend
C: Verlangsamung	kontinuierlicher Diffusor	Stoß-diffusor	keine besondere Einrichtung		
D: Vergleichmäßigung	Gitter	Lochblech	Rohrreihe, gekühlt	Thermoblech, gekühlt	
E: Tauzone	gekühlte Wände, aber leer	mit Rohren erfüllt	mit Platten erfüllt		
F: Abscheidezone (Mechanismus)	Schwerkraft-abscheider	Lamellen-abscheider (Schwerkraft)	Zentrifugal-abscheider; z.B. „Zyklon“	Trägheits-abscheider; „Impingement“	<i>Jeweils: a) gekühlt bzw. b) ungekühlt</i>
G: Wieder-aufheizung	durch Mischung	durch Wärmeübertragung	keine besondere Einrichtung		

Tabelle 1: morphologische Matrix

Dabei wurden folgende Punkte besonders berücksichtigt:

- Signifikanter Wärmerückgewinn aus den Rauchgasen der Biomassefeuerung, vor allem bei minderwertigem feuchtem Biomassebrennstoff; erhöhter Anlagenwirkungsgrad.
- Selbstreinigend, ohne Bedienungsaufwand.
- Keine zusätzlichen Betriebsmittel wie Hochspannung oder Druckluft.
- Geringer Druckverlust, keine wesentliche Erhöhung der Gebläseleistung des Saugzuges.
- Lautlos, keine zusätzliche Lärmquelle.
- Kein Filter-Bypassbetrieb beim Anfahren und bestimmten Betriebszuständen.
- Kosteneffizient.

Neben der Anwendung der Kreativtechniken wurden auch ingenieurmäßige Basisuntersuchungen wie Kreislauf- und erste Auslegungsrechnungen sowie auch Strömungssimulationen an aussichtsreichen Apparatevarianten durchgeführt. Des Weiteren flossen auch die Ergebnisse von experimentellen Voruntersuchungen in die Variantenentwürfe mit ein. Weiters wurden die Fragen nach den zu verwendenden Werkstoffen, der Verwendung von am Markt erhältlichen Halbzeugen sowie einer kostengünstigen Fertigungsmethode gegeneinander abgewogen.

Arbeitspaket: Simulationen: Niedertemperaturnutzung, Wärmeübergang, Feinstaubabscheidung, Optimierung

Der erste Teil dieses Arbeitspaketes beschäftigt sich mit der Nutzung der Niedertemperaturwärme. Dazu wurden für unterschiedliche Schaltungsvarianten des Heizkreislaufes stationäre Kreislaufberechnungen zur Identifizierung einer optimalen Nutzung der Niedertemperaturwärme durchgeführt. Bei der Auswahl der untersuchten Schaltungsvarianten wurde zunächst keine ökonomische Einschränkung vorgegeben. Die einzige auferlegte Beschränkung für die untersuchten Schaltungsvarianten war, dass diese technisch realisierbar sein mussten.

Da die Entwicklung des Tau- und Feinstaubabscheiders für Biomasse erfolgen soll, wurden die Berechnungen für zwei biogene Brennstoffe - Holzpellets und Hackschnitzel – sowie, zu Vergleichszwecken, für Methan (CH_4) durchgeführt. Die Brennstoffanalyse für Pellets ist dem Prüfbericht [6], die Brennstoffanalyse für Hackschnitzel dem Prüfbericht [7] entnommen. Die Zusammensetzung des reinen Methans wurde aus dem Periodensystem der Elemente nach [8] entnommen. Für sämtliche getätigten Berechnungen wurde dieselbe Feuerungsleistung zugrunde gelegt. Diese entspricht dem Mittelwert der Feuerungsleistung des für die Technikumsversuche zur Verfügung stehenden Pelletkessels entsprechend [6]. Die Referenzwerte für die Verbrennungsluft wurden mit einem Luftdruck von $p_U = 101300 \text{ Pa}$, einer Lufttemperatur $\vartheta_U = 20^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchtigkeit von $\varphi_U = 0.4$ festgelegt.

Für die stationären Kreislaufberechnungen wurde ein Programm entwickelt, welches in eine Excel-Datei implementiert werden konnte, mit deren Hilfe die notwendigen Berechnungen durchgeführt wurden. Die dazu notwendige Verbrennungsrechnung für die Brennstoffe erfolgte nach [9]; die Stoffwerte für Wasser und Rauchgas wurden für den benötigten Berechnungsbereich entsprechend der Literatur [10] bzw. [11] in das Programm implementiert.

Tabelle 2 zeigt Referenzwerte, welche für alle Kreislaufberechnungen als Randbedingungen festgelegt wurden. Wie der Tabelle entnommen werden kann, liegt der Taupunkt für reinen Wasserdampf (ohne Berücksichtigung des Säuretaupunktes eines eventuell vorliegenden $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{SO}_4$ -Gemisch im Abgas, welcher mit ca. 80°C deutlich höher liegt und zu günstigeren Ergebnissen der Berechnungen führen würde. Aufgrund der wesentlich komplexeren physikalischen Beschreibung des Kondensationsvorganges eines $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{SO}_4$ -Gemisch und der geringen Menge an Schwefel im Abgas - laut ÖNORM M7135 muss der Schwefelgehalt in Pellets $< 0.04 \text{ Gew}\%$ sein - wurde für die durchgeführten Kreislaufberechnungen von einer Berücksichtigung Abstand genommen. Diese Annahme wurde experimentell durch einen Vorversuch bestätigt.) bei einer Biomassefeuerung deutlich tiefer im Vergleich zur Gasfeuerung. Ein Biomassekessel, welcher mit dem Brennstoff Pellets befeuert wird, weist unter den oben angeführten Randbedingungen und bei gleicher Feuerungsleistung mit ca. 46°C den niedrigsten Taupunkt aller untersuchten Brennstoffe auf.

	Methan (CH_4)	Pellets	Hackschnitzel
Unterer Heizwert H_u [kJ/kg]	50000	17300	13700
Brennstoffmassenstrom [kg/h]	1.56	4.49	5.68
Luftzahl [-]	1.05	1.6	1.6
Rauchgaszusammensetzung			
Kohlendioxid [kg/kg]	0.1433	0.17076	0.16698

Stickstoff [kg/kg]	0.71193	0.67731	0.66229
Wasser [kg/kg]	0.1224	0.06233	0.08311
Sauerstoff [kg/kg]	0.01045	0.07826	0.07652
Argon [kg/kg]	0.01192	0.01134	0.01109
Taupunkt Wasser [°C]	59	46	52
Abgasmassenstrom [kg/h]	0.0083	0.01273	0.01332

Tabelle 2: Referenzwerte für die stationären Kreislaufberechnungen

Für die Nutzung der Niedertemperaturwärme wurden folgende Prozessschaltungen analysiert:

