

Diplomarbeit

Technologien Österreichischer Wirbelschicht- Verbrennungsanlagen

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom - Ingenieurs unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz WINTER

E 166

Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und techn. Biowissenschaften

Eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Amon PURGAR B.Sc.

0527918

Fabrikstraße 1b

4020 Linz

Wien am 03.10.2012

Diese Diplomarbeit wurde im Rahmen des Projektes " IEA:FBC Teilnahme, Koordination, Vernetzung - Kontinuität der Österreichischen Koordination, Vernetzung und Teilnahme IEA - Fluidized Bed Conversion hinsichtlich einer Schadstoff- u. CO₂-armen Energietechnologie " durchgeführt und seitens des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie unterstützt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Internationale Energieagentur	6
1.2	Multilateral Technology Initiative Fluidized Bed Conversion	7
1.2.1	Multilateral Technology Initiative (Implementing Agreements)	7
1.2.2	International Energy Agency - Fluidized Bed Conversion (IEA-FBC)	7
1.3	Grundlagen der Wirbelschichtverbrennung	8
2	Quantifizierung österreichischer Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen	11
2.1	Egebnisse der Kategorisierung	13
2.2	Papier- und Zellstoffindustrie (PZ)	15
2.2.1	Beispielanlage der Papier- und Zellstoffindustrie	17
2.3	Thermische Reststoffverwertung (TRV)	23
2.3.1	Beispielanlage der Thermischen Reststoffverwertung	24
2.4	Thermische Verwertung kommunaler Klärschlämme (TVKK)	27
2.4.1	Beispielanlagen Simmering Wirbelschichtofen 1-3	28
2.5	Biomassekraftwerke (BKW)	34
2.5.1	Beispielanlage Biomassekraftwerk Timelkam	34
2.6	Stationäre und extern zirkulierende Technologien	38
3	Zusammenfassung	41
	Literaturverzeichnis	41
	Abbildungsverzeichnis	44
	Tabellenverzeichnis	47

Kurzfassung:

Im Zuge des *multilateral technology agreements Fluidized Bed Conversion*, der Internationalen Energieagentur, wird ein Statusreport der Wirbelschichttechnologie in Österreich erarbeitet. Der Fokus des Berichts liegt auf industriellen Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen. Die untersuchten Anlagen können vier Kategorien zugeordnet werden. Diese sind: Papier- und Zellstoffindustrie, thermische Reststoffverwertung, Biomassekraftwerke und die thermische Verwertung von kommunalen Klärschlämmen. Jeder Kategorie kann ein typisches Spektrum an Brennstoffen zugeordnet werden und mit Kenntnis der Inbetriebnahme-Zeitpunkte der Anlagen ergeben sich typische Zusammenstellungen von Rauchgasreinigungstechnologien. Durch ausgewählte Inhalte der Datenbank der TU-Wien über Wirbelschichtverbrennungsanlagen in Österreich und der Beschreibung einzelner Anlagen, stellvertretend für die jeweilige Branche beziehungsweise Industrie, werden Funktionsweise und Zweck von Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen in Österreich diskutiert.

Schlagwörter: Wirbelschichtverbrennung, Rauchgasreinigung, Brennstoffe

Abstract:

Within the scope of the multi-lateral technology initiative Fluidized Bed Conversion of the International Energy Agency a status report on fluidized bed technology in Austria, with the main focus on combustion, is under preparation. The investigated fluidized bed combustors are situated in Austria and have one Megawatt thermal capacity at minimum. With the exception of some demonstration plants the investigated objects can be categorized after industrial aspects. With knowledge of their fuel consumptions, date of activation and commercial purpose general statements about the flue gas cleaning system within their category can be made. By discussing single fluidized bed combustors for each category or industry and by showing selected content of the database of the Vienna University of Technology on fluidized bed combustors, the purpose and technology of fluidized bed combustion in Austria is discussed.

Keywords: fluidized bed combustion, emission reduction systems, fuels

Kapitel 1

Einleitung

Im Rahmen der österreichischen Tätigkeiten innerhalb des International Energy Agency - Implementing Agreement - Fluidized Bed Conversion entstand diese Diplomarbeit. Deren Ziel war es vorwiegend, die Datenbank der technischen Universität Wien von Wirbelschichtverbrennungsanlagen in Österreich zu aktualisieren und zu erweitern. Die Gewinnung der Daten erfolgte über Anlagenbesuche und über den Austausch von Informationen bei den jährlichen fbc-net-Treffen (*fluidized bed conversion - network*). Ein weiterer Aspekt war, die aktualisierten Daten zu analysieren und sofern möglich einer Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen. Der Schwerpunkt der Erweiterung der Datenbank waren die Emissionen und Rauchgasreinigungsanlagen der untersuchten Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen. Die in dieser Arbeit beschriebenen Daten und daraus resultierenden Ergebnisse wurden in Auszügen bereits öffentlich gemacht. Im Folgenden werden Veröffentlichungen und zukünftige Veröffentlichungen, die innerhalb dieser Arbeit entstanden, aufgelistet.

- Vorträge:

Biomass Utilization in Fluidized Bed Combustors, F. Winter*, A. Purgar, ACH 2012 Austrian-Croatian-Hungarian Combustion Meeting, 2012, April 12th und 13th 2012, Croatia, Zagreb

Concepts of Emission Reduction in Fluidized Bed Combustion of Biomass, ER-IN 2012 Education-Research-INnovation conference and Energy-and-Biomass conference, A. Purgar*, F. Winter, April 25th -27th 2012, Czech Republic, Prague

Effect of the Fuel Mix on the Flue Gas Cleaning System of Austrian Fluidized Bed Combustors, A. Purgar*, F. Winter, Impacts of Fuel Quality on Power Production and the Environment, September 23th -27th 2012, Austria, Puchberg

- Veröffentlichte Manuskripte:
Concepts of Emission Reduction in Fluidized Bed Combustion of Biomass, A. Purgar*, F. Winter, Acta Polytechnica, Journal of Advanced Engineering, Vol. 52, No. 4/2012 ISSN 1210-2709 e-ISSN 1805-2363, Czech Technical University - Publishing House, Czech Republic, Prague 2012
- Eingereichte Manuskripte:
Wirbelschichtverbrennungsanlagen in Österreich und ihre Rauchgas-Reinigungsanlagen, A. Purgar*, F. Winter, Chemie Ingenieur Technik, Wiley-VCH, Submitted 11.6.2012

Importance of the Bed Material for Optimized Fluidized Bed Combustion Operation, A. Purgar, F Winter*, 18th Fluidization & Particle Processing Symposium, November 8th - 9th 2012, Japan, Osaka, Submitted 02.10.2012 (Siehe Anhang 2)

1.1 Internationale Energieagentur

[19]

Die Internationale Energie Agentur (IEA) ist eine autonome Organisation deren Ziel es ist, eine zuverlässige, kostengünstige und saubere Energieversorgung für die 28 Mitgliedsstaaten sicherzustellen. Die IEA wurde als Reaktion auf die Ölkrise 1973/74 gegründet, um ihren Mitgliedern zu helfen, kollektiv auf die fluktuierenden Ölpreise zu reagieren. Neben dieser Kernaufgabe wurden weitere Betätigungsfelder in das Programm der IEA aufgenommen wie die Bereitstellung von Autoritäten und unvoreingenommener Forschung, einen globalen Dialog zum Thema Energie zu führen, sowie Analysen, Statistiken und Empfehlungen auszuarbeiten.

Die heutigen vier Kernaufgaben der IEA werden folgend aufgezählt:

- Energiesicherheit: Fördern von Vielfalt, Flexibilität und Effizienz in allen Energiesektoren
- Wirtschaftliche Entwicklung: Die Gewährleistung der stabilen Energieversorgung von IEA-Mitgliedstaaten und die Förderung der freien Märkte, um das Wirtschaftswachstum zu fördern und Energiearmut zu beseitigen
- Umweltbewusstsein: Erweiterung des internationalen Wissens über die Optionen zur Bewältigung des Klimawandels

- Weltweites Engagement Enge Zusammenarbeit mit Drittländern, insbesondere wichtiger Produzenten und Konsumenten, um Lösungen für gemeinsame Energie- und Umweltprobleme zu finden

1.2 Multilateral Technology Initiative Fluidized Bed Conversion

1.2.1 Multilateral Technology Initiative (Implementing Agreements)

[19]

Die IEA stellt mit über 40 Implementing Agreements eine Plattform für Mitgliedsstaaten, Nicht-Mitgliedsstaaten, Branchen, Industrien, internationale Organisationen und NGOs, bereit die es ermöglicht Forschung über bahnbrechende Technologien zu teilen, bestehende Forschungslücken zu füllen und Pilot- oder Demonstrationsanlagen zu verwirklichen. IEA-Implementing Agreements können jede technologiebezogene Aktivität zum Inhalt haben, sofern sie die vier grundlegenden, im vorhergehenden Kapitel 1.1 beschriebenen, Kernaufgaben der IEA weiterführen. Ein neues IEA Implementing Agreement kann jederzeit ins Leben gerufen werden sofern sich mindestens zwei Mitgliedsstaaten der IEA verpflichten sich einzubringen.

1.2.2 International Energy Agency - Fluidized Bed Conversion (IEA-FBC)

Die Wirbelschichttechnologie wurde von der IEA als zukunftsweisend anerkannt, ihre Vorteile gegenüber anderen vergleichbaren Technologien als förderungswürdig befunden und ein *implementing agreement* wurde von folgenden Staaten unterzeichnet:

Austria | Canada | China | Czech Republic | Finland | France | Greece | Italy | Japan | Korea, Republic of | Poland | Portugal | Russian Federation | Spain | Sweden | United Kingdom [19]

Die österreichischen Aktivitäten im und um das Technology Agreement Fluidized Bed Conversion werden vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie gefördert und werden im Folgenden kurz erörtert.

1. Die Teilnahme an den Executive Committee Meetings.
2. Das Abfassen von Implementig Agreement Berichten. Jährlich wird ein Bericht über die Aktivitäten innerhalb der IEA-FBC und des Netzwerkes von Wirbelschichtbetreibern in Österreich erstellt und öffentlich gemacht. Damit

und durch die systematische Nennung von Akteuren wird der Kontakt zu Paris zusätzlich gefördert und gehalten.

3. Reisen zu und vor Ort Besuche von Betreibern und Anlagenbauern innerhalb und außerhalb Österreichs
4. Organisieren von Workshops von Anlagenbetreibern und Anlagenbauern.
5. Die Aktualisierung und Erweiterung der IEA- FBC Datenbank. Um die Aktivitäten und Vorgänge betreffend Wirbelschichttechnologie in Österreich besser quantifizieren zu können, ist es unerlässlich eine Datenbank, über die sich im Betrieb befindlichen Anlagen, zu führen. Die Datenbank ist bereits seit Jahren vorhanden und wird laufend aktualisiert und wenn möglich je nach Interessensstand erweitert. Die anlagenspezifischen Daten, die vor allem während der in diesem Punkt beschriebenen Tätigkeiten gesammelt werden, können nach geeigneter Auswertung auch dazu dienen, richtungsweisende Trends der Wirbelschichttechnologie zu erkennen und mit dem Wissen darüber zukunftsorientiert zu arbeiten.
6. Für das *implementing agreement* wurde zur besseren Koordination der Teilnehmer eine eigene Homepage erstellt (www.iea-fbc.org). Auch die Koordination der Wirbelschichtbetreiber innerhalb Österreichs wird durch eine Homepage (www.iea-fbc.net) unterstützt.