- a) Niedrige Rücklauftemperatur ϑ_{RL} (Niedertemperaturheizung); untersuchte Varianten: Variante 1: $\vartheta_{RL} = 30 \text{ °C}$; Variante 2: $\vartheta_{RL} = 40 \text{ °C}$
- b) Direkte Verbrennungsluftvorwärmung ($\vartheta_{RL} = 60 \text{ °C} = \text{konst.}$); untersuchte Varianten: Variante 3: $\vartheta_U = 5 \text{ °C}$; Variante 4: $\vartheta_U = 15 \text{ °C}$
- c) Verbrennungsluftvorwärmung über eine Rücklaufbypassschaltung; untersuchte Varianten: Variante 5: $\vartheta_U = 5 \text{ °C}$, $\vartheta_{RL} = 60 \text{ °C}$; Variante 6: $\vartheta_{RL} = 60 \text{ °C}$, $\vartheta_U = 15 \text{ °C}$ bzw. Variante 7: $\vartheta_U = 5 \text{ °C}$, $\vartheta_{RL} = 40 \text{ °C}$; Variante 8: $\vartheta_{RL} = 40 \text{ °C}$, $\vartheta_U = 15 \text{ °C}$
- d) Verbrennungsluftvorwärmung und Luftheizung über eine Rücklaufbypassschaltung (siehe Abb. 5); untersuchte Varianten: Variante 9: $\vartheta_{RL} = 60 \text{ °C}$
- e) Kombinierte Schaltungsarten des Taubabscheiders. Hierbei handelt es sich um eine Kombination aus mehreren, in den vorigen Punkten betrachteten Varianten. Nahe liegend ist eine gleichzeitige Anwendung der niedrigen Rücklauftemperatur und eines Luftvorwärmers. Hierbei ergaben sich folgende untersuchte Verschaltungsvarianten (in Richtung abnehmender Abgastemperatur) mit einer konstant angenommenen Rücklauftemperatur von $\vartheta_{RL} = 30 \text{ °C}$: luftgekühlter Tauabscheider - wassergekühlter Tauabscheider; untersuchte Varianten: Variante 10: $\vartheta_U = 5 \text{ °C}$; Variante 11: $\vartheta_U = 15 \text{ °C}$ bzw. wassergekühlter Tauabscheider - luftgekühlter Tauabscheider; untersuchte Varianten: Variante 12: $\vartheta_U = 5 \text{ °C}$; Variante 13: $\vartheta_U = 15 \text{ °C}$.

Allen analysierten Schaltungsvarianten gemein war, dass als Randbedingung für das Abgas am Eintritt in den zu entwickelnden Apparat vorausgesetzt wurde, dass dieses als gesättigte feuchte Luft (rel. Luftfeuchtigkeit $\varphi = 1$, Nebelgrenze), entsprechend der in Tabelle 2 angegebenen Zusammensetzung, welche das Ergebnis einer Verbrennungsrechnung ist, betrachtet werden kann. Für die Grädigkeiten in den Wärmetauscherflächen wurden folgende Werte angenommen: Tauabscheider Luftgekühlt $\Delta T = 12 \text{ K}$, Tauabscheider Wassergekühlt $\Delta T = 6 \text{ K}$ und Rücklaufkühler Luftvorwärmer $\Delta T = 6 \text{ K}$.

Im zweiten Teil des Arbeitspakets erfolgte die strömungstechnische Untersuchung ausgewählter Varianten des zu entwickelnden Apparates. Dazu wurde von dem strömungstechnisch zu untersuchenden Teil des Apparats ein Computermodell entwickelt. Mit Hilfe des Softwarepaketes GAMBIT (vertrieben von ANSYS) wurde die Geometrie des Apparates in 3D abgebildet und ein Berechnungsnetz erstellt. Bei der Erstellung des Berechnungsnetzes konnte die Symmetrie um die vertikale Hauptachse des Apparates ausgenutzt werden. Dadurch musste nur die Hälfte des Apparats in GAMBIT abgebildet werden, was zu einer wesentlichen Einsparung an Rechenknoten und Berechnungszeit geführt hat. Um ein korrektes Simulationsergebnis für die Strömungsvorgänge im

Apparat zu erhalten, musste für die Berechnung in der Symmetrieebene eine Symmetrierandbedingung gesetzt werden. Bei dieser Art von Randbedingung wird angenommen, dass sich die Strömung links und rechts der Symmetrieebene gleich verhält. Nachdem das Rechenetz mit Hilfe des Netzgenerators GAMBIT erzeugt wurde, konnte dieses in die CFD-Software FLUENT (ebenfalls vertrieben von ANSYS) eingelesen und die für die Berechnung notwendigen Randbedingungen (Massenstrom und Temperatur des Fluids am Eintritt und Druck am Austritt des Fluids aus dem Rechenggebiet (= Austritt aus dem zu entwickelnden Apparat); konstante Temperatur der das Strömungsgebiet umschließenden Wände) gesetzt werden. Im Anschluss daran wurden die stationären numerischen Strömungssimulationen inklusive der Berechnung der Partikelbahnen durchgeführt, wobei für die Berechnung der Strömung die Impuls-, Massen- und Energiebilanz, sowie die Bilanzgleichungen des realisable $k-\varepsilon$ -Turbulenzmodells mit enhanced wall treatment gelöst wurden. Der Wärmeübergang zwischen dem im Apparat strömenden Abgas und der gekühlten Apparatewand wurde ebenfalls in den Simulationsrechnungen berücksichtigt. Nach erfolgter numerischer Berechnung wurden diese analysiert und bewertet.

Arbeitspaket: Basic Engineering des innovativen Apparates

Das Basic Engineering des Apparates wurde mit wärmetechnischen Auslegungsrechnungen in Abstimmung zu den Spezifikationen des Biomassekessels (Daten des Kessels wie Haupt- und Anschlussmaße) begonnen um die Hauptabmessungen des Apparates zu erhalten. Dazu wurden zuerst die Dimensionen der Halbzeuge festgelegt. Die wärmetechnische Berechnung erfolgte unter Zuhilfenahme der in den experimentellen Voruntersuchungen, welche unten beschrieben sind, erhaltenen Ergebnissen zum erzwungenen, konvektiven Wärmeübergang mit Kondensation. Nach dem Vorliegen der Hauptabmessungen der einzelnen Wärmetauscher konnte die Erstellung der ersten CAD-Zusammenstellungszeichnung des Apparates erfolgen. Mit Hilfe dieser Zeichnung wurde der Apparat wärmetechnisch nachgerechnet (Überprüfung der übertragenen Wärmen, des Druckabfalls, usw.) und es konnten noch notwendige Änderungen bzw. Optimierungen am Apparat vorgenommen werden. Abgeschlossen wurde dieses Arbeitspaket mit der Erstellung von CAD-Konstruktionszeichnungen für die Fertigung.

Arbeitspaket: Fertigung des innovativen Apparates

Mit den vorliegenden Konstruktionszeichnungen konnte die Werkstättenfertigung des Apparates für den Technikumsbetrieb durchgeführt werden. Nach dem Abschluss der Werkstattfertigung wurde der Apparat zur Abgaskondensation und Feinstaubabscheidung an das Versuchslabor geliefert.

Arbeitspaket: Versuchsaufbau, Technikumsversuche und Monitoring

Von den Projektpartnern wurde während der laufenden Projektzeit beschlossen, dass zu den Fragestellungen einer eventuellen Berücksichtigung des Säuretaupunktes bei der Kondensation eines $H_2O-H_2SO_4$ -Gemisch und des erzwungenen konvektiven Wärmeübergangs bei Kondensation bedarf für zusätzliche experimentelle Untersuchungen, den so genannten Vorversuchen, besteht. Diese Untersuchungen waren von großer Bedeutung für das Forschungsprojekt, da von der Beantwortung dieser Fragen die Auslegung des zu entwickelnden Apparats direkt beeinflusst wurden.

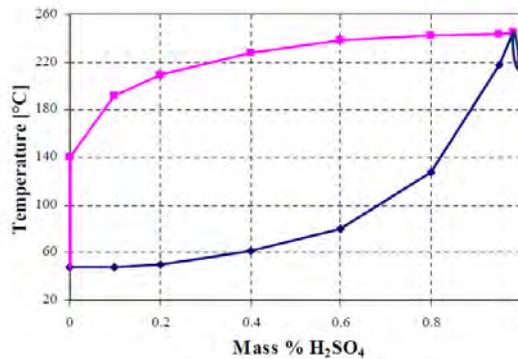


Bild 1: Phasengleichgewichtsdiagramm für ein H₂O-H₂SO₄-Gemisch bei $p_{\text{H}_2\text{SO}_4}+p_{\text{H}_2\text{O}} = 0.17 \text{ bar}$ [12]

Wie der Abbildung 1 zu entnehmen ist, steigt der Säuretaupunkt des H₂O-H₂SO₄-Gemisches bereits bei sehr geringen Massenprozent an H₂SO₄ im Gemisch sehr stark an. Setzt die Kondensation des Abgases bereits beim Säuretaupunkt dieses Gemischs ein und liefert diese Kondensation einen wesentlichen Beitrag zum übertragenen Wärmestrom, so kann der Wärmetauscher mit deutlich kleineren Dimensionen ausgelegt werden, was sowohl den Druckverlust des Abgasmassenstroms verringert, aber auch das Gewicht und das verbaute Volumen stark beeinflusst.