1.3 Grundlagen der Wirbelschichtverbrennung

Es wird angenommen dass die Geschichte der Wirbelschichttechnologie um etwa 1920 begonnen hat. Der Name Fritz Winkler scheint fest mit den Anfängen der Wirbelschichttechnologie verbunden zu sein. Winkler leitete Verbrennungsgase in einen Kessel, der mit loser Kohle gefüllt war. Beim Erhöhen der Gasleerrohrgeschwindigkeit beobachtete er, dass die lose Schüttung von Kohlestücken ihr Volumen vergrößerte und sich bei Erhöhung der Gasgeschwindigkeit wie eine kochende Flüssigkeit verhielt. 1922 ließ er seine Arbeit patentieren und setzte seine Forschungen fort. Die ersten industriellen Anwendungen der Wirbelschichttechnologie wurden in den Jahren zwischen 1930 und 1940 realisiert. Grund dafür ist, dass Gebläse im industriellen Maßstab kommerziell verfügbar wurden, welche ausreichend Volumenstrom und Druck zur Fluidisierung bereitstellen konnten. Weitere Informationen zur Geschichte der Wirbelschichttechnologie können in [18] gefunden werden. Es ist jedoch weiter zu erwähnen, dass sich zwischen 1980 und 1993 ein Anstieg der Anzahl von Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen in der Papier- und Zellstoffindustrie verzeichnen lässt. Eine weitere Zunahme der Anzahl von Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen im industriellen Maßstab begann etwa um das Jahr 2000 im Umfeld der thermischen Reststoffverwertung und hält bis heute an. [18]

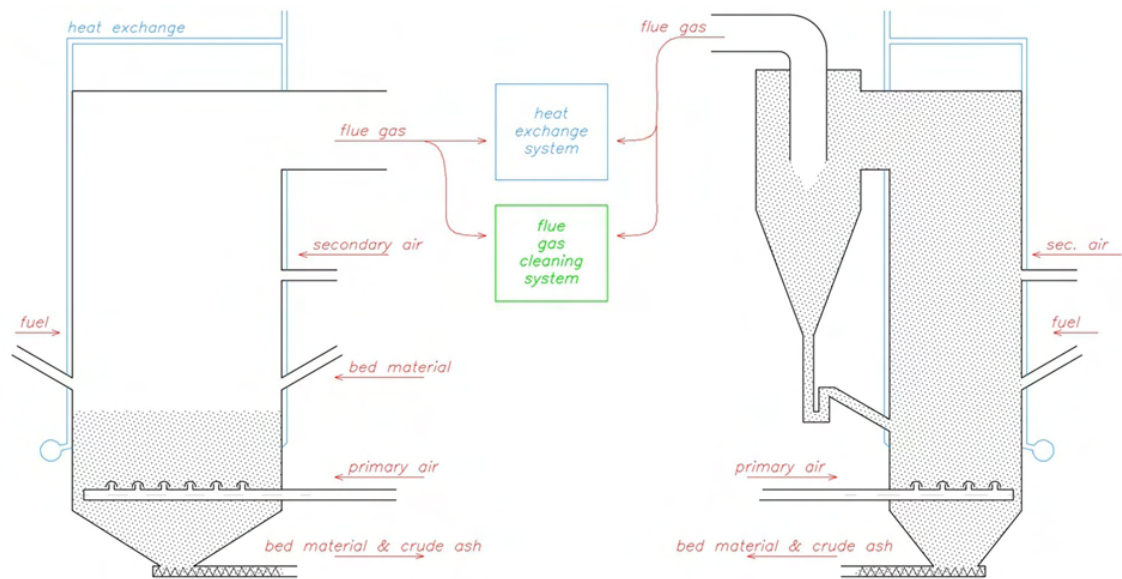


Abbildung 1.1: Prinzipieller Aufbau der stationären Wirbelschicht-Verbrennungsanlage (links) und der extern zirkulierenden Wirbelschicht-Verbrennungsanlage (rechts) [17]

Grundsätzlich können zwei verschiedene Arten der Wirbelschichtverbrennung unterschieden werden. Die stationäre und die extern zirkulierende Wirbelschichtverbrennung. Ihre Funktionsweisen und ihre wichtigsten Bestandteile können in Abbildung 1.1 eingesehen werden. Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen bestehen hauptsächlich aus einem Kessel, einem Gasverteilerboden, losem Bettmaterial und dem Freeboard. Der Gasverteilerboden, der mit Bettmaterial überlagert ist, leitet die Fluidisierungsluft in der Weise in den Kessel, dass sie von unten nach oben durch das Bettmaterial, meist Quarzsand mit definierten Korngrößenverteilungen, streicht. Der obere Teil des Kessels, der nicht mit Bettmaterial gefüllt ist, wird als Freeboard bezeichnet. Luftstufung lässt sich dadurch realisieren, dass der Primärluftanteil als Fluidisierungsluft in den Kessel gelangt und die Sekundär- und Tertiärluft in das Freeboard eingebracht werden. Viele Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen sind zusätzlich mit einem Gas- oder Ölbrenner zum Anfahren ausgerüstet. Ist der Brennraum, und damit das Bettmaterial, auf Temperatur gebracht, kann die Brennstoffzufuhr beginnen. Der Brennstoff wird in der Weise in den Reaktor eingebracht, dass sich Brennstoff und Bettmaterial gut durchmischen. Da sich, verglichen mit dem Bettmaterial, welches einige Tonnen ausmachen kann, nur wenige Prozent Brennstoff im Reaktor befinden, ergeben sich durch die hohe Wärmekapazität des inerten Bettsandes sehr gleichmäßige Temperaturen im Brennraum. Diese gleichmäßigen Temperaturen im Brennraum sind sehr unempfindlich gegenüber kurzzeitigen Fluktuationen der Brennstoffqualität, da das Bettmaterial als Wärmespeicher dient. Diese niedrigen Temperaturgradienten, über Ort und Zeit, zählen neben der Möglichkeit Kalkstein

in den Brennraum einzubringen, um während des Prozesses SO_2 zu binden, zu den erwähnenswertesten Vorteilen der Wirbelschichtverbrennung. [5]

Kapitel 2

Quantifizierung österreichischer Wirbelschicht- Verbrennungsanlagen

Den Untersuchungsumfang dieser Arbeit bilden Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen, die sich im Dezember 2011 in Betrieb befanden und in Österreich situiert sind. Es wurden ausschließlich Anlagen in den Untersuchungsumfang aufgenommen, deren Brennstoffwärmeleistung ein Megawatt übersteigt und die nicht der Gaserzeugung dienen. Nach oben angeführten Kriterien konnten 23 WS-Verbrennungsanlagen, siehe Tabelle 2.1, mit einer gesamten Brennstoffwärmeleistung von 1012 MW in den Untersuchungsumfang aufgenommen werden. [17]

Im Zuge der Diplomarbeit konnten fünf Anlagen vor Ort untersucht werden. An späterer Stelle werden einzelne Anlagen detailliert beschrieben. Zukünftig sollen weitere Standorte besucht werden und deren Kennzahlen bei den jährlichen Treffen oder durch einschlägige Literatur aktualisiert und ergänzt werden.

Mit Fischer [1], Walzl [7], Winter [18], Böhmer [4], Mann [9], Stubenvoll [15], Stroß [14] und TBU [6] kann die Brennstoffwärmeleistung jeder Anlage erhoben werden. Meist wird die Brennstoffwärmeleistung als genehmigte Brennstoffwärmeleistung angegeben und stellt somit die obere Begrenzung des Leistungsspektrums jeder Anlage da. Mit Fischer [1], Walzl [7], Winter [18], Böhmer [4], Mann [9], Stubenvoll [15], Stroß [14] und Bacher [3] kann die unten beschriebene Einteilung vorgenommen werden und der Zeitpunkt der Inbetriebnahme oder der Zeitpunkt der letzten Generalsanierung ermittelt werden. Zu folgender Einteilung ist anzumerken, dass die Brennstoffe, meist Gas, die zum An- und Abfahren der Anlage benötigt werden, nicht berücksichtigt werden. [16]

(PZ) Papier- und Zellstoffindustrie: Verbrennungsanlagen die sich im Verbund mit der Energieanlage einer Papier- oder Zellstoffproduktionsanlage befinden und keine Siedlungsabfälle verbrennen.

(TRV) Thermische Reststoffverwertung: Verbrennungsanlagen die Reststoffe, Sied-

Gemeinde	Brennstoffwärmeleistung [MW]	Datenquelle
Wien, Simmering	45	[4]
Timelkam	49,7	[2]
Heiligenkreuz	43	[3]
Wien, Simmering	20	[4]
Wien, Simmering	20	[4]
Wien, Simmering	20	[4]
Bad Vöslau	1	[3]
Großwilfersdorf	2,4	[5]
Alt Lenzing	104	[6]
Forstviertel	25	[6]
Forstviertel	133	[6]
Berndorf	15	[6]
Stötten	48	[6]
Frantschach	61	[3]
Pitten	60	[6]
Hallein	30	[3]
Alt Lenzing	110	[4]
Niklasdorf	25	[4]
Gailitz	5	[4]
Wien, Simmering	65,7	[4]
St.Veit a. d. Glan	45	[4]
Linz	66	[7]
Fürnitz	2,8	[9]

Tabelle 2.1: Verzeichnis Österreichischer Wirbelschichtverbrennungsanlagen und ihre Brennstoffwärmeleistung

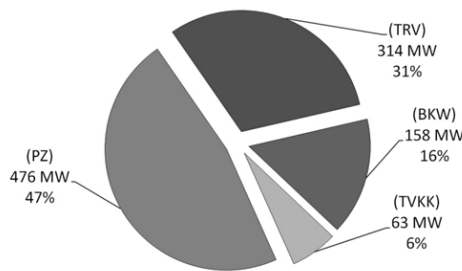


Abbildung 2.1: Summe und Anteil der installierten Brennstoffwärmeleistung durch Wirbelschichtverbrennungsanlagen der Papier- und Zellstoffindustrie (PZ), Thermische Reststoffverwertung (TRV), Biomassekraftwerke (BKW) und Thermische Verwertung Kommunaler Klärschlämme (TVKK) in Megawatt und Prozent. Stand 2011. [16]

lungsabfälle und Klärschlamm verwerten.

(BKW) Biomassekraftwerke: Anlagen die ausschließlich Biomasse feuern und nicht der (PZ) zuzuordnen sind.

(TVKK)) Thermische Verwertung Kommunaler Klärschlämme: Verbrennungsanlagen die ausschließlich kommunalen Klärschlamm verwerten.

Eine weitere Einteilung der Anlagen kann bezüglich der Unterscheidung von stationärer und extern zirkulierender Wirbelschicht-Technologie vorgenommen werden. Als Literaturquellen zur Unterscheidung können die der obigen Unterteilung herangezogen werden. Die Abgrenzung der beiden Technologien ist in Abbildung 1.1 illustriert.

- Stationäre Wirbelschicht-Verbrennung, beziehungsweise Bubbling Fluidized Bed Combustion (BFBC)
- Extern zirkulierende Wirbelschicht-Verbrennung, beziehungsweise Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC)

2.1 Ergebnisse der Kategorisierung

Die Ergebnisse der Kategorisierung, und die zeitlichen Entwicklungen dieser sind in Abbildung 2.1 und 2.2 dargestellt.

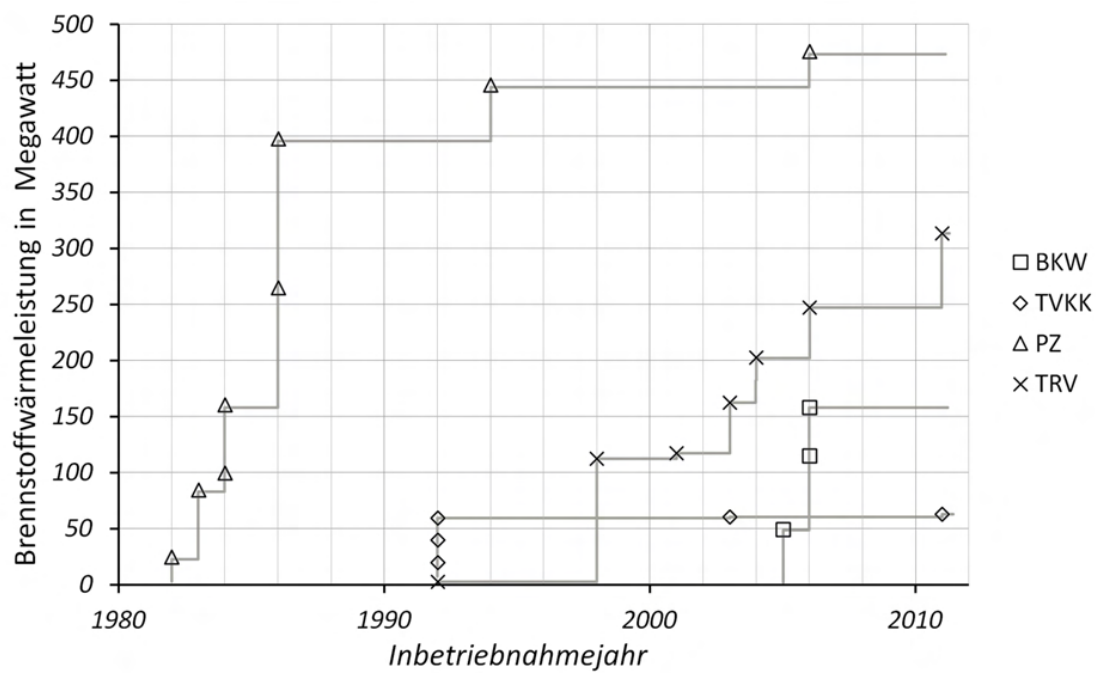


Abbildung 2.2: Summe der installierten Brennstoffwärmeleistung in Megawatt der Papier- und Zellstoffindustrie (PZ), Thermische Reststoffverwertung (TRV), Biomassekraftwerke (BKW) und Thermische Verwertung Kommunaler Klärschlämme (TVKK) von 1980 bis 2011. [16]

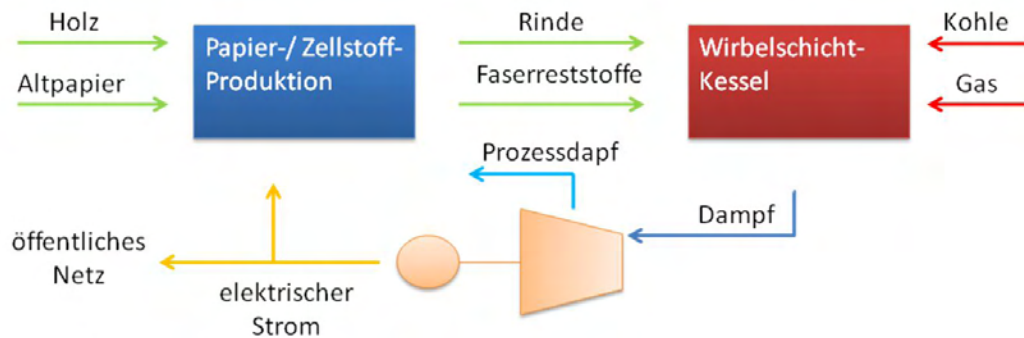


Abbildung 2.3: Vereinfachte Darstellung des Einsatzes einer Wirbelschichtverbrennung in Verbindung mit der Papier- und Zellstoffindustrie [11]

2.2 Papier- und Zellstoffindustrie (PZ)

Abbildung 2.1 und 2.2 zeigen deutlich, dass die Papier- und Zellstoffindustrie den größten Anteil an Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen, gemessen an der Brennstoffwärmeleistung, innehat. Der Großteil der Anlagen wurde in den Jahren zwischen 1982 und 1986 installiert, um den Energiebedarf der daran geknüpften Papier- und Zellstoffproduktionsstätten zu decken und Reststoffe aus den nahegelegenen Produktionsstätten zu verwerten. Die typische Brennstoffzusammensetzung dieser Anlagen besteht aus Kohle, Rinde, Holz, Papier und diversen Klärschlämmen [15]. Abbildung 2.3 zeigt prinzipiell wie eine Wirbelschicht Verbrennungsanlage in der Papier- und Zellstoffindustrie eingesetzt werden kann. Der Grund für den häufigen Einsatz von Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen ist mit der guten Eignung für das Umsetzen von niederkalorischen Brennstoffen zu erklären, da Rinde und Faserreststoffe häufig einen hohen Wassergehalt aufweisen. [16]

Aufgrund der damaligen Gesetzeslage und den damit verbundenen Emissionsgrenzwerten bestehen die Rauchgasreinigungsanlagen der Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen in der Papier- und Zellstoffindustrie meist aus einem oder mehreren Zügen, zur Schwerkraftabscheidung der Grobasche, und Gewebe- oder Elektrofiltern. Des Weiteren wurde meist bei der Errichtung eine Möglichkeit zur Zugabe von losem Kalkstein in die WS vorgesehen, damit, entsprechend der Brennstoffqualität, entstehendes SO_2 direkt in der Verbrennungszone gebunden werden kann. Auch trockene Rauchgasreinigungssysteme kommen bei vier der untersuchten acht Anlagen zum Einsatz [15]. Vor Ort konnte ermittelt werden, dass die zuletzt in Betrieb genommene Anlage zusätzlich über eine selektive nicht katalytische Reduktionsanlage (SNCR) verfügt. Der prinzipielle Aufbau der verwendeten Rauchgasreinigungsanlagen kann in Abbildung 2.4 eingesehen werden. [16]

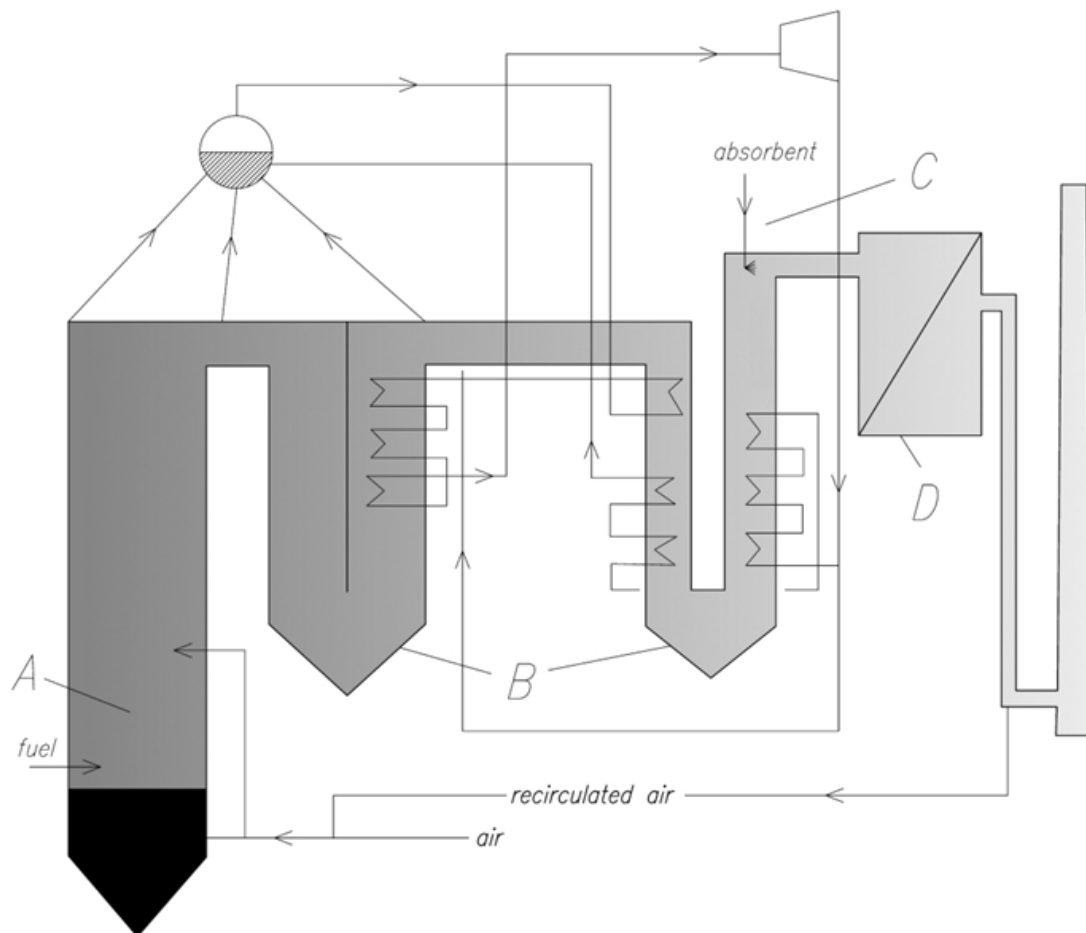


Abbildung 2.4: Prinzipieller Aufbau der Rauchgasreinigungsanlagen der untersuchten Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen der Papier- und Zellstoffindustrie. A) Wirbelschichtverbrennung B) Schwerkraftabscheider C) Trockene Rauchgasreinigung (optional) D) Elektro-, Gewebefilter oder Kombination. [16]

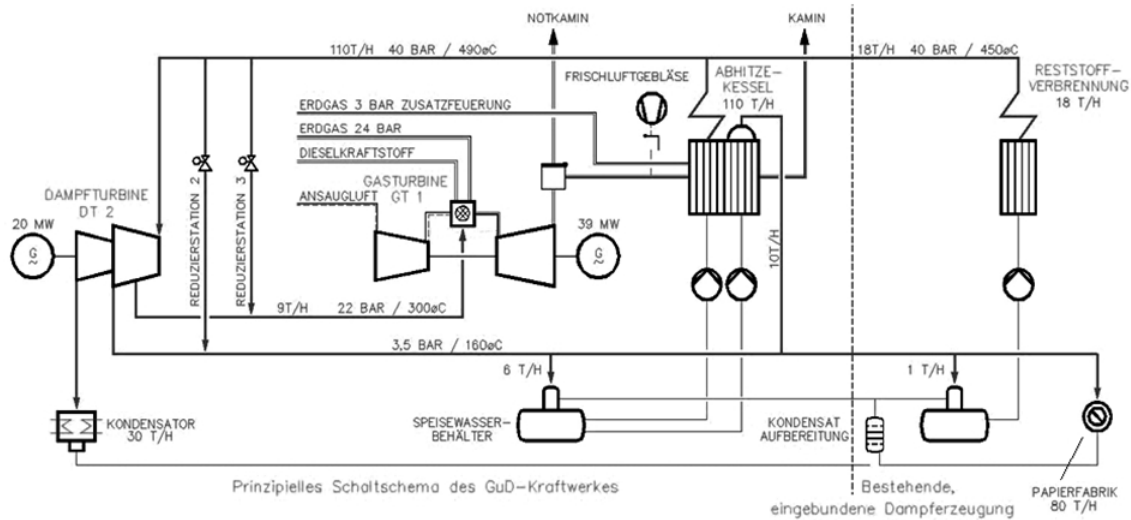


Abbildung 2.5: Schema der Energieversorgung der Beispielanlage der Papier- und Zellstoffindustrie.

2.2.1 Beispielanlage der Papier- und Zellstoffindustrie

Die Beispielanlage beschreibt eine reale Wirbelschicht-Verbrenungsanlage in Österreich die nach der Kategorisierung in Kapitel 2 der Papier- und Zellstoffindustrie zuzuordnen ist. Der in Abbildung 2.5 dargestellte Kessel mit der Beschriftung Reststoffverbrennung ist als Wirbelschicht-Kessel ausgeführt. Er erfüllt den Zweck faserartige Reststoffe des Altpapierrecyclings und Rinde zu verwerten und gleichzeitig Dampf zu erzeugen. Gelegentlich wird Kohle und Gas als Stützfeuer eingesetzt. Der Kessel hat eine Brennstoffwärmeleistung von rund 15 MW.

Brennstoffe und Brennstoffaufbereitung

- **Faserreststoffe:** In der Altpapierrecyclinganlage, die sich am Standort befindet, fällt Klärschlamm mit einem Trockengehalt von 3 bis 3,5 % an. Mit einer Siebbandpresse wird der Trockengehalt auf 16 bis 17 % erhöht und anschließend mit einer Schneckenpresse auf ca. 60 % gesteigert. Der entwässerte Klärschlamm wird in einem Vorlagebunker zwischengelagert. Für die Einbringung in die Brennkammer stehen zwei Wurfbeschicker ausschließlich für Klärschlamm zur Verfügung. Siehe Abbildung 2.6.
- **Rinde:** Am Standort wird vorwiegend Fichtenholz, das per LKW in Form von Rundholz, angeliefert wird verarbeitet. Am Standort befindet sich eine Ent-rindungsanlage. Mit einem Scheibensichter werden Grobteile abgetrennt und mit einer Hammermühle zerkleinert. Anschließend wird der gesamte Rindenstoffstrom in einer Presse entwässert. Die Rinde mit einem Trockengehalt von



Abbildung 2.6: Entwässertes Klärschlamm aus der Altpapierrecyclinganlage

etwa 42 % gelangt über einen eigenen Wurfbeschicker in die Brennkammer. Siehe Abbildung 2.7.

- **Erdgas** wird nahezu ausschließlich für das Anfahren des Wirbelschichtkessels verwendet.
- **Kohle** wird zur Aufrechterhaltung der Temperatur in der Brennkammer eingesetzt. Es ist ein zusätzlicher Wurfbeschicker ausschließlich für Kohle installiert.

Die **Brennstoffzusammensetzung** bzw. der Brennstoffverbrauch kann Tabelle 2.2 entnommen und in Abbildung 2.8 eingesehen werden.

Art	Verbrauch	Heizwert	Aschegehalt	Trockengehalt
Faserreststoffe	77.000 t/a	3,8 - 4,5 MJ/kg	55 %	60 %
Rinde	12.000 t/a	5 - 6 MJ/kg	5 %	42 %
Kohle	200 t/a	28 *	2 - 3*	1 % *
Gas	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.

Tabelle 2.2: Brennstoffeinsatz des Beispiel-Wirbelschichtkessels der Papier- und Zellstoffindustrie. Gas wird nur für den Anfahrbetrieb benötigt. *) Annahme

Tabelle 2.2 und Abbildung 2.8 ist zu entnehmen, dass der Kessel vorwiegend mit Faserreststoffen betrieben wird.

Kessel

Abbildung 2.9 zeigt die Bauform des Kessels. Der Kessel verfügt über einen offenen Düsenboden in Hirschgeweih-Ausführung. Zur primären Minderung der Stickoxidbildung ist die Möglichkeit zur Luftstufung gegeben. Die Betttemperatur beträgt



Abbildung 2.7: Rindenpresse

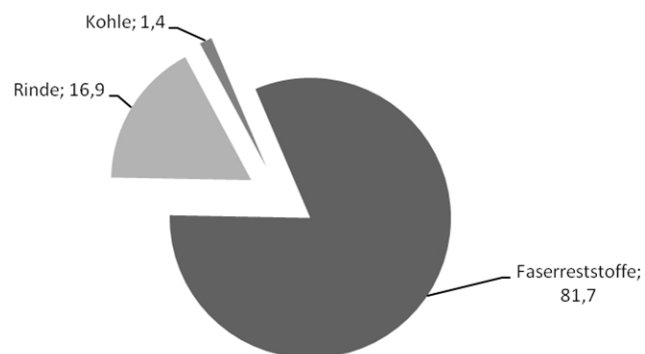


Abbildung 2.8: Brennstoffzusammensetzung der Beispiel-Wirbelschicht-Verbrennungsanlage der Papier- und Zellstoffindustrie gewichtet nach dem kalorischen Wert des Brennstoffes in Prozent.

etwa 750 - 800°C die Temperatur vor dem ersten Überhitzer beträgt etwa 880 - 900°C.