Die Vorversuche zum konvektiven Wärmeübergang einer erzwungenen Gasströmung bei gleichzeitiger Kondensation des Abgases dienten ebenfalls der experimentellen Absicherung der Auslegung der Wärmetauscher. Es ist in der Literatur sehr gut beschrieben, dass sich der gaseitige Wärmeübergangskoeffizient bei der Kondensation erhöht. Da dieser gaseitige Wärmeübergangskoeffizient bei einem Gas-Wasser-Wärmetauscher die bestimmende Größe für den Wärmeaustausch darstellt, ist seine korrekte Berechnung von großer Bedeutung und hat einen direkten Einfluss auf die Dimensionen des Wärmetauschers.

Die Methodik der Versuchsstandauslegung entsprechend der Spezifikation des Biomassekessels sowie der Aufbau der einzelnen Versuchsstände soll hier nicht näher beschrieben werden, da diese der guten Praxis des Anlagenbaus, wie z.B. Auslegungsrechnungen, Erstellung von Fertigungszeichnungen, die Bereitstellung der benötigten Energieversorgung für den Pelletofen und der Messapparate durch die Verlegung der notwendigen elektrischen Leitungen usw., entsprechen.

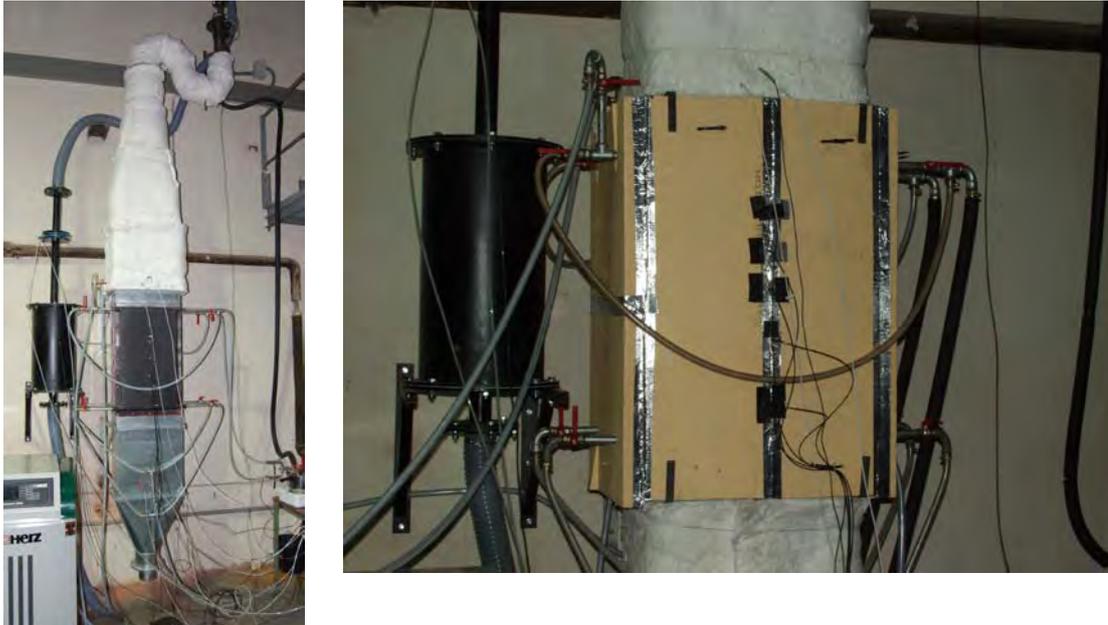


Bild 2: Bilder des Versuchsstands zur Bestimmung des Einsetzens der Kondensation vor und nach der vollständigen Isolierung gegen die Umgebung

In Abbildung 2 ist der Versuchsstand zur Bestimmung des Einsetzens der Kondensation vor und nach der vollkommenen Isolierung gegenüber der Umgebung dargestellt. Zur Bestimmung der Massen- und Energiebilanzen wurden die gas- und wasserseitigen Temperaturen vor und nach dem Plattenwärmetauscher mittels Thermoelementen vom Typ J (FeCu-Ni) und PT100; der wasserseitige Massenstrom mittels Flügelradzähler sowie der gassetige Massenstrom mittels Blendenmessung entsprechend der VDI/VDE 2041 Richtlinie [13] bestimmt. Für die Blendenmessung kamen Drucksensoren (Honeywell micro-switch Differenzdrucksensor vom Typ 163PC01D75) und für die Messung des Umgebungsdrucks ein Barometer (Digitalbarometer vom Typ GTD 1100) zum Einsatz. Neben den gas- und wasserseitigen Temperaturen wurden auch die Oberflächentemperaturen des Plattenwärmetauschers über die Höhe mittels Thermoelementen vom Typ J gemessen. Die Feuchtigkeit des Abgases bzw. der feuchten Luft wurden vor und nach dem Plattenwärmetauscher mit Luftfeuchtigkeitssensoren der Firma Vaisala mit der Bezeichnung HMM211 ermittelt. Dieser Sensor stellt eine Temperatur/Feuchtefühlerkombination dar, welche in einem Temperaturbereich von -70°C bis 180°C und in einer korrosiven Umgebung eingesetzt werden können.

Die Datenerfassung erfolgte computerunterstützt über eine USB-Schnittstelle. Die digitalen Eingangssignale in den PC wurden von einem NI-cDAQ-9172 System mit unterschiedlichen Erfassungsmodulen der Firma National Instruments bereitgestellt. Die Datenerfassungssoftware am Computer wurde am IET mit dem Softwaretool LabView von National Instruments entwickelt.

Die Messungen wurden sowohl an feuchter Luft sowie am Abgas des Pelletofens durchgeführt. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse, welche mit der feuchten Luft bzw. dem Abgas erzielt wurden, zu gewährleisten, wurden folgende Randbedingungen für die Versuche mittels feuchter Luft definiert:

- Eintrittstemperatur in den Versuchsstand: ca. 110°C (= Abgastemperatur am Kesselaustritt).
- Der Wasserdampfpartialdruck der feuchten Luft wird durch die zusätzliche Zufuhr von Wasserdampf dem Wasserdampfpartialdruck des Abgases angepasst.

- Der Gesamtmassenstrom an feuchter Luft entspricht dem des Abgasmassenstroms.

Bei den Vorversuchen am Plattenwärmetauscher wurde die Kondensationsrate bei unterschiedlichen Eintrittstemperaturen des Kühlwassers in den Wärmetauscher sowie die Temperaturverteilung über den Plattenwärmetauscher untersucht.

Die experimentellen Voruntersuchungen zum erzwungenen konvektiven Wärmeübergang einer Strömung in einem Rohr wurden, für Vergleichszwecke, sowohl für trockene als auch für feuchte Luft durchgeführt. Die Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten für die erzwungene Strömung mittels feuchter Luft wurde derart durchgeführt, dass die angesaugte trockene Luft soweit mit einem extern bereitgestellten Wasserdampf angereichert wurde bis der für die Wärmeübergangsmessung verwendete Luftmassenstrom eine relative Feuchtigkeit von 10 bzw. 20% aufwies. Die Wassereintrittstemperatur in den Prüfstand wurde für alle Untersuchungen so gewählt, dass es im Falle der feuchten Luft auch zu einer Kondensation des in der Luft enthaltenen Wassers gekommen ist. Für die experimentelle Bestimmung des Wärmeübergangs wurde der in Abb. 3 dargestellte Versuchsstand aufgebaut und mit dem notwendigen Messequipment instrumentiert. Eine detaillierte Beschreibung des Versuchsaufbaus und des zur Anwendung gekommenen Messequipments kann der Referenz [14] entnommen werden.