Bettmaterial

Als Bettmaterial kommt Quarzsand zum Einsatz. Im Stillstand ist der Kessel bis zur Höhe der Betttemperaturmessung 2, siehe Abbildung 2.9, mit Sand gefüllt. In Anlehnung an die bekannte Formel für den Kegelstumpf (2.1) und einer angenommenen Schüttdichte des Bettmaterials kann die Masse des Bettmaterials im Kessel, von 83 Tonnen bestimmt werden.

$$V = h \frac{\pi}{3} (R^2 + R + r^2) \quad (2.1)$$

V	Volumen	m^3
h	Höhe	m
R, r	Radien	m

Abbildung 2.10 können die relevanten Korngrößenverteilungen der Flugasche und des ungebrauchten Bettsandes entnommen werden.

Rauchgasreinigung und Emissionen

Die Rauchgasreinigungsanlage der Beispiel-Wirbelschicht-Verbrennungsanlage kann prinzipiell in Abbildung 2.4 eingesehen werden. Mit dem Unterschied, dass die Emissionsgrenzwerte, siehe Tabelle 2.3, auch ohne einer trockenen Rauchgasreinigung eingehalten werden können. Die Rauchgasreinigungsanlage besteht aus einem Elektrofilter und einem nachgeschalteten Gewebefilter.

Schadstoff	Emissions-Konzentration [mg/Nm^3]	emittierte Fracht [t/a]	Grenzwert gem. Bescheid [mg/Nm^3](EM)	Grenzwert EG-K [mg/Nm^3] (HMW)
SO_2	7	3,8	100	1000
NO_x	298	159,9	300	k.A.
Staub	8,8	4,7	20	50
CO	4	2,2	50	250

Tabelle 2.3: Emissionsgrenzwerte für den Beispiel-Wirbelschichtkessel der Papier- und Zellstoffindustrie im Vergleich zum EG-K. Bezugssauerstoffgehalt 11 %, EM Einzelmessung (meist Halbstundenmittelwert), HMW Halbstundenmittelwert

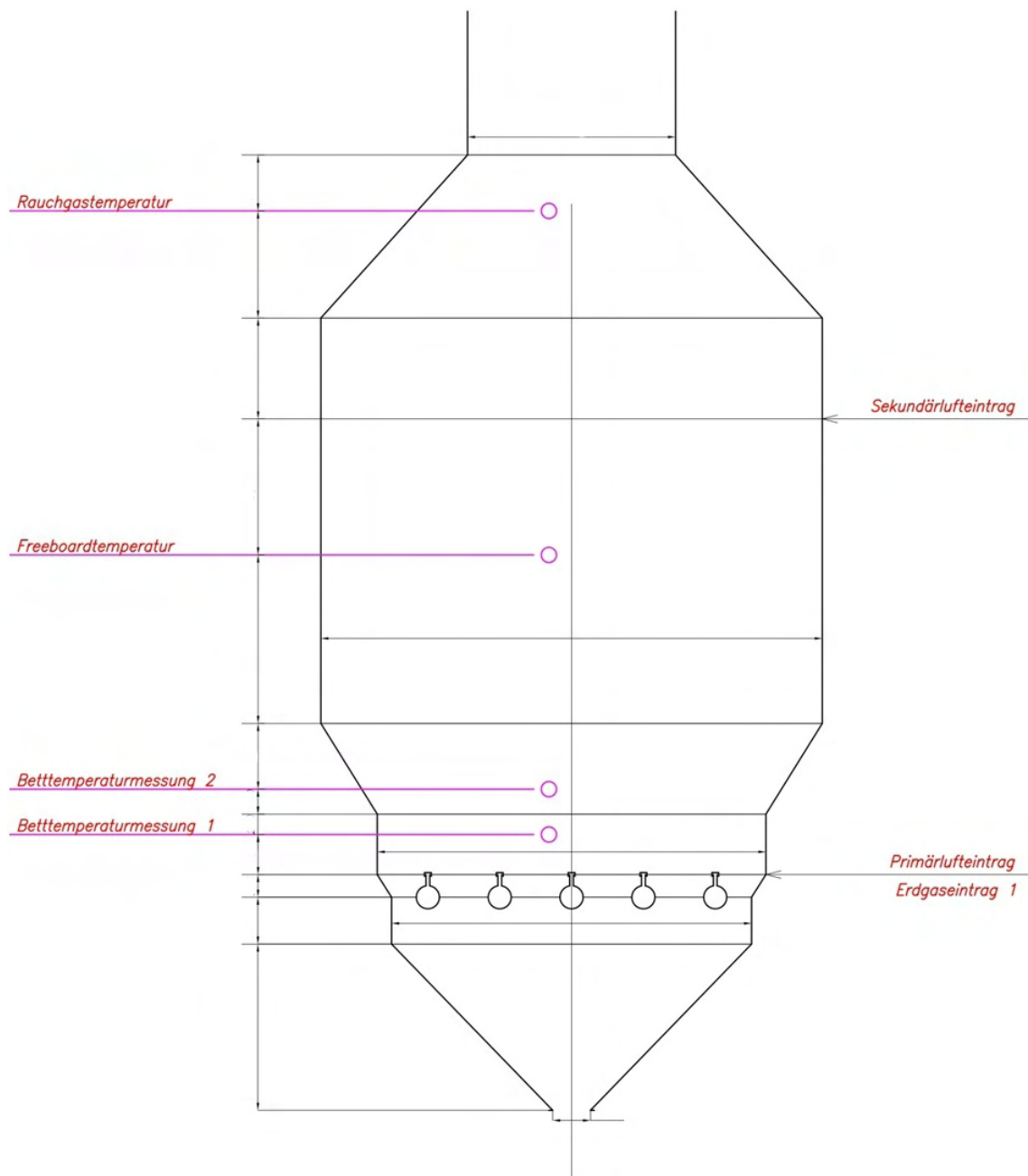


Abbildung 2.9: Schnittdarstellung des Beispielkessels der Papier- und Zellstoffindustrie mit rund 15 MW. Der größte innere Querschnitt des Kessels beträgt etwa 6,5 m

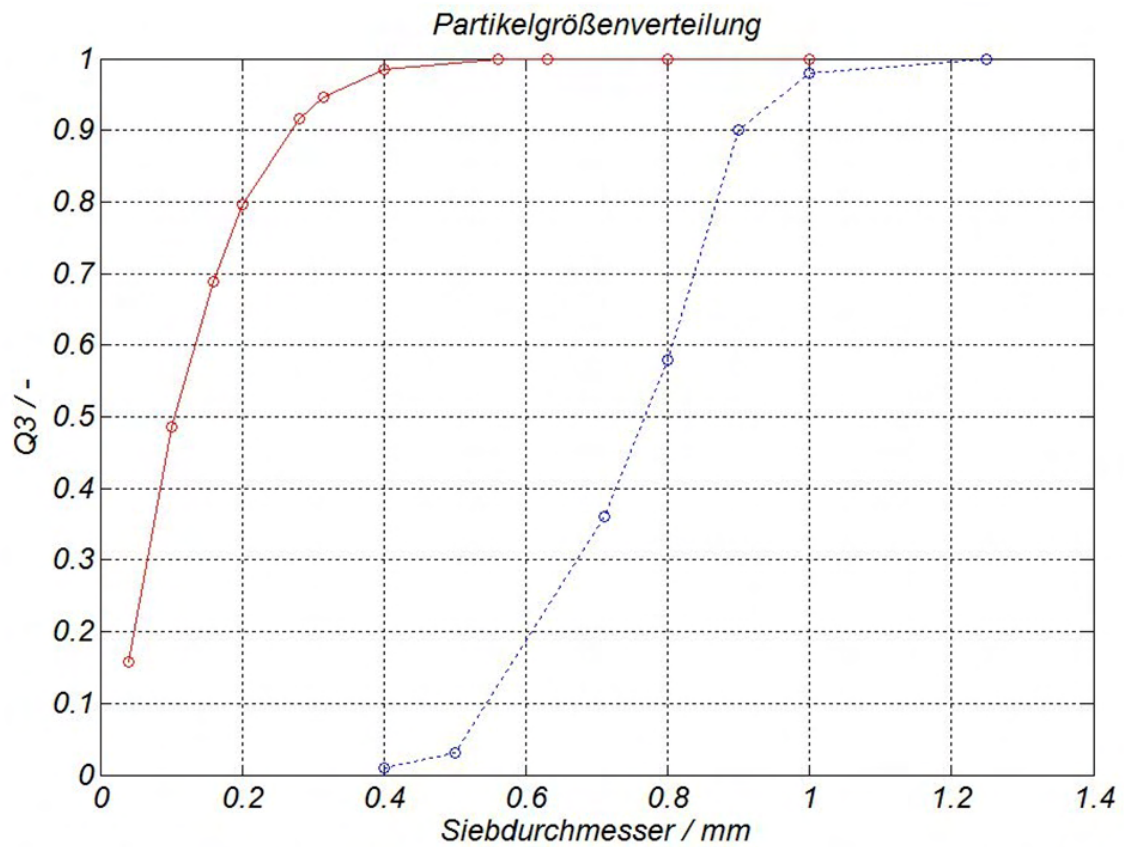


Abbildung 2.10: Partikelgrößenverteilung der Flugasche (rot, durchgehend), Probenahme bei durchschnittlichem Betrieb; und des ungebrauchten Bettsandes (blau, strichliert) der Beispiel-Wirbelschicht-verbrennungsanlage der Papier- und Zellstoff-industrie.

	Staub mg/m ³	C_{org} mg/m ³	SO₂ mg/m ³	NO_x mg/m ³	CO mg/m ³
Minimum	5 5	8 8	20 20	60 55	50 50
Maximum	10 10	10 10	50 50	200 150	100 50
Mittelwert a)	7,6 7,6	8,4 8,4	40,0 40,5	75,0 67,8	71,8 50,0

Abbildung 2.11: Emissionsgrenzwerte, bezogen auf 11 % Sauerstoffgehalt, von fünf untersuchten Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen der thermischen Reststoffverwertung, als Halbstunden- (erste Zeile) und Tagesmittelwert (zweite Zeile). Quelle: Amon [2], Stroß [14]. a) Gewichtung nach der Brennstoffwärmeleistung der Anlagen.

2.3 Thermische Reststoffverwertung (TRV)

Bis Ende 2011 wurden sieben Wirbelschichtverbrennungsanlagen, mit einer gesamten Brennstoffwärmeleistung von 314 MW, im Sektor TRV aufgezeichnet. Fünf davon, mit in Summe 266 MW Brennstoffwärmeleistung, konnten näher untersucht werden. Typische Brennstoffe der untersuchten Anlagen sind vorwiegend aufbereitete Siedlungsabfälle aus der mechanischen Abfallbehandlung und kommunale Klärschlämme. [16]

Abbildung 2.11 zeigt, dass für die Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen der thermischen Reststoffverwertung strenge Emissionsgrenzwerte gelten und es sei erwähnt, dass auf Grund der kurzen, halbstündlichen Mittelungszeiträume die Rauchgasreinigungsanlagen auf Spitzenlasten ausgelegt werden müssen. Da die aufwändigen Rauchgasreinigungsanlagen einen nicht außer Acht zu lassenden Teil der Investitionskosten einer thermischen Abfallbehandlungsanlage einnehmen, wird bei der Entscheidung zwischen den Verbrennungstechnologien der Vorteil der stabilen Betriebsbedingungen von Wirbelschichten, den [5] anmerkt, immer häufiger tragend. Im Jahr 2006 waren sechs Abfallverbrennungsanlagen in Planung. Davon waren drei Rostfeuerungen, zusammen mit einer Kapazität von 87 Tonnen Abfall je Stunde, und drei Wirbelschichtfeuerungen, zusammen mit einer Kapazität von 99 Tonnen Abfall je Stunde, wie in Böhmer [4] beschrieben wird. Abbildung 2.12 zeigt den prinzipiell-

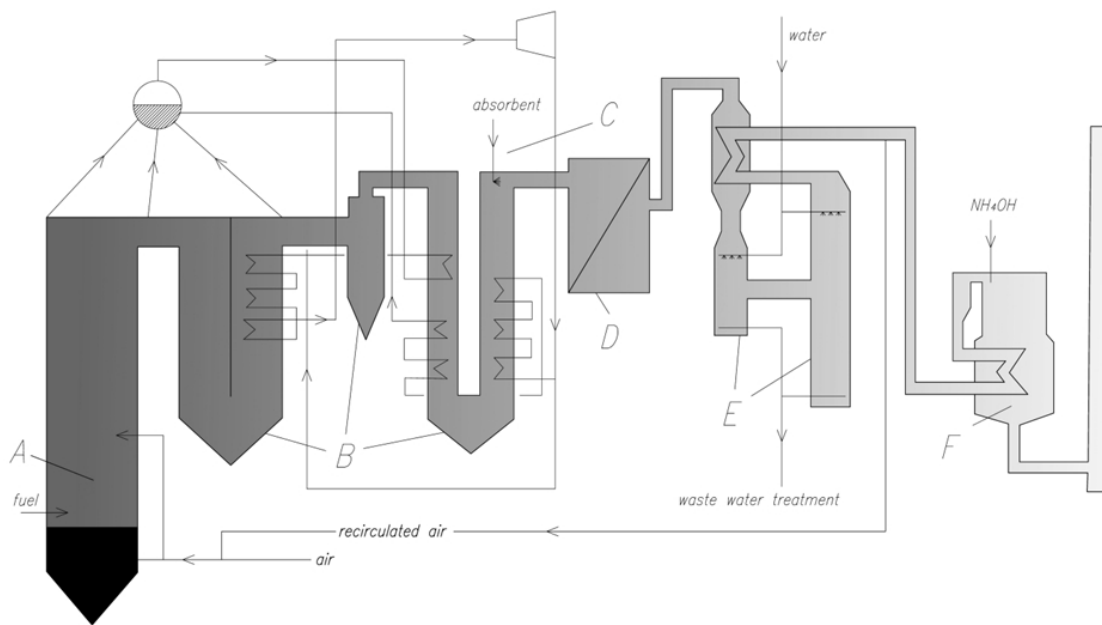


Abbildung 2.12: Prinzipieller Aufbau der Rauchgasreinigungsanlagen von vier der untersuchten Wirbelschichtverbrennungsanlagen der Kategorie Thermische Reststoffverwertung. A) Wirbelschichtverbrennung B) Schwerkraft- und optional Zentrifugalabscheider C) Trockene Rauchgasreinigung D) Elektrostatischer- oder Gewebefilter E) Nasswäscher F) Selektive Katalytische Reduktion (SCR) [16]

len Aufbau einer Rauchgasreinigungsanlage einer Wirbelschichtverbrennungsanlage der thermischen Reststoffverwertung. Böhmer [4] und Stroß [14] kann entnommen werden dass vier der untersuchten WS-Verbrennungsanlagen dem Schema in Abbildung 2.12 exakt folgen. Eine der untersuchten Anlagen hat anstelle der trockenen Rauchgasreinigung einen Aktivkohle-Festbettabsorber, wie in Krobath [10] abgebildet wird. [16]

2.3.1 Beispielanlage der Thermischen Reststoffverwertung [14]

Allgemein

Betreiber der Anlage ist die Linz Strom GmbH. Die Anlage ging im Herbst 2011 in Betrieb.

Anlagenzweck

Zweck der Anlage ist die ökologisch verträgliche und sichere Behandlung und Verwertung der regional anfallenden Klärschlämme und die Thermische Verwertung von

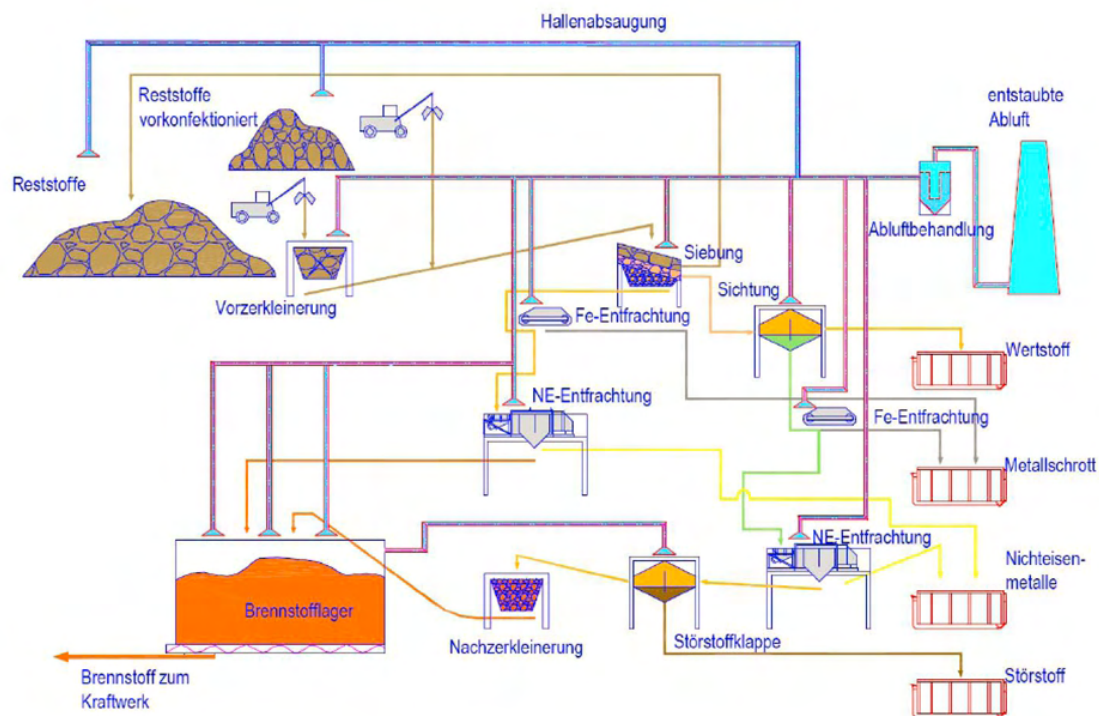


Abbildung 2.13: Mechanische Abfallaufbereitungsanlage des Reststoffheizkraftwerkes der Linz AG [14]

regional anfallenden Abfallfraktionen bei gleichzeitiger Brennstoffdiversifikation bei der Erzeugung von Strom und Fernwärme.

Brennstoffe und Brennstoffaufbereitung

Klärschlamm	50.000	t/a
Siedlungsabfälle	230.000	t/a

Die eingesetzten Brennstoffe sind kommunaler Klärschlamm, der per LKW angeliefert wird, und gemischte Siedlungsabfälle die vorwiegend per LKW, aber auch durch Schiff oder Bahn, angeliefert werden. Die Anlage verfügt über eine eigene mechanische Aufbereitungsanlage der gemischten Siedlungsabfälle. Ein vereinfachtes Fließbild der Aufbereitungsanlage kann in 2.13 eingesehen werden. Des Weiteren verfügt die Anlage über einen weiteren Vorlagebehälter aus dem direkt in die Verbrennungsanlage gefördert werden kann.

Die angelieferten Abfälle werden zuerst mit einem Vorzerkleinerer auf einen Nenn-durchmesser von 350 mm zerkleinert und anschließend mit einer Maschenweite von 80 mm gesiebt. Die zwei dabei entstehenden Stoffströme werden anschließend gesondert behandelt. Dem Stroffstrom, bestehend aus Material mit einem Siebdurchmesser von 0 bis 80 mm werden mit einem Eisenabscheider und anschließend mit



Abbildung 2.14: Rohrgurtt Förderer. Bild aufgenommen bei der Anlagenbesichtigung 2012

einem Nicht-Eisenabscheider metallische Störstoffe, beziehungsweise Wertstoffe, entzogen. Material mit dem Siebdurchmesser 80 bis 350 mm werden ebenfalls mit einem Eisen und einem Nicht-Eisenabscheider Stoffe entzogen, anschließend aber auch getrennt Störstoffe und heizwertreiche Fraktionen. Die heizwertreichen Fraktionen werden auf 20 mm nachzerkleinert. Beide Stoffströme werden wieder in einem Bunker gesammelt. Die Aufbereitungsanlage und die Verbrennungsanlage sind räumlich etwa 700 m voneinander getrennt. Der Transport der aufbereiteten Siedlungsabfälle zur Verbrennungsanlage wird mittels Rohrgurtt Förderer, siehe 2.14, durchgeführt. Die gesamte mechanische Aufbereitungsanlage ist eingehaust und zum Schutz der Umwelt mit einer Entlüftung versehen. Die Abluft wird gereinigt, teilweise als Verbrennungsluft genutzt und teilweise über einen Kamin in die Umwelt entlassen. Die Verbrennungsluft wird neben dem Rohrgurtt Förderer geführt. Entstehender Staub aus der Abluftreinigung wird ebenfalls über den Rohrgurtt Förderer der Verbrennung zugeführt.

Emissionsgrenzwerte

Tabelle 2.4 können die für das Reststoffheizkraftwerk Linz AG geltenden Emissionsgrenzwerte entnommen werden.

Kessel und Rauchgasreinigungsanlage

Der prinzipielle Aufbau der WWirbelschicht-Feuerung und der Abgasreinigungsanlage ist Abbildung 2.15 zu entnehmen. Die Anlage besteht aus einer stationären WS-Feuerung mit offenem Düsenboden. Das durch den offenen Düsenboden abgezogene Bettmaterial wird mittels Windsichter in Grobteile und Bettsand aufgeteilt.

Schadstoff	HMW	TMW	JMW
SO ₂	40	30	20
NO _x	60	55	50
Staub	5	5	5
CO	100	50	50
C-org	8	8	8
HCl	7	7	7
Hf	0,3	0,2	0,2
Hg	0,05	0,035	0,02

Tabelle 2.4: Emissionsgrenzwerte für das RHKW Linz AG in mg/m^3 bezogen auf 11% O₂ und Normbedingungen. HMW) Halbstunden-Mittelwert, TMW) Tagesmittelwert, JMW) Jahresmittelwert [14]

Die Grobteile mittels Containermulde entsorgt. An den Feuerraum angeschlossen sind zwei Leerzüge und ein Dackelzug zur Abscheidung der Grobasche. Nach dem Dackelzug gelangt das Rauchgas in vier Zyklone. Die Grobasche aus den Zyklonen, dem Dackelzug und den Leerzügen wird in den Silos gesammelt und per LKW, nach einer Befeuchtung, entsorgt. Nach den Zyklonen befindet sich ein ECO-Zug. Die darin anfallende Feinasche wird getrennt gesammelt und per Silo-LKW entsorgt. Die anschließende trockene Rauchgasreinigung besteht aus dem Eindüsen von HOK als Absorbens vor den Gewebefiltern. Die im Gewebefilter, bestehend aus sechs Kammern, anfallende Feinasche wird mit jener aus dem ECO-Zug gemeinsam gesammelt und entsorgt. Anschließend wird der Rauchgasstrom in zwei Nasswäschern weiter gereinigt. Der unter Zugabe von Kalkstein entstehende Gips wird in einer Zentrifuge abgetrennt und in der Baustoffindustrie weiter verarbeitet. Anfallende Abwässer werden in einer eigenen Abwasserbehandlungsanlage gereinigt und in die Donau entlassen. Der anfallende Neutralisationsschlamm extern entsorgt. Vor dem Eintritt in die Wäscher wird der Rauchgasstrom in einem Gas-Gas Wärmetauscher gekühlt und gleichzeitig beim Verlassen der Wäscher wieder erwärmt. Nach dem Gas-Gas Wärmetauscher befindet sich der Saugzug und nach dem Saugzug die SCR Anlage für die Rauchgasentstickung. Als Reduktionsmittel wird $NH_4(OH)$ und 25 prozentiger Ammoniak (NH_3) eingesetzt. Anschließend wird der Rauchgasstrom über den Kamin in die Umwelt entlassen.

2.4 Thermische Verwertung kommunaler Klärschlämme (TVKK)

Abbildung 2.2 zeigt, dass bis Ende 2011 fünf Anlagen in Betrieb genommen wurden die nahezu ausschließlich Klärschlamm verbrennen. Zwei der untersuchten Anlagen, erfüllen den Zweck dezentral kommunale Klärschlämme zu verwerten, haben je eine Brennstoffwärmeleistung unter drei Megawatt und werden in dieser Arbeit nicht

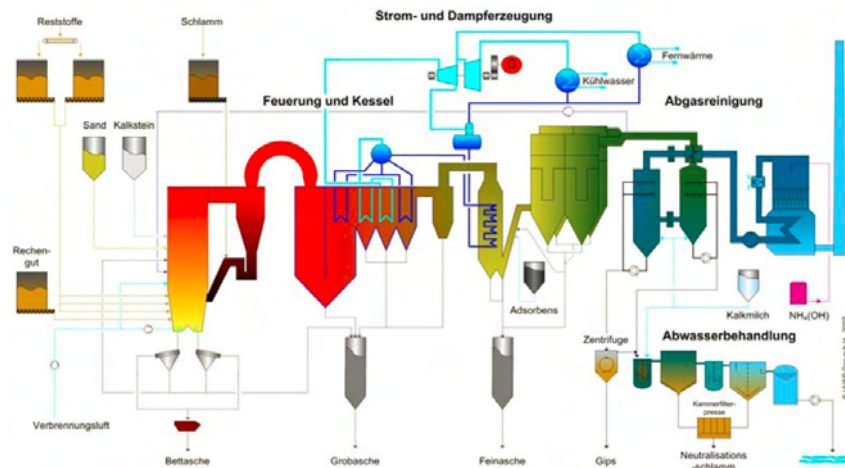


Abbildung 2.15: Vereinfachtes Verfahrensschema der Wirbelschichtverbrennungsanlage mit angeschlossener Rauchgasreinigungsanlage der Linz AG [14]

näher beschrieben. Die anderen drei Anlagen wurden nahezu zeitgleich in Betrieb genommen, sind fast baugleich und arbeiten alle am selben Standort, wie Böhmer [4] entnommen werden kann. Jede dieser Anlagen hat eine Brennstoffwärmeleistung von knapp 20 MW. Ihre Rauchgasreinigungsanlage ist jenen der TRV sehr ähnlich und kann prinzipiell auch in Abbildung 2.12 eingesehen werden. Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch darin, dass sich zwischen den Nasswäschern und der SCR-Anlage ein Aktivkohle-Festbettabsorber befindet und auf einen Flugstromabsorber verzichtet wird. [10], [4]

2.4.1 Beispielanlagen Simmering Wirbelschichtofen 1-3

[4]

Betreiber	Fernwärme Wien GmbH	
Inbetriebnahme	1980/1992	
Technologie	Stationäre Wirbelschicht	
Durchschnittlicher unterer Heizwert	15,7	MJ/kg _{TM}
Durchschnittlicher Brennwert	17,1	MJ/kg _{TM}
Brennstoffwärmeleistung in drei Linien	59,5	MW _{th}

Anlagenzweck

Die Wirbelschichtöfen der Fernwärme Wien GmbH befinden sich in unmittelbarer Nähe der Hauptkläranlage der Stadt Wien und verwerten fast ausschließlich dort anfallende Klärschlämme.