Bild 3: Versuchsstand zur Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangs einer erzwungenen Rohrströmung trockener bzw. feuchter Luft

In Abbildung 4 ist ein Bild des Technikumsversuchsstands dargestellt. Um einen unbeeinflussten und weitestgehend flexiblen Ablauf der Versuche zu gewährleisten wurden getrennte Wasserkreisläufe für den entwickelten Apparat und dem Pelletofen installiert. Zur Bestimmung der Massen- und Energiebilanzen wurden die gas- und wasserseitigen Temperaturen vor und nach dem multifunktionellen Apparat mittels Thermoelementen vom Typ J (FeCu-Ni) und PT100; der wasserseitige Massenstrom mittels Ultraschallsensoren vom Typ 8081 von Bürkert Fluid Control Systems sowie der gasseitige Massenstrom mittels einem Pitotrohr und Mikromanometer der Firma Furness Controls vom Typ FC012 bestimmt. Für die Messung des Umgebungsdrucks kam ein Digitalbarometer vom Typ GTD 1100 zum Einsatz.

Die Datenerfassung erfolgte computerunterstützt über eine USB-Schnittstelle. Die digitalen Ein-

gangssignale in den PC wurden von einem NIcDAQ System mit unterschiedlichen Erfassungsmodulen der Firma National Instruments bereitgestellt. Die Datenerfassungssoftware am Computer wurde am IET mit dem Softwaretool LabView von National Instruments entwickelt und implementiert.

Um aussagekräftige Daten zum Abscheideverhalten des multifunktionalen Apparats zu erhalten, wurden Experimente bei unterschiedlichen Parametern im Technikumsmaßstab durchgeführt, bei denen der im Abgas enthaltene Feinstaub gemessen wurde. Die einzelnen Messungen der Feinstaubkonzentration fanden zeitgleich am Abgasein- und -austritt des Apparats statt. Für die bei der Feinstaubmessung zur Anwendung kommende Methode sei auf die Referenzen [17] und [18] verwiesen.

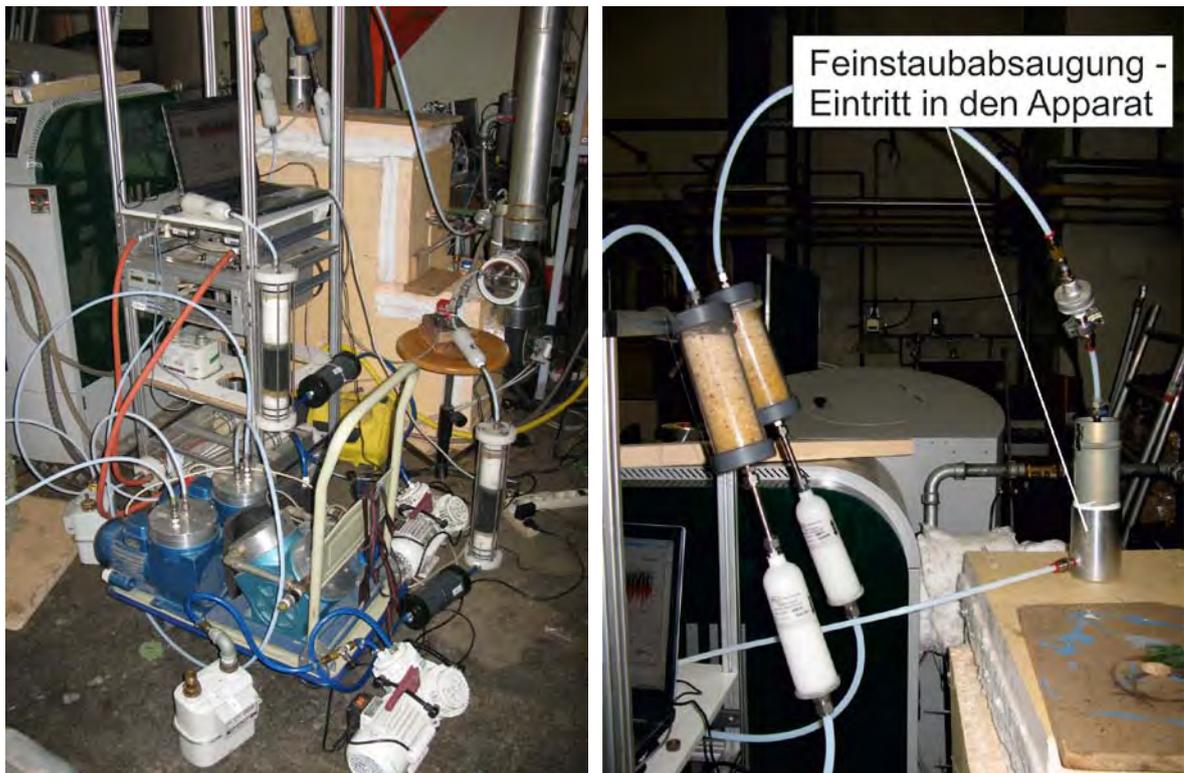


Bild 4: Technikumsversuchsstand des multifunktionalen Apparates mit Einrichtung zur Feinstaubmessung

Arbeitspaket: Auswertung, ggf. Reg-Design

Dieses Arbeitspaket befasst sich mit der Auswertung der Versuchsergebnisse deren Interpretation und der Verbesserung des multifunktionalen Abscheiders. Dazu wurden die in den Versuchen gewonnenen experimentellen Daten, wenn wie im Falle der Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten für die erzwungene Rohrströmung notwendig, einer Datenreduktion unterzogen. Die Genauigkeit der einzelnen Messpunkte wurde mit unter Zuhilfenahme der DIN 1319 [15] sowie der Referenz [16] ermittelt.

In Diskussionsrunden wurden die Messergebnisse interpretiert und anschließend soweit aufbereitet, dass diese für die Entwicklung bzw. Optimierung des multifunktionalen Apparates verwendet werden konnten.

3. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

3.1 Recherchen zum Stand der Technik

Die Analysen und Recherchen zum Stand der Technik sowie dem Umfeld der Rauchgaskondensation und Feinstaubabscheidung ergaben, dass dazu bereits Patente existieren. Der grundsätzliche Teil des Verfahrens, wonach eine Taupunktunterschreitung die Abscheidung fördert, ist allgemein bekannt und Stand des Wissens bzw. der Technik. Für spezielle Ausbildungen des entsprechenden Apparats gab es nach den vorliegenden Rechercheergebnissen Freiräume, insbesondere wird der Mechanismus der Abstrahlung nicht explizit angesprochen. Einrichtungen mit Taupunktunterschreitung und der nach geschalteten elektrostatischen Abscheidung sind Stand der Technik; das gegenständliche Forschungsvorhaben zielte jedoch auf das Vermeiden des elektrostatischen Abscheiders ab und war daher nicht durch Patente eingeschränkt. Bei der ebenfalls durchgeführten Marktrecherche konnte ebenso der Schluss gezogen werden, dass keine Relevanz zum Forschungsvorhaben gegeben war.

Die Recherche bezüglich der gesetzlichen Rahmenbedingungen zur Feinstaubabscheidung bei kleinen und mittleren biomassegefeuerten Kesseln hat ergeben, dass man sich während des Forschungsprojektes an die in Tabelle 3 dargestellten mittelfristigen Zielwerte orientieren sollte.