Brennstoff und Brennstoffaufbereitung

Als Brennstoffe werden überwiegend Klärschlämme der Hauptkläranlage Wien verbrannt. Ein Großteil des Klärschlammes wird über Pumpen zum Standort transferiert und anschließend mit Zentrifugen, Wärmetauscher und Merzeratoren entwässert. Der Rest wird extern bereits vorbehandelt und per LKW zum Standort gebracht. Der in den Ofen eingebrachte Klärschlamm hat einen Trockensubstanzgehalt von 0,30 bis 0,36. In Anlehnung an [8] können die Heiz- bzw. Brennwerte mit Berücksichtigung des Wassergehaltes umgerechnet werden.

B_{TM}	Brennwert des trockenen Brennstoffes	MJ/kg
B_{Bst}	Brennwert des Brennstoffes	MJ/kg
H_{TM}	Heizwert des trockenen Brennstoffes	MJ/kg
H_{Bst}	Heizwert des Brennstoffes	MJ/kg
w	Brennstoffbezogener Wassergehalt	-
t	Trockensubstanzgehalt	

$$w = 1 - t \quad (2.2)$$

$$B_{Bst} = B_{TM}(1 - w) \quad (2.3)$$

Aus der Definition des Brennwertes wird dieser durch den Wassergehalt lediglich verdünnt. Werden die Werte aus den allgemeinen Daten der Anlage Simmering Wirbelschicht-Öfen 1-3 eingesetzt so ergeben sich folgende Brennstoffkennwerte.

B_{TM}	15,7	MJ/kg
t	0,3 bis 0,36	-
w	0,64 bis 0,7	-
B_{Bst}	5,13 bis 6,16	MJ/kg

$$H = B - \mu_t \cdot \Delta h \quad (2.4)$$

Δh Verdampfungswärme des Wassers bei
Standardumgebungsbedingungen (25°C und 1 bar) 2,44 MJ/kg

μ_t Auf den trockenen Brennstoff bezogener Wassergehalt in den Rauchgasen

Mit Gleichung 2.1 kann errechnet werden, dass für den trockenen Brennstoff der WS-Öfen 1-3 der Fernwärme Wien GmbH, ein brennstoffbezogener Wassergehalt in den Rauchgasen von 0,57 entsteht.

$$15,1 = 17,1 - \mu_t \cdot 2,44 \quad (2.5)$$

$$\mu_t = 0,57 \text{ kg/kg}_{\text{trockener Brennstoff}} \quad (2.6)$$

Wird die Feuchte des Brennstoffes berücksichtigt, so muss der Wasseranteil, der bei der Verbrennung des trockenen Brennstoffs entsteht, mit dem Anteil der Trockenmasse multipliziert werden und der Wasseranteil des Brennstoffes addiert werden.

μ_f Auf den feuchten Brennstoff bezogener Wassergehalt in den Rauchgasen

$$\mu_f = (\mu_t \cdot t) + w \quad (2.7)$$

$$\mu_f = 0,57 \begin{pmatrix} 0,3 \\ 0,36 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0,7 \\ 0,64 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,871 \\ 0,845 \end{pmatrix} kg/kg \quad (2.8)$$

Für den feuchten Brennstoff der oben genannten Wirbelschicht-Öfen ergibt sich damit ein Wassergehalt von 0,845 bis 0,871 kg Wasser je kg feuchtem Brennstoff.

$$H_{Bst} = B_{Bst} - \mu_f \cdot \Delta h \quad (2.9)$$

$$H_{Bst} = \begin{pmatrix} 5,13 \\ 6,16 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0,871 \\ 0,845 \end{pmatrix} 2,44 = \begin{pmatrix} 3 \\ 4,1 \end{pmatrix} MJ/kg \quad (2.10)$$

Abbildung 2.16 können die Mengen der behandelten Abfälle in den Jahren 2002 bis 2005 eingesehen werden. Im Jahr 2005 wurden 1.003 Tonnen Heizöl leicht und 10.406 Tonnen Heizöl Schwer als Anfahr- und Stützbrennstoff benötigt, was bei den niedrigen Heizwerten des feuchten Brennstoffes plausibel erscheint.

[4] gibt für die Anlagenverfügbarkeit 22.511 Stunden pro Jahr also 7504 Stunden pro Jahr und Ofen an. Damit errechnet sich eine mittlere Brennstoffwärmeleistung von 13,6 MW.

$$\frac{1.102.758 \cdot 1000 MJ}{22.511 \cdot 3600 s} = 13,6 MW \quad (2.11)$$

Feuerung und Abhitzeessel

Die Wirbelschicht-Öfen 1-3 sind als stationäre Wirbelschichtfeuerungen mit einer Betttemperatur von etwa 750°C ausgeführt. Die Möglichkeit einer Luftvorwärmung ist mittels Dampf-Luftvorwärmer und mittels Heizöl betriebenen Ölbrenner möglich. Die Abwärme der Kessel wird zur Erzeugung eines Dampfes mit 53 bar benutzt. Auch eine Kraft-Wärme Kopplung ist realisiert und die Abwärme wird im Wiener Fernwärmenetz genutzt.

Rauchgasreinigungsanlage

Die Rauchgasreinigungsanlagen der Wirbelschicht-Öfen 1-3 bestehen aus Schwerkraftabscheidern, in welchen gleichzeitig die Wärmetauscher zum Wärmerückgewinn

Abfälle (t/a)	2002	2003	2004	2005
Überschussschlamm aus der biologischen Abwasserbehandlung	176.230	159.259	156.043	168.478
anaerob stabilisierter Schlamm (Faulschlamm)	0	0	1.544	6.323
sonstige rohölverunreinigte Rückstände aus der Erdölförderung	0	39	0	1.149
Schlamm aus der biologischen Abwasserbehandlung der Zellstoff- und Papierherstellung	0	0	0	817
aerob stabilisierter Schlamm	0	0	0	501
Schlamm aus Öltrennanlagen	0	0	0	333
Schlamm aus der Tankreinigung	0	8	0	255
Futtermittel	7.953	5.307	169	0
Desinfizierte Abfälle, außer gefährliche Abfälle	13.707	13.779	1.499	0
Rest	8	51	772	241
Summe	197.898	178.443	160.027	178.097

Abbildung 2.16: Übersicht über die in den Wirbelschicht-Öfen 1-3 der Fernwärme Wien GmbH behandelten Abfälle von 2002 bis 2005. Im Jahr 2005 wurden als Anfahr- und Stützbrennstoff 1.003 t Heizöl leicht eingesetzt, zusätzlich wurden 10.406 t Heizöl schwer verbrannt. [4]

Brennstoff	H MJ/kg	Menge Tonnen	Energieeintrag GJ
Klärschlamm WSO 1-3	3,0 bis 4,1 ²	178.097	632.244
Heizöl Leicht	42,7 [Strauß 18]	1.003	42.828
Heizöl	41,1 [Strauß 18]	10.406	427.686
Summe		189.506	1.102.758

Abbildung 2.17: Übersicht über die eingesetzten Brennstoffe in den Wirbelschicht-Öfen 1-3 der Fernwärme Wien GmbH im Jahr 2005

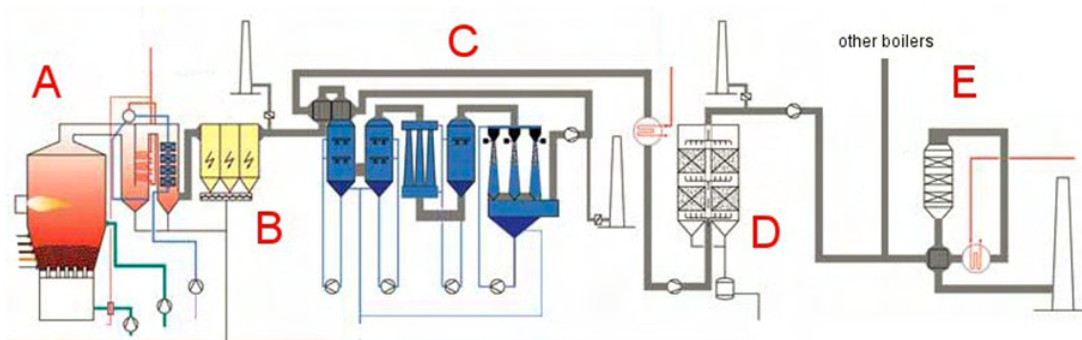


Abbildung 2.18: Verfahrensschema der einzelnen Wirbelschichtöfen 1-3 der Fernwärmen Wien GmbH. [10]- modifiziert A) Stationäre Wirbelschichtfeuerung, B) Elektrofilter C) Nasswäsche D) AktivkoksfILTER E) Selektive Katalytische Reduktion

untergebracht sind, Elektrofiltern, Rauchgaswäschern, AktivkoksfILTERn und selektiven katalytischen reduktions systemen. Siehe Abbildung 2.18.

Elektrofilter: Nach den Leerzügen zur Schwerkraftabscheidung der Grobasche werden die Staubemissionen auf $10\text{-}30\text{ mg/Nm}^3$ gesenkt. [4]

Rauchgaswäsche: Saure, leicht wasserlösliche Gase sowie Staub- und Schwermetallanteile werden in zwei Kreuzstromwäscher ausgewaschen. Nachfolgend wird ein filternder Venturiwäscher zur Feinstaubabscheidung und Vorkonditionierung eingesetzt. Das Ende der Rauchgaswäsche bildet ein elektrodynamischer Venturiwäscher. [4]

AktivkoksfILTER: Zur Nachreinigung werden die Rauchgase für jede Linie getrennt einer Aktivkoks-Gegenstromanlage zugeführt, die aus parallel angeordneten, mit Braunkohle-Herdofenkoks gefüllten Modulen besteht. Die Adsorber für die Wirbelschichtreaktoren bestehen aus je vier Modulen, wobei jedes Modul mit 15 t Adsorbens befüllt ist. Das Abgas durchströmt die Schicht von unten nach oben, während der Koks langsam abgesenkt wird. [4]

SCR: Die letzte Stufe der Rauchgasreinigung besteht aus einer 2006 in Betrieb genommenen DeNOx-Anlage mit einer Kapazität von $300.000\text{ Nm}^3/\text{h}$ die neben den gesammelten Abgasen der drei WS-Öfen auch die Abgase von zwei Drehrohröfen und eines vierten WS-Ofens der Fernwärme Wien GmbH von Stickoxiden befreit. [4]

Das mittels Wärmeverschiebesystem und Dampfaufheizung auf eine Betriebstemperatur der DeNOx-Anlage von 180 °C gebrachte Rauchgas wird mit eingedüstem Ammoniakwasser gemischt und durch drei aus keramischen Wabenkatalysatoren aufgebauten Katalysatorlagen geleitet. [4]

Die Stickoxidemissionen werden bei einem Rohgaswert von 350 mg/Nm^3 am Eintritt der Sammel-DeNOx-Anlage auf einen Reingaswert am Kamin von ca. 20 mg/Nm^3 verringert. [4]

In Abbildung 2.19 können die Emissionsgrenzwerte und Emissionsmesswerte der Wirbelschicht-Öfen 1-3 eingesehen werden.

Luftverunreinigende Schadstoffe	Einheit	Art des Mess- werts	Grenzwert lt. Bescheid	Messwerte im Reingas
		(Normbedingungen, 11 % O ₂) ¹⁾		
Staubförmige Emissionen	mg/Nm ³	TMW	10	0,2
C _{org}	mg/Nm ³	TMW	10	0,2
Chlorwasserstoff HCl	mg/Nm ³	TMW	10	0,2
Fluorwasserstoff HF	mg/Nm ³	TMW	–	–
Schwefeldioxid SO ₂	mg/Nm ³	TMW	50	0,7
Stickstoffoxide als NO ₂ ²⁾	mg/Nm ³	TMW	150	58,4
Kohlenstoffmonoxid CO	mg/Nm ³	TMW	50	9,9
Staubförmige Emissionen	mg/Nm ³	HMW	10	0,2
C _{org}	mg/Nm ³	HMW	10	0,3
Chlorwasserstoff HCl	mg/Nm ³	HMW	10	0,3
Fluorwasserstoff HF	mg/Nm ³	HMW	0,1	< 0,1
Schwefeldioxid SO ₂	mg/Nm ³	HMW	50	0,8
Stickstoffoxide als NO ₂ ²⁾	mg/Nm ³	HMW	150	80
Kohlenstoffmonoxid CO	mg/Nm ³	HMW	100	11
Quecksilber und seine Verbindungen, als Hg	mg/Nm ³	MW 0,5–8 h	0,05	< 0,001
Cadmium und seine Verbindungen, als Cd	mg/Nm ³	MW 0,5–8 h	0,05	< 0,002
Thallium und seine Verbindungen, als Tl	mg/Nm ³	MW 0,5–8 h		
Summe Sb+As+Pb+Cr+Co+ +Cu+Mn+Ni+V+Sn und ihre Verbindungen, als Elemente	mg/Nm ³	MW 0,5–8 h	0,5	< 0,01
Ammoniak NH ₃	mg/Nm ³	MW 0,5–8 h	–	< 1,6
Dioxine und Furane (I-TEF)	ng/Nm ³	MW 6–8 h	0,1	0,0026

¹⁾ Bei Einsatz von gefährlichen Abfällen erfolgt eine Umrechnung der Emissionen, sofern der O₂-Gehalt im Rauchgas mehr als 11 % beträgt.

²⁾ Ab 28.12.2005 gilt ein Grenzwert von 100 mg/Nm³ (HMW), bzw. von 70 mg/Nm³ (TMW).

Abbildung 2.19: Luftemissionen der Wirbelschichtöfen 1-3 und der Drehrohröfen 1 - 2 der Fernwärme Wien GmbH für das Referenzjahr 2005. (Anm.: vor Inbetriebnahme der Sammel-DeNO_x-Anlage) [4]

2.5 Biomassekraftwerke (BKW)

Wie Abbildung 2.2 zeigt, wurden in den Jahren 2005 und 2006 drei Biomassekraftwerke, die zusammen eine Brennstoffwärmeleistung von 158 MW haben, in Betrieb genommen. Zwei dieser Anlagen, gemeinsam haben sie eine Brennstoffwärmeleistung von 115 MW, konnten näher untersucht werden. Beide Anlagen haben ein sehr ähnliches, in Abbildung 2.20 dargestelltes, Konzept der Rauchgasreinigung. Der einzige Unterschied besteht darin, dass nur eine der Anlagen über eine SCR-Anlage in high-dust Schaltung verfügt. Der auffälligste Unterschied zu den Rauchgasanlagen der thermischen Reststoffverwertung ist das Fehlen von Nasswäschern, was auf dem niedrigen Schwefelgehalt des eingesetzten Brennstoffes, in Anlehnung an [13], beruht. Auf SCR-Anlagen in Reingassschaltung wird verzichtet.

2.5.1 Beispielanlage Biomassekraftwerk Timelkam

Allgemein

[7]

Erstbetrieb	2005	
Betreiber	Energie AG Oberösterreich	
Brennstoffwärmeleistung	50	MW _{th}
Erzeugte Dampfmenge	56	t/h
Frischdampf Temperatur	440	°C
Frischdampfdruck	42	bar
Elektrische Leistung	15 (max.)	MW _{el}
Fernwärmeleistung	15 (max.)	MW _{th}
Stromerzeugung (netto)	ca. 95	GWh/a
Jährliche Brennstoffmenge	115.000	t/a
Anlagenverfügbarkeit	ca. 8.000	h/a

Anlagenzweck

Das Technische Konzept umfasst ein Biomasse-Heizkraftwerk mit stationärem Wirbelschichtkessel und Nutzung einer bestehenden Dampfturbine. Durch den ganzjährigen Einsatz von CO₂-neutralen Biomassebrennstoffen werden aus dem Biomassekraftwerk jährlich ca. 95 GWh elektrische Energie in das Stromnetz eingespeist und etwa 88 GWh thermische Energie in Form von Fernwärme an das bestehende Fernwärmenetz abgegeben. Rund 26.000 oberösterreichische Haushalte können damit jährlich mit sauberem Ökostrom versorgt und der Wärmebedarf von ca. 5.800 Haushalten mit CO₂-neutraler Fernwärme gedeckt werden. Als Brennstoff werden heimisches Holz und Holzreststoffe aus der Land- und Forstwirtschaft sowie industrielle Holznebenprodukte (Rinde, Sägespäne,

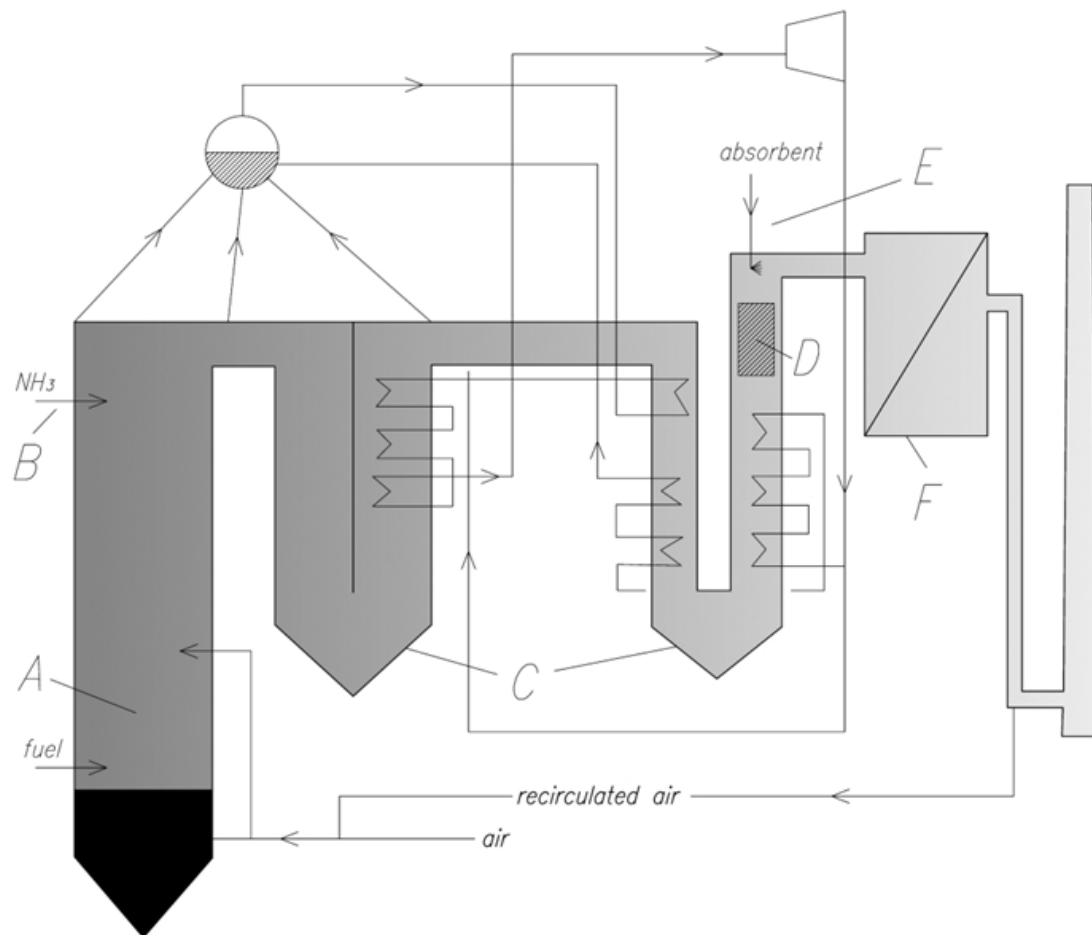


Abbildung 2.20: Prinzipieller Aufbau der Rauchgasreinigungsanlagen der zwei untersuchten Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen der Kategorie Biomassekraftwerke. A) Wirbelschichtverbrennung B) Selektive Nicht Katalytische Reduktion (SNCR) C) Schwerkraftabscheider D) Selektive Katalytische Reduktion in high-dust Schaltung (SCR), optional E) Trockene Rauchgasreinigung F) Gewebefilter



Abbildung 2.21: (links) Bunker für die zerkleinerten Alt- und Restholzbrennstoffe. (rechts) Brennstoffaufbereitung.

Schleifstaub,...) und Altholz (Dachstuhlholz, Kisten, Paletten,..) eingesetzt.

[7]

Brennstoffe und Brennstoffaufbereitung

Die Biomasseanlage ist auf den in Tabelle 2.5 aufgelisteten Brennstoffbedarf ausgelegt.

Sägenebenprodukte (Rinde, Sägespäne)	75.000	t/a
Altholz	28.000	t/a
Schleifstaub	7.000	t/a
Waldhackgut	5.000	t/a
Summe	115.000	t/a

Tabelle 2.5: Auslegungs-Brennstoffbedarf der Biomasseanlage Timelkam mit der Annahme von 30 % Wassergehalt [12]

Noch vor Inbetriebnahme wurden bis zu zehnjährige Lieferverträge über biogene Brennstoffe mit einem Fixpreis bis 2007 und danach mit einer Anpassung nach öffentlichen Indizes abgeschlossen. Die Abrechnung erfolgt über den Energiegehalt der angelieferten Brennstoffe. Die folgenden Abbildungen 2.21 bis 2.24 zeigen Teile der Brennstoffaufbereitung und Brennstofflagerung.



Abbildung 2.22: Rückstände aus der Nichteisenabscheidung aus der Brennstoffaufbereitungsanlage der Biomasseanlage Timelkam.



Abbildung 2.23: Eisenabscheider der Brennstoffaufbereitungsanlage der Biomasseanlage Timelkam



Abbildung 2.24: Rückstände aus der Eisenabscheidung der Brennstoffaufbereitungsanlage der Biomasseanlage Timelkam

2.6 Stationäre und extern zirkulierende Technologien

In Abbildung 1.1 ist der Unterschied zwischen stationären und extern zirkulierenden Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen illustriert.

Werden die untersuchten WS-Verbrennungsanlagen in Anlehnung an Abbildung 1.1 in stationäre- und extern zirkulierende Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen eingeteilt, so kann in Abbildung 2.25 eingesehen werden dass 52 % der installierten Brennstoffwärmeleistung von Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen mit extern zirkulierenden und 48 % mit stationären Wirbelschichten bereitgestellt werden.

Im Gegensatz zur Brennstoffwärmeleistung, die auf die beiden Technologien fast zu gleichen Teilen aufgeteilt ist, verteilt sich die Anzahl der stationären Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen zu den extern zirkulierenden Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen etwa im Verhältnis siebenzig zu dreißig. Siehe Abbildung 2.26.

Werden die Abbildungen 2.25 und 2.26 gemeinsam betrachtet, kann daraus geschlossen werden, dass zirkulierende WS-Verbrennungsanlagen tendenziell eine höhere Brennstoffwärmeleistung aufweisen. Abbildung 2.27 bestätigt diesen Sachverhalt.

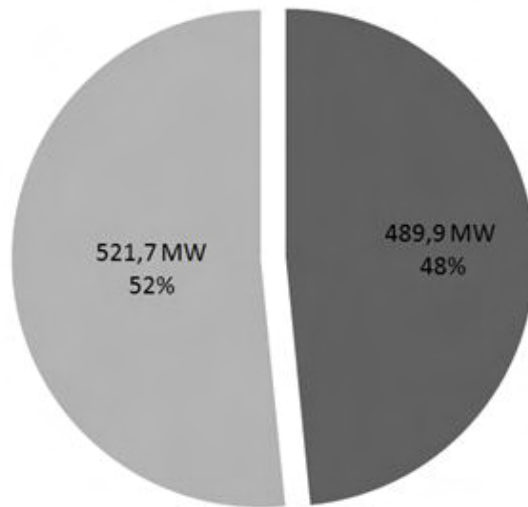


Abbildung 2.25: Installierte Brennstoffwärmeleistung der untersuchten stationären (rechts) und extern zirkulierenden (links) Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen in Megawatt.