Anlagengröße [kW]	O ₂ -Bezug [Vol %]	Staub [mg/Nm ³]	CO [mg/Nm ³]
> 4 - 500	13	20	400
> 500 - 1000	13	20	300
> 1000 - 10000	13	16	200

Tabelle 3: mittelfristige Zielwerte für Biomasseöfen

3.2 Variantenentwürfe und -auswahl

Basierend auf den Ergebnissen der experimentellen und ingenieurmäßigen Basisuntersuchungen sowie jener der Kreativtechniken wurden unterschiedliche Varianten des zu entwickelnden Apparats zur Rauchgaskondensation mit integrierter Feinstaubabscheidung entworfen, wobei im Zuge der Ergebnisdiskussion eine dieser Varianten von den Projektpartnern für die Fertigung und den daran anschließenden Technikumsversuchen ausgewählt wurde. Am Ende dieses Arbeitspaketes lag eine erste Zusammenstellungszeichnung für die ausgewählte Apparatevariante vor.

3.3 Stationäre Kreislaufberechnungen zur Niedertemperaturnutzung

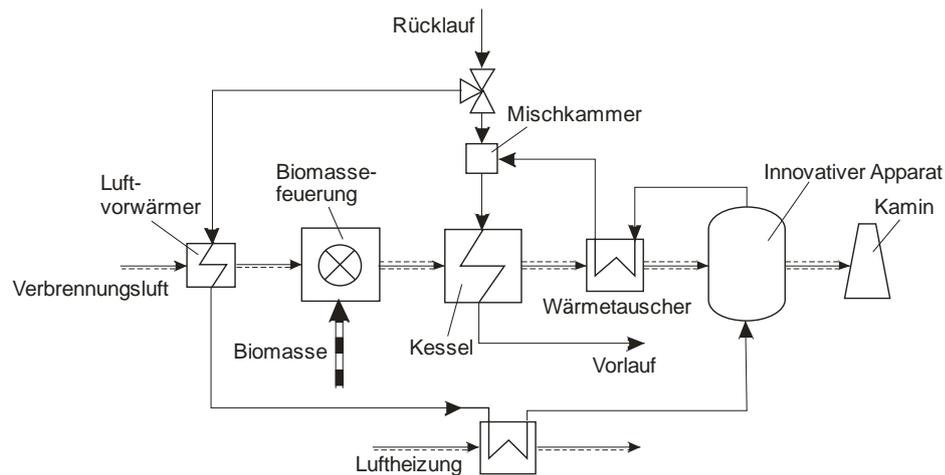


Bild 5: Schaltungsvariante Verbrennungsluftvorwärmung und Luftheizung mittels Rücklaufbypassschaltung

Abb. 5 zeigt als ein stellvertretendes Beispiel eine der analysierten Schaltungen zur Nutzung der Niedertemperaturwärme. Bei dieser untersuchten Variante wird dem Rücklauf, welcher eine angenommene Wassertemperatur von $\vartheta_{RL} = 60\text{ °C}$ besitzt, ein Bypassmassenstrom entnommen, welcher mit der Verbrennungsluft und einer zusätzlichen für Heizzwecke genutzten Luft auf 30 °C abgekühlt werden sollte. Der kalte Bypassmassenstrom wird anschließend durch den zu entwickelnden Apparat geleitet. Der zu Heizzwecken entnommene Wärmestrom durch die Luftheizung wurde mit 2 kW angenommen.

Tabelle 4 zeigt eine Zusammenfassung ausgewählter Ergebnisse für die einzelnen untersuchten Schaltungsvarianten der Kreislaufberechnungen. Die Berechnungen haben ergeben, dass eine möglichst niedrige Rücklauftemperatur des Wassermassenstroms wünschenswert wäre. Am einfachsten, und ohne großen apparativen Aufwand lässt sich daher eine Fußboden- oder Wandheizung mit einer niedrigen Rücklauftemperatur realisieren. Hierbei ist die Brennstoffausnutzung sowohl für Pellets als auch für Hackschnitzel am Besten. Eine nachträgliche Installation eines solchen Systems wäre aus technischen wie ökonomischen Gründen nicht realisierbar. Sollte eine Niedertemperaturheizung nicht möglich sein, so besteht noch die Möglichkeit einer Verbrennungsluftvorwärmung. Die Wirkung einer solchen ist jedoch sehr stark temperaturabhängig, die Leistungssteigerung ist auch bei niedrigen Umgebungstemperaturen beschränkt. Eine zusätzliche Luftheizung (siehe Abb. 5) bringt für die Brennstoffausnutzung dieselben Vorteile wie die Niedertemperaturheizung, der konstruktive und bauliche und somit finanzielle Aufwand steigt jedoch erheblich bei deren Implementierung und muss daher als Lösungsansatz aus ökonomischer Sicht verworfen werden. So müsste neben den Heizkreisläufen auch ein Heizluftsystem errichtet werden. Der Vorteil dieser Anlagenbauweise wäre, dass diese auch mit Rücklauftemperaturen funktioniert, welche heute Stand der Technik sind, also bei ca. 60 °C . Als problematisch bei allen Gas-Gaswärmetauschern ist jedoch anzusehen, dass die für die Wärmeübertragung notwendigen Flächen des Wärmetauschers aufgrund der niedrigen konvektiven Wärmeübergangszahlen sehr groß werden.

Variante	Kondensatmassenstrom Wasser [kg/h]			Auf die Feuerleistung bezogene Wärmeleistung [%]		
	Methan (CH ₄)	Pellets	Hack- schnittzel	Methan (CH ₄)	Pellets	Hack- schnittzel
1	2.75	1.33	2.47	12.84	8.26	10.52
2	1.96	0.04	1.15	9.90	3.62	5.71
3	0.7	0.75	0.89	5.58	6.12	4.79
4	0.36	0.3	0.4	4.48	4.51	3.14
5	0.54	0.29	0.51	5.07	4.49	3.50
6	0.31	0.17	0.29	4.30	4.05	2.75
7	1.14	0.62	1.08	7.06	5.63	5.45
8	0.45	0.24	0.42	4.76	4.31	3.20
9	2.75	0.89	1.41	12.84	6.64	6.63
10	2.75	1.77	2.47	12.77	8.24	7.47
11	2.75	1.33	2.47	12.80	8.24	10.49
12	3.17	1.87	3.02	14.27	10.34	12.65
13	2.84	1.46	2.6	13.16	8.74	11.01

Tabelle 4: Zusammenstellung ausgewählter Ergebnisse der stationären Kreislaufberechnungen

Aus den Ergebnissen wurde ersichtlich, dass die reale Umsetzung für einen Teil der theoretisch untersuchten Kreisläufe zur Nutzung der Niedertemperaturwärme aus techno-ökonomischen Gründen sowie sicherheitstechnischen Beschränkungen nicht realisierbar ist.

Für die reale Umsetzung im Technikumsversuch wurde daher einer einfachen, technisch leicht zu realisierbaren und wirtschaftlichen Schaltung der Vorzug gegeben. Diese Schaltungsvariante besitzt auch die höchste Wahrscheinlichkeit einer späteren Umsetzung in einer Demonstrationsanlage.

3.4 Stationäre Strömungssimulationen des entwickelten Apparats

Die Ergebnisse der zur Unterstützung der Variantenauswahl getätigten stationären Strömungssimulationen dienten einerseits der Optimierung der Abgasführung im Abscheider (räumliche Anordnung der einzelnen Abscheider) sowie andererseits der Auswahl (Geometrie) der für die Fertigung zu verwendenden Halbzeuge des Wärmetauschers. Des Weiteren konnten etwaige Todräume innerhalb des Apparats identifiziert werden, welche zu Anhäufungen von Staubablagerungen neigen. Diese mussten durch ein entsprechendes Re-Design des Apparats vermindert werden. Eine vollkommene Beseitigung der Todräume konnte jedoch nicht erreicht werden.

Als weiteres Ergebnis der Simulationen konnte der Einfluss etwaiger Bypassströmungen untersucht und deren Auswirkung auf die Abscheidungswirkung abgeschätzt werden.

3.5 Basic Engineering und Fertigung des Apparats

Das Basic Engineering des multifunktionalen Apparats hatte als Ergebnis zur Folge, dass die für eine anschließende Fertigung notwendigen Konstruktionszeichnungen, welche unter Berücksichtigung wichtiger Gestaltungsmerkmale, wie z.B. eine kostengünstige Fertigung, eine Selbstreinigung, Messstellen für z.B. Temperatur, Staubbelastung usw., erarbeitet wurden, vorlagen.

Die Fragen nach geeigneten Werkstoffen bezüglich der Korrosion und der Produktion (z.B. schweißbare Ausführung) des Apparats wurden ebenfalls behandelt und beantwortet. Der Abb. 6 ist die Zusammenstellungszeichnung des entwickelten Apparats zu entnehmen.

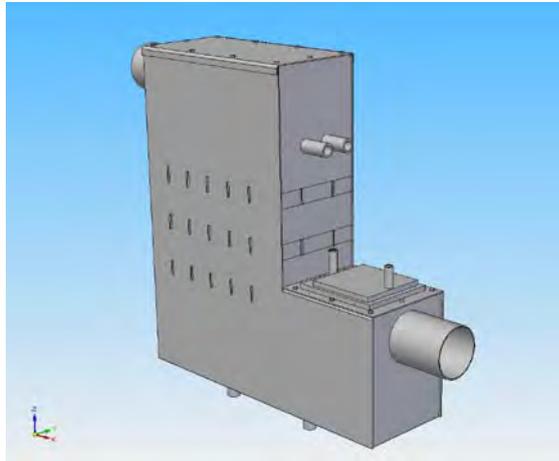


Bild 6: Zusammenstellungszeichnung des multifunktionellen Apparats

Abb. 7 zeigt den vom Biomassekesselhersteller HERZ gefertigten und anschließend an das Labor des IET gelieferten Apparats zur Kondensation und Feinstaubabscheidung des Abgases aus einem Biomassekessel.



Bild 7: Multifunktioneller Apparat zur Abgaskondensation und Feinstaubabscheidung nach dessen Anlieferung ins Labor

3.6 Versuchsaufbau, Technikumsversuche und Monitoring

3.6.1 Vorversuche zur Bestimmung des Einsetzens der Kondensation

Abb. 8 zeigt als Ergebnis der experimentellen Voruntersuchungen am Plattenwärmetauscher den Kondensatmassenstrom aus dem Abgas des Pelletofens (rote Punkte) bzw. der feuchten Luft

(schwarze Punkte) in Abhängigkeit von der Eintrittstemperatur (Rücklauf­temperatur) des Kühlwassers. Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, liegt bei der Kondensation von Wasser aus feuchter Luft bzw. aus dem Abgas des Pelletofens eine gute Übereinstimmung vor. Nimmt man den Wassertaupunkt des Rauchgases aus der Verbrennungsrechnung von Pellets, welcher mit ca. 46°C bestimmt wurde, als Vergleichswert (siehe dazu auch Tabelle 2), so kann ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten festgestellt werden. Aufgrund der bei den durchgeführten Experimenten erzielten Messergebnisse und der daran anschließenden Auswertung und Analyse ist eine Berechnung des Kondensationsvorganges bzw. der Entwurf des Apparates über die Analogie feuchte Luft - Abgas zulässig.

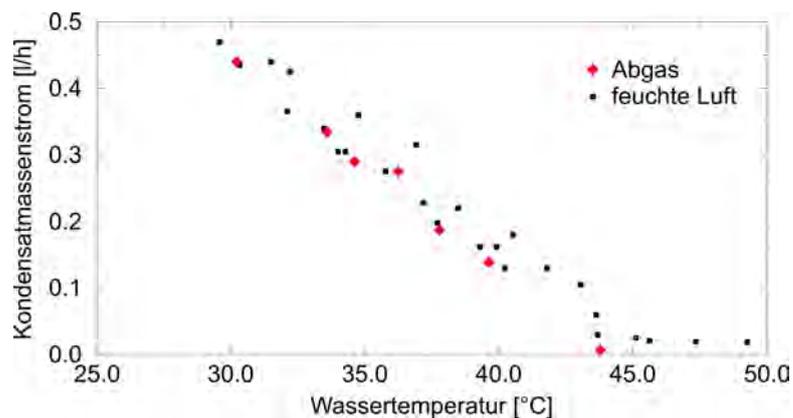


Bild 8: Massenstrom an Wasserkondensat bei der Kondensation von feuchter Luft bzw. Abgas in Abhängigkeit von der Eintrittstemperatur des Kühlwassers.

3.6.1 Vorversuche zur Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten für eine erzwungene Strömung

Der Abb. 9 kann ein Ergebnis der Vorversuche zur Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten einer erzwungenen Strömung von trockener bzw. feuchter Luft (im Falle von feuchter Luft mit Kondensation) in einem Rohr entnommen werden. Die Abbildung stellt den Wärmeübergangskoeffizienten von trockener bzw. feuchter Luft (10% bzw. 20% Feuchte) in Abhängigkeit von der Reynoldszahl dar. Wie dem Bild zu entnehmen ist, tritt der in der Literatur beschriebene Effekt ein, dass mit zunehmender Kondensationsrate (höheren Feuchtigkeit der Luft) der Wärmeübergangskoeffizient ansteigt. Die große Streuung der Messdaten für die Luft, welche bei einer relativen Feuchtigkeit von 20% ermittelt wurden, ist dadurch gegeben, dass eine genaue Einstellung des zugeführten Dampfmassenstromes mit zunehmender Feuchtigkeit schwieriger wurde.

Da der Wärmeübergang wesentlich für die Dimensionierung von Wärmetauschern ist, konnte mit Hilfe dieser experimentellen Ergebnisse die Auslegung der für die Durchführung des Forschungsprojektes notwendigen Wärmetauscher auf einer abgesicherten Basis erfolgen.

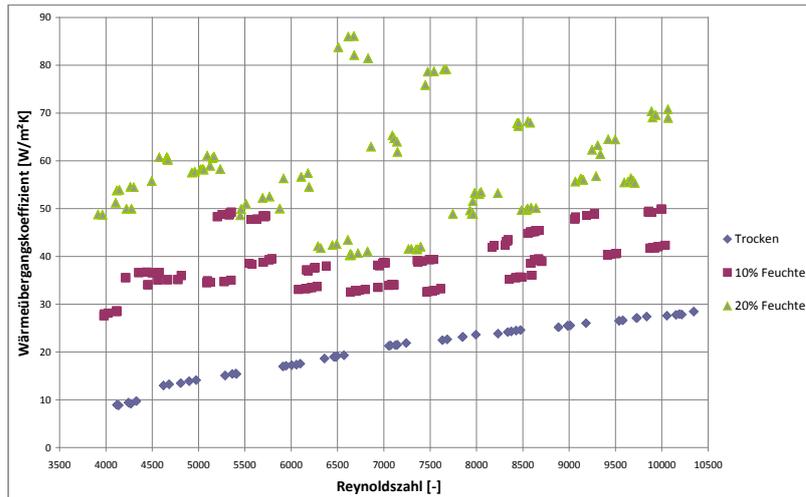


Bild 9: Wärmeübergangskoeffizienten von trockener bzw. feuchter Luft in Abhängigkeit von der Reynoldszahl.