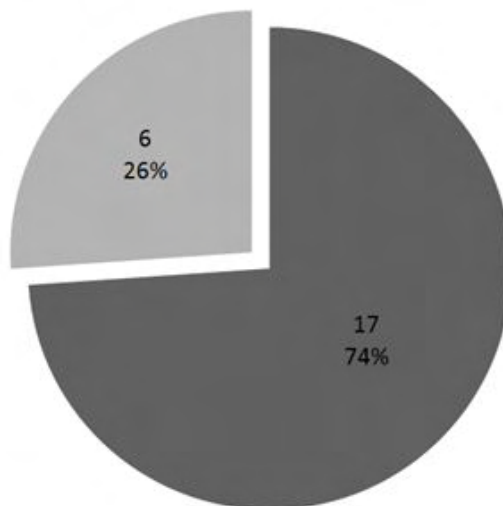


Abbildung 2.26: Anzahl der untersuchten stationären (rechts unten) und extern zirkulierenden (links oben) Wirbelschicht- Verbrennungsanlagen

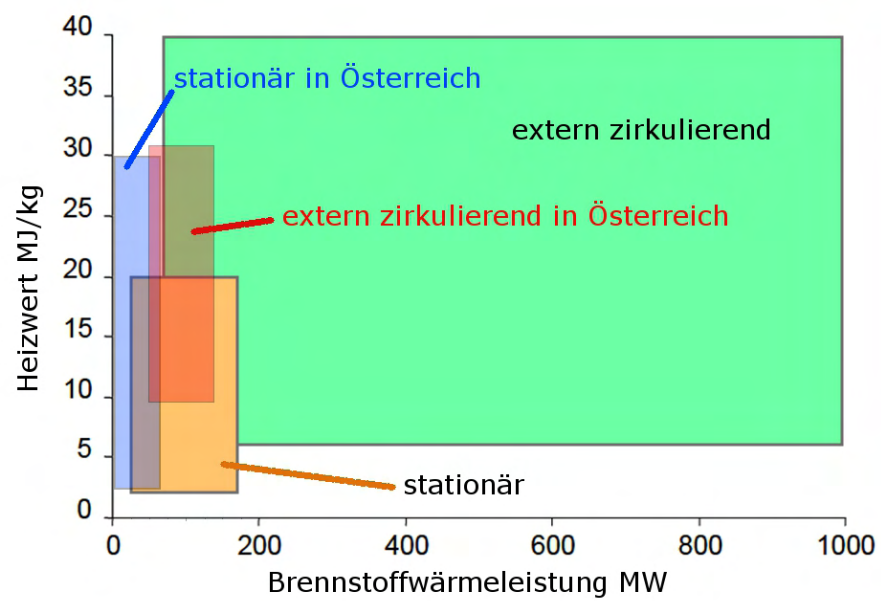


Abbildung 2.27: Einsatzbereiche von stationären und extern zirkulierenden Wirbelschichtverbrennungsanlagen. [18]-modifiziert

Kapitel 3

Zusammenfassung

[16]

Im Zuge der Erhebungen des Statusberichts der Wirbelschichttechnologie in Österreich, der Internationalen Energie Agentur, konnten 23 Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen untersucht werden und in vier Kategorien, Papier- und Zellstoffindustrie (PZ), Thermische Reststoffverwertung (TRV), Biomassekraftwerke (BKW) und Thermische Verwertung Kommunaler Klärschlämme (TVKK), eingeteilt werden. Jede Kategorie zeigt ein für sich typisches Konzept der Rauchgasreinigung. Mit Ausnahme von zwei kleineren Anlagen zur dezentralen Verbrennung von Klärschlämmen werden in den Kategorien Thermische Verwertung Kommunaler Klärschlämme und Thermische Reststoffverwertung, abgesehen von gravimetrischen Abscheidern, Elektro- oder Gewebefiltern und trockenen Rauchgasreinigungsanlagen, Nasswäscher und SCR-Anlagen in Reingas-Schaltung eingesetzt. Die Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen der Kategorien Biomassekraftwerke und Papier- und Zellstoffindustrie verwenden neben gravimetrischen Abscheidern und Elektro- oder Gewebefiltern teilweise trockene Rauchgasreinigungsanlagen und teilweise SNCR-Anlagen. Eines der untersuchten Biomassekraftwerke verfügt über eine SCR Anlage in high-dust Schaltung.

Literaturverzeichnis

- [1] Fischer A. *Biomassekraftwerk Wien*. IC Group, Vortrag, 2005.
- [2] Grech H. Amon M. *Bericht des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft über Verbrennungs- und Mitverbrennungsanlagen gemäß §18 AVV, Berichtszeitraum 2009*. Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft, Wien, 2011.
- [3] Bacher B. *Telefonische Mitteilung des Anlagenbetreibers*. Villas Energie GmbH, Februar 2012.
- [4] Kügler I. Böhmer S. *Abfallverbrennung in Österreich Statusbericht 2006*. Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2007.
- [5] Vamvuka D. *Overview on Solid Fuel Combustion Technologies*. Handbook of Combustion, Vol 4. Solid Fuels, Wiley VCH, Weinheim 2012.
- [6] TBU Stubenvoll GmbH. *Referenzen Wirbelschichtfeuerung*. www.tbu.at, 25.05.2012.
- [7] Walzl J. *Umwelterklärung für das Kraftwerk Timelkam*. Energie AG Oberösterreich Kraftwerke Oberösterreich GmbH, Linz, 2011.
- [8] Strauß K. *Kraftwerkstechnik zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativer Energiequellen, 6. Auflage*. Springer, Heidelberg, 2009.
- [9] Mann M. *presented at the 4th iea-fbc.net meeting*. Österreich, Puchberg am Schneeberg, 10.11.2011.
- [10] Krobath P. *Umwelterklärung 2006 Werk Simmeringer Haide der Fernwärme Wien GmbH*. Fernwärme Wien GmbH, Wien, 2006.
- [11] Winter. F Purgar A. *Biomass Utilization in Fluidized Bed Combustors*. Austrian Croatian Hungarian Combustion Meeting 12. und 13. April 2012, http://www.hsii.hr/ach2012/user_files/prez/Winter.pdf, 02.12.2012.
- [12] Stockenreitner R. *Projektinformation Biomasseanlage Timelkam*. proc., Workshop erneuerbare Energien für bestehende Fernwärmenetze, Graz, 2005.

- [13] Gogebakan Z. Selcuk N. *Co-Firing Biomass with Coal in Fluidized Bed Combustion Systems*. Handbook of Combustion, Vol. 4: Solid Fuels, Weinheim, WILEY VCH, 2010.
- [14] LTU Stroß. *Umweltverträglichkeitserklärung, zusammenfassender Bericht, RHKW Linz Stand Juli 2007*. Linz AG Strom GmbH, Linz, 2007.
- [15] Holzerbauer E. Stubenvoll J. *Minderung der Staub- und NOx Emissionen bei Wirbelschicht- und Laugenverbrennungskesseln*. Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2007.
- [16] Purgar A. Winter F. *Wirbelschichtverbrennungsanlagen in Österreich und ihre Rauchgas-Reinigungsanlagen*. noch nicht veröffentlicht, Chemie Ingenieur Technik, Wiley-VCH,, eingereicht am 11.06.2012.
- [17] Purgar A. Winter F. *Concepts of Emission Reduction in Fluidized Bed Combustion of Biomass*. Czech Technical University, Acta Polytechnica scientific journal, 04/12, Prague 2012.
- [18] Szentannai P. Winter F. *IEA Fluidized Bed Conversion Programme Status Report 2010*. Österreichisches Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2012.
- [19] www.iea.org. 1.9.2012.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Prinzipieller Aufbau der stationären Wirbelschicht-Verbrennungsanlage (links) und der extern zirkulierenden Wirbelschicht-Verbrennungsanlage (rechts) [17]	9
2.1	Summe und Anteil der installierten Brennstoffwärmeleistung durch Wirbelschichtverbrennungsanlagen der Papier- und Zellstoffindustrie (PZ), Thermische Reststoffverwertung (TRV), Biomassekraftwerke (BKW) und Thermische Verwertung Kommunaler Klärschlämme (TVKK) in Megawatt und Prozent. Stand 2011. [16]	13
2.2	Summe der installierten Brennstoffwärmeleistung in Megawatt der Papier- und Zellstoffindustrie (PZ), Thermische Reststoffverwertung (TRV), Biomassekraftwerke (BKW) und Thermische Verwertung Kommunaler Klärschlämme (TVKK) von 1980 bis 2011. [16]	14
2.3	Vereinfachte Darstellung des Einsatzes einer Wirbelschichtverbrennung in Verbindung mit der Papier- und Zellstoffindustrie [11]	15
2.4	Prinzipieller Aufbau der Rauchgasreinigungsanlagen der untersuchten Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen der Papier- und Zellstoffindustrie. A) Wirbelschichtverbrennung B) Schwerkraftabscheider C) Trockene Rauchgasreinigung (optional) D) Elektro-, Gewebefilter oder Kombination. [16]	16
2.5	Schema der Energieversorgung der Beispielanlage der Papier- und Zellstoffindustrie.	17
2.6	Entwässerter Klärschlamm aus der Altpapierrecyclinganlage	18
2.7	Rindenpresse	19
2.8	Brennstoffzusammensetzung der Beispiel-Wirbelschicht-Verbrennungsanlage der Papier- und Zellstoffindustrie gewichtet nach dem kalorischen Wert des Brennstoffes in Prozent.	19
2.9	Schnittdarstellung des Beispielkessels der Papier- und Zellstoffindustrie mit rund 15 MW. Der größte innere Querschnitt des Kessels beträgt etwa 6,5 m	21
2.10	Partikelgrößenverteilung der Flugasche (rot, durchgehend), Probenahme bei durchschnittlichem Betrieb; und des ungebrauchten Bettsandes (blau, strichliert) der Beispiel-Wirbelschicht-verbrennungsanlage der Papier- und Zellstoffindustrie.	22

2.11	Emissionsgrenzwerte, bezogen auf 11 % Sauerstoffgehalt, von fünf untersuchten Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen der thermischen Reststoffverwertung, als Halbstunden- (erste Zeile) und Tagesmittelwert (zweite Zeile). Quelle: Amon [2], Stroß [14]. a) Gewichtung nach der Brennstoffwärmeleistung der Anlagen.	23
2.12	Prinzipieller Aufbau der Rauchgasreinigungsanlagen von vier der untersuchten Wirbelschichtverbrennungsanlagen der Kategorie Thermische Reststoffverwertung. A) Wirbelschichtverbrennung B) Schwerkraft- und optional Zentrifugalabscheider C) Trockene Rauchgasreinigung D) Elektrostatischer- oder Gewebefilter E) Nasswäscher F) Selektive Katalytische Reduktion (SCR) [16]	24
2.13	Mechanische Abfallaufbereitungsanlage des Reststoffheizkraftwerkes der Linz AG [14]	25
2.14	Rohrgurtförderer. Bild aufgenommen bei der Anlagenbesichtigung 2012	26
2.15	Vereinfachtes Verfahrensschema der Wirbelschichtverbrennungsanlage mit angeschlossener Rauchgasreinigungsanlage der Linz AG [14] . .	28
2.16	Übersicht über die in den Wirbelschicht-Öfen 1-3 der Fernwärme Wien GmbH behandelten Abfälle von 2002 bis 2005. Im Jahr 2005 wurden als Anfahr- und Stützbrennstoff 1.003 t Heizöl leicht eingesetzt, zusätzlich wurden 10.406 t Heizöl schwer verbrannt. [4]	31
2.17	Übersicht über die eingesetzten Brennstoffe in den Wirbelschicht-Öfen 1-3 der Fernwärme Wien GmbH im Jahr 2005	31
2.18	Verfahrensschema der einzelnen Wirbelschichtöfen 1-3 der Fernwärmewien GmbH. [10]- modifiziert A) Stationäre Wirbelschichtfeuerung, B) Elektrofilter C) Nasswäsche D) Aktivkoksfilter E) Selektive Katalytische Reduktion	32
2.19	Luftemissionen der Wirbelschichtöfen 1-3 und der Drehrohröfen 1 - 2 der Fernwärme Wien GmbH für das Referenzjahr 2005. (Anm.: vor Inbetriebnahme der Sammel-DeNOx-Anlage) [4]	33
2.20	Prinzipieller Aufbau der Rauchgasreinigungsanlagen der zwei untersuchten Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen der Kategorie Biomassekraftwerke. A) Wirbelschichtverbrennung B) Selektive Nicht Katalytische Reduktion (SNCR) C) Schwerkraftabscheider D) Selektive Katalytische Reduktion in high-dust Schaltung (SCR), optional E) Trockene Rauchgasreinigung F) Gewebefilter	35
2.21	(links) Bunker für die zerkleinerten Alt- und Restholzbrennstoffe. (rechts) Brennstoffaufbereitung.	36
2.22	Rückstände aus der Nichteisenabscheidung aus der Brennstoffaufbereitungsanlage der Biomasseanlage Timelkam.	37
2.23	Eisenabscheider der Brennstoffaufbereitungsanlage der Biomasseanlage Timelkam	37
2.24	Rückstände aus der Eisenabscheidung der Brennstoffaufbereitungsanlage der Biomasseanlage Timelkam	38

2.25	Installierte Brennstoffwärmeleistung der untersuchten stationären (rechts) und extern zirkulierenden (links) Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen in Megawatt.	39
2.26	Anzahl der untersuchten stationären (rechts unten) und extern zirkulierenden (links oben) Wirbelschicht- Verbrennungsanlagen	39
2.27	Einsatzbereiche von stationären und extern zirkulierenden Wirbelschichtverbrennungsanlagen. [18]-modifiziert	40

Tabellenverzeichnis

2.1	Verzeichnis Österreichischer Wirbelschichtverbrennungsanlagen und ihre Brennstoffwärmeleistung	12
2.2	Brennstoffeinsatz des Beispiel-Wirbelschichtkessels der Papier- und Zellstoffindustrie. Gas wird nur für den Anfahrbetrieb benötigt. *) Annahme	18
2.3	Emissionsgrenzwerte für den Beispiel-Wirbelschichtkessel der Papier- und Zellstoffindustrie im Vergleich zum EG-K. Bezugssauerstoffgehalt 11 %, EM Einzelmessung (meist Halbstundenmittelwert), HMW Halbstundenmittelwert	20
2.4	Emissionsgrenzwerte für das RHKW Linz AG in mg/m^3 bezogen auf 11% O ₂ und Normbedingungen. HMW) Halbstunden-Mittelwert, TMW) Tagesmittelwert, JMW) Jahresmittelwert [14]	27
2.5	Auslegungs-Brennstoffbedarf der Biomasseanlage Timelkam mit der Annahme von 30 % Wassergehalt [12]	36