3.6.2 Technikumsversuche

In Abbildung 10 ist die aus Messdaten ermittelte Wärmeleistung des entwickelten Apparats, wie er in Abbildung 7 dargestellt ist, aufgetragen über die Rücklauf­temperatur aus dem Heizkreislauf. Die rot dargestellte Kurve kennzeichnet die Wärmeleistung des gesamten entwickelten Apparats, während die blau eingezeichnete Kurve diejenige Wärmeleistung darstellt, welche unter den Bedingungen des Technikumsversuchs ohne den Abscheidewärmetauscher gewonnen werden konnte. Der geringe Unterschied zwischen diesen beiden Kurven ergibt sich aus dem Umstand, dass es aufgrund der niedrigen Rücklauf­temperatur des Wassers aus dem Heizkreislauf bereits im Rauchrohrwärmetauscher zu einer Kondensation von Wasser aus dem Abgas in der Grenzschicht der Rauchgasströmung zur Wand kommt. D.h., neben der konvektiven Wärmeleistung wird auch bereits Verdampfungswärme frei und an die gekühlten Wände abgegeben. Betrachtet man die bei der Abkühlung des Abgases, welche am Austritt aus dem Pelletofen mit einer Temperatur lt. Datenblatt von ca. 120°C vorliegt, erhaltene Wärmeleistung bei einer Rücklauf­temperatur des Wassers aus dem Heizkreislauf von ca. 30°C, so erkennt man, dass diese bei ca. 3 kW liegt. Dies entspricht einer durch die Abgaskondensation zusätzlich zur Verfügung stehenden Wärmeleistung von ca. 13.5%. Bei einer Rücklauf­temperatur des Wassers aus dem Heizkreislauf von ca. 42°C (die Temperatur liegt knapp unter der Sättigungstemperatur des im Abgas enthaltenen Wassers von ca. 46°C) kann, laut experimentellen Daten, noch mit einer zusätzlichen Wärmeleistung von ca. 6.8% gerechnet werden.

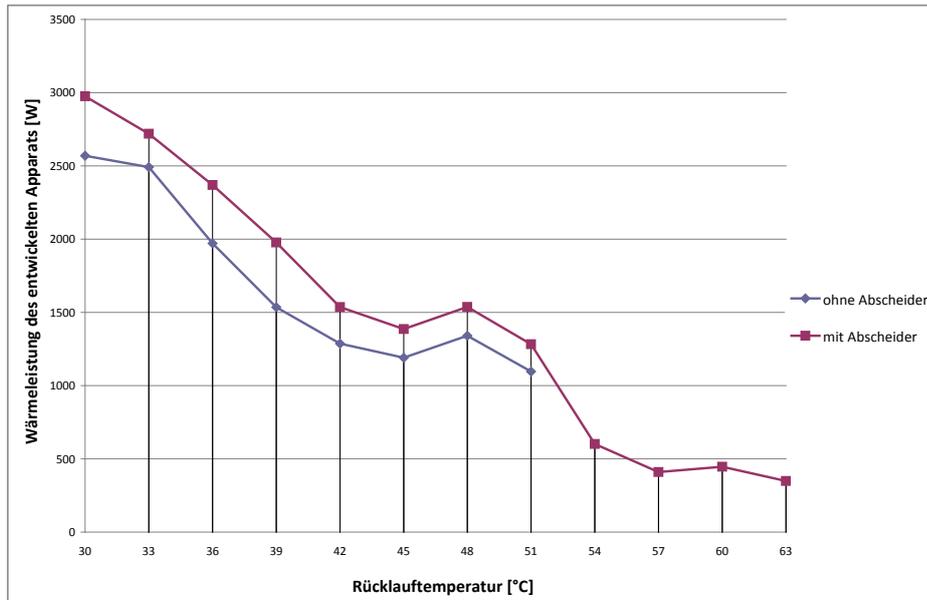


Bild 10: Wärmeleistung des entwickelten Apparats in Abhängigkeit der Rücklauf-temperatur.

Abbildung 11 zeigt die nach einem Versuch vorliegenden Filter mit Feinstaubbelag, welche am Abgasein- und -austritt des multifunktionalen Apparats implementiert waren. Die Messung des Feinstaubes erfolgte zeitgleich am Ein- und Austritt des Abgases in bzw. aus dem entwickelten Apparat.



Bild 11: Feinstaubfilterproben vom Ein- und Austritt des multifunktionalen Apparats

Der Abbildung kann entnommen werden, dass visuell ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Staubproben vorliegt. Am Austritt aus dem entwickelten Apparat ist eine deutlich stärkere Verfärbung des Filters im Vergleich zum Eintritt zu erkennen. Warum es zu dieser unterschiedlichen Färbung des Feinstaubes in den Filtern gekommen ist, müsste in einer weiterführenden Untersuchung z.B. in einem Massenspektrometer, durchgeführt werden. Eine Ursache dafür könnte die Bildung von etwaigen Salzen während des Kondensationsvorganges sein oder mit der

Abgasströmung im Apparat aufgenommene Partikel von der Oxidschicht im Abscheidewärmetauscher.

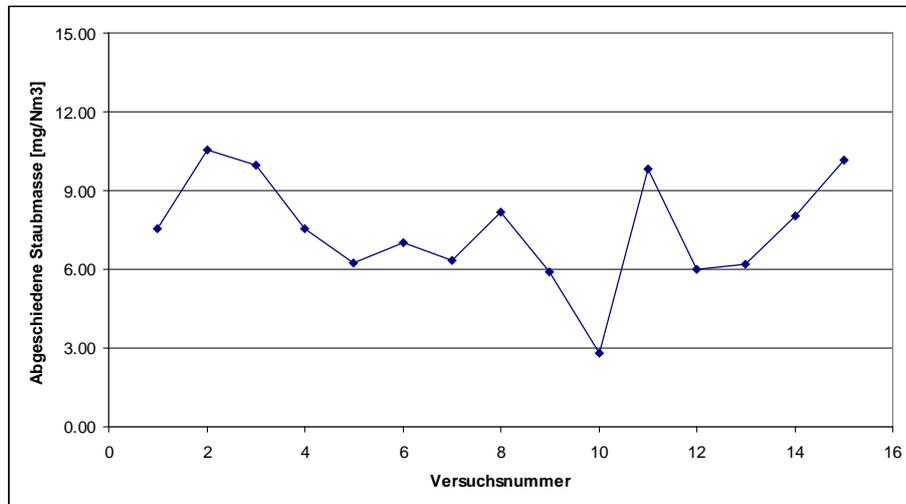


Bild 12: Abgeschiedene Feinstaubmasse des multifunktionalen Apparats

Abb. 12 zeigt die im multifunktionalen Apparat abgeschiedene Feinstaubmasse aufgetragen über die einzelnen Versuche entsprechend der Tabelle 3. Im Mittel werden vom entwickelten multifunktionalen Apparat 7.48 mg/Nm^3 Feinstaub abgeschieden. Dies entspricht in etwa $1/3$ des in der Tabelle 2 angepeilten Betrages von 20 mg/Nm^3 . Die Differenz zur angepeilten Feinstaubmasse mag auf den ersten Blick groß sein, ist jedoch dahingehend zu relativieren, als dass es sich hier um einen ersten Versuchsapparat handelt. Dieser weist sicherlich noch weitere Optimierungsmöglichkeiten auf, welche in dem nun abgeschlossenen Forschungsprojekt aufgrund seiner Laufzeit und Zielsetzung nicht zu verwirklichen gewesen sind, bzw. hier noch weiterer Forschungsbedarf besteht.

Tabelle 5 zeigt eine Zusammenstellung der Ergebnisse der Feinstaubmessung (gemessen wurden Partikelgrößen $\leq 10 \text{ }\mu\text{m}$) bei unterschiedlichen Eintrittstemperaturen des Kühlwassers in den entwickelten Apparat. Wie der Tabelle entnommen werden kann, kommt es bei der Verwendung des multifunktionalen Apparats zu einer Abscheidung des Feinstaubes mit einer Partikelgröße $\leq 10 \text{ }\mu\text{m}$. Wie den Messergebnissen der Tabelle 5 zu entnehmen ist, konnte bei den durchgeführten Messungen keine Abhängigkeit der Abscheideleistung des Apparates von der Eintrittstemperatur des Kühlwassers festgestellt werden. Über den gesamten untersuchten Temperaturbereich beträgt die mittlere Abscheideleistung des Apparates 25.2% bezogen auf die eintretende Feinstaubmasse.

Messung	Rücklauf- temperatur [°C]	Staubbelastung Rauchgas [mg/Nm ³]		Abscheidegrad [%]
		Eintritt Apparat	Austritt Apparat	
1	30	29.77	22.24	25.28
2	35	27.67	17.14	38.05
3	35	29.42	19.44	33.93
4	35	31.12	23.56	24.29
5	35	31.39	25.15	19.86
6	35	32.13	25.12	21.82
7	45	19.68	13.33	32.26
8	45	27.30	19.13	29.93
9	45	29.02	23.09	20.42
10	45	29.34	26.53	9.57
11	45	32.78	22.98	29.89
12	51	25.67	19.67	23.37
13	51	26.46	20.27	23.39
14	51	37.01	28.98	21.70
15	51	42.45	32.31	23.89

Tabelle 5: Ergebnisse der Feinstaubmessung am multifunktionalen Apparat

4. Ausblick und Empfehlungen

Im gegenständlichen Forschungsprojekt wurde u.a. untersucht, ob durch die Kondensation des Abgases einer Biomassefeuerung ein signifikanter Wärmerückgewinn erzielt werden kann, welcher den Aufwand eines zusätzlichen zu implementierenden Wärmetauschers rechtfertigt. Diese Untersuchung wurde für den Biomassebrennstoff Holzpellet durchgeführt. Der Nachteil dieses Brennstoffes aus der Sicht der Niedertemperaturnutzung besteht darin, dass er einen gegenüber Hackschnitzeln oder Erdgas, niedrigeren Wasseranteil und somit niedrigeren Wasserpartialdruck im Abgas besitzt. Daraus resultiert, dass der Taupunkt des Wassers im Abgas eines Pelletofens unter dem einer Hackschnitzel- oder Erdgasfeuerung zu liegen kommt. Die Ergebnisse lassen sich jedoch auf Biomassebrennstoff mit einem höheren Wassergehalt übertragen. Basierend auf den numerischen Ergebnissen und den experimentellen Daten lässt sich zusammenfassen, dass sich bei einer niedrigen Rücklauftemperatur aus dem Heizkreislauf ein signifikanter Wärmerückgewinn erzielen lässt. Am einfachsten, und ohne großen apparativen Aufwand lässt sich daher für diese Technologie nur eine Fußboden- oder Wandheizung mit einer entsprechend niedrigen Rücklauf-temperatur realisieren. Eine nachträgliche Installation eines solchen Feuerungssystems ist aus technischen wie ökonomischen Gründen nicht realisierbar, wenn keine bestehende Fußboden- oder Wandheizung vorliegt.

An einem Technikumsversuchsstand wurden experimentelle Untersuchungen zur Wärmerückgewinnung durch Abgaskondensation und zur Feinstaubabscheidung durchgeführt. Es konnte anhand der dabei erzielten Daten nachgewiesen werden, dass das dem gegenständlichen

Forschungsprojekt zugrundegelegte Ziel einer Erhöhung des Kessel- und Anlagewirkungsgrades und die gleichzeitige Feinstaubabscheidung in einem einer Biomassefeuerung nachgeschalteten Apparat erreicht werden konnte. Somit sollte der Schritt in die Errichtung einer Pilot- bzw. Demonstrationsanlage gewagt werden können, wobei weitere grundlegende Untersuchungen zur Keimbildung und Tropfenwachstum notwendig sein werden, um das physikalische Verständnis dafür weiter zu vertiefen. Aber auch für eine weitere Optimierung des multifunktionellen Apparates gibt es noch Spielraum, welcher bei einer weiterführenden Entwicklungs- und Forschungstätigkeit ausgeschöpft werden sollte. So sei hier als ein Beispiel der Einfluss von verschiedenen Turbulatoren auf den konvektiven Wärmeübergang und dem Druckabfall bei niedrigen Reynoldszahlen bei gleichzeitiger Kondensation angeführt. Es müsste in weiterer Folge auch untersucht werden, aus welchen einzelnen Bestandteilen der Feinstaub besteht um weitere Maßnahmen zu seiner Abscheidung treffen zu können.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Fritz, W. und Kern, H.: Reinigung von Abgasen. Vogel Buchverlag 1990
- [2] Marutzky, R. und Seeger, K.: Energie aus Holz und anderer Biomasse. DRW-Verlag 1999
- [3] Obernberger, I.: Schriftenreihe. Thermische Biomassenutzung: Bände I, 1997; II, 1998; III, 1998; IV, 1999. dbv-Verlag TU Graz
- [4] Obernberger, I., et al.: State of the art of small scale biomass combustion with respect to fine particle emissions - country report from Austria. Mitteleuropäische Biomassekonferenz 2008, 16. - 19. Jänner 2008, Graz. S. 84
- [5] Kaltschmitt, M. und Hartmann, H.: Energie aus Biomasse. Springer Verlag, 2000
- [6] Prüfbericht der BLT Wieselburg für Pelletkessel
- [7] Prüfbericht der BLT Wieselburg für den Hackschnitzelkessel
- [8] IUPAC Periodic Table of the Elements, IUPAC, the International Union of Pure and Applied Chemistry, http://old.iupac.org/reports/periodic_table/IUPAC_Periodic_Table-22Jun07b.pdf, Sept. 2010.
- [9] Brandt, F.: Brennstoffe und Verbrennungsrechnung. Vol. 1, 3. Auflage, FDBR - Fachbuchreihe, Vulkan-Verlag, Essen, 1999.
- [10] Wagner, W.: VDI Wärmeatlas - Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, Kapitel: Stoffwerte von Wasser. VDI-Verlag GmbH., Düsseldorf, 10. Auflage, 1996
- [11] Witte, U. Steinmüller Pocket Book Steam Generation, 2. Ausgabe, Vulkan Verlag, 1994
- [12] Perujo, M. P.: Condensation of Water Vapour and Acid Mixtures from Exhaust Gases. Dissertation Technische Universität Berlin, 2004
- [13] Durchflussmessung mit Drosselgeräten; Blenden und Düsen für besondere Anwendungen, VDI/VDE 2041, 1991
- [14] Huber, D. und Walter, H.: "Forced convection heat transfer in the transition region between laminar and turbulent flow for a vertical circular tube"; Vortrag: International Conference on Fluid Mechanics and Heat & Mass Transfer 2010, Corfu Island, Greece; 22.07.2010 - 24.07.2010; in: "Latest Trends on Theoretical & Applied Mechanics, Fluid Mechanics and Heat & Mass Transfer", N. Mastorakis, V. Mladenov, Z. Bojkovic (Hrg.); (2010), ISBN: 978-960-474-211-0; S. 132 - 136.
- [15] Grundlagen der Messtechnik - Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße, Endbericht ENERGIE DER ZUKUNFT

Messunsicherheit, DIN 1319, Berlin 1996.

[16] Bantel, M.: "Grundlagen der Messtechnik", 1. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig, 2000.

[17] Schmidl, C., Bauer, H., Dattler, A., Hitzenberger, R., Weissenböck, G., Marr, I. L. und Puxbaum, H.: Chemical characterisation of particle emissions from burning leaves. *Atmospheric Environment*, 42, S. 9070–9079 (2008).

[18] Schmidl, C.: Chemical characterisation of particulate matter (PM) emissions from biomass combustion sources. Dissertation, Technische Universität Wien, 2008