



Technische Universität Graz
Institut für Wärmetechnik

UNTERSUCHUNGEN ZUR BEKÄMPFUNG VON ASCHEPROBLEMEN MIT ADDITIVEN IN BIOMASSEGEFEUERTEN WIRBELSCHICHTEN

von

Mato Adžaga

als Diplomarbeit der Kommission zur Abhaltung der dritten Diplomprüfung
der Studienrichtung Maschinenbau an der Technischen Universität Graz
über das Institut für Wärmetechnik vorgelegt.

Betreuer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Karl
Dipl.-Ing. Bernhard Gattermig

Graz, im März 2011

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am.....

.....
(Unterschrift)

KURZFASSUNG

Titel:

Untersuchungen zur Bekämpfung von Ascheproblemen mit Additiven in
biomassegefeuerten Wirbelschichten

Autor: Mato Adzaga

1. Stichwort: Wirbelschichtfeuerungen

2. Stichwort: Ascheagglomeration

Die inhaltlichen Themen dieser Arbeit bewegen sich von den theoretischen Biomassegrundlagen über Ascheproblematik und mögliche Gegenmaßnahmen und Simulationsberechnungen bis zu der Adaptierung der bestehenden Anlage.

In der letzten Zeit streben viele Länder danach traditionelle Brennstoffe (Kohle, Erdöl, Erdgas usw.) durch Biomassequellen für die elektrische Energieerzeugung zu ersetzen. Die Verbrennung und Vergasung sind die wichtigsten Formen der Energiewandlung. Für die elektrische Energieerzeugung haben sich die Wirbelschichtfeuerungen als sehr geeignet erwiesen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Literaturstudie zum Thema Ascheproblematik durchgeführt. Bei der Verbrennung von biogenen Brennstoffen in Wirbelschichten kommt es zu Problemen, die wegen der Aschezusammensetzung von Brennstoffen entstehen. Eines der größten Probleme ist die Agglomerationsbildung im Bettmaterial. Dabei wachsen die Partikel zu immer größeren Klumpen (Agglomeraten) zusammen, und deswegen kann das Bett nicht mehr fluidisiert werden. Weitere Probleme sind „Fouling und Slagging“. Unter den Begriffen versteht man die Ascheablagerung an Heizflächen und damit wird der Wärmeübergang an den Heizflächen verschlechtert. Probleme sind auch bei Biomasse mit einem hohen Chlorgehalt vorhanden. In Feuerungssystemen verursacht das Chlor eine Zerstörung der metallischen Werkstoffe durch die Korosion.

Anschließend wurden verschiedene Maßnahmen gegen die Ascheproblematik beschrieben. Die einfachste und effektivste Maßnahme um die Agglomerationsbildungsgefahr zu vermeiden, ist die Verwendung von neuen Bettmaterialien. Eine positive Wirkung hinsichtlich der Agglomerationen und der Bildung von Asche coatings auf den Körnern zeigten Olivinsand, Mullit, Korund und Hochofenschlacke. Die zweite Möglichkeit zur Bekämpfung von Agglomeration ist die Zugabe von Additiven in den Brennraum. Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass mit Additiven wie Kaolin, Dolomit, Mullit und Aluminiumsulfat die Ascheprobleme sehr gut bekämpft werden können. Die optimale Kombination und Dosierung muss für jeden Brennstoff ermittelt werden.

Desweiteren wurde mit Hilfe des thermodynamischen Simulationsprogramms „FactSage“, bei drei verschiedenen Brennstoffaschen die Wirkung von verschiedenen Additiven geprüft. Die Ergebnisse sind nicht zufriedenstellend: neue Berechnungsverfahren bzw. Datenbank sind nötig.

Für die geplanten Versuche musste die bestehende Anlage adaptiert und modifiziert werden. Ein wichtiger Punkt dieser Umbauten war die Konstruktion eines Brennstoffförderers. Der Brennstoffförderer soll für verschiedene Brennstoffe (feine und stückige Schüttgüter) geeignet sein und muss einen gasdichten Abschluss haben. Deshalb fiel die Wahl auf eine Kombination von Zellradschleuse und Schneckenförderer, die den Brennstoff von oben durch einen Fallschacht in die Brennkammer einbringt.

Mit Hilfe der berechneten Werte wurde der Brennstoffförderer von der Wirbelschicht-Versuchsanlage ausgelegt und konstruiert. Die Fertigung der Anlageteile wird in der Werkstatt des Institutes für Wärmetechnik erfolgen. Durch den Umbau wird eine experimentelle Untersuchung der Additive möglich.

ABSTRACT

Title:

Investigations about the counteraction of ash problems with additives in biomass-fired fluidized beds

Author: Mato Adzaga

1st Keyword: Fluidized-bed combustions

2nd Keyword: Agglomeration

The content theme of this work ranges from the theoretical basis of biomass over ash problems and possible countermeasures and simulation calculations up to the adaptation of the existing plant.

Recently many countries have been striving to replace traditional fuels (coal, oil, natural gas etc.) with biomass sources used for the production of electrical energy. The burning and gasification are the most important forms of the energy transformation. The fluidized-bed combustions have proven to be very suitable for the production of electrical energy.

As a part of this thesis a literature study on the topic of ash problems has been conducted. Many problems come into existence due to the burning of biogenous fuels in fluidized beds. The reason for these problems can be found in the composition of the ashes. One of the biggest problems is the agglomeration formation in the bed material. The work describes the attrition of ash particles on internal surfaces of the boiler as well as the clumping of the bedmaterial which leads to defluidisation. The particles eventually turn into large lumps (agglomerates) and therefore the bed cannot get fluidized. Further problems are „fouling and slagging “.Under these terms one understands the ash deposit at heating surfaces and thus the heat transition at the heating surfaces is declined. The biomasses with a high concentration of chlorine are also prone to problems. In firing systems chlorine causes a destruction of the metal via Corrosion. Subsequently, different measures against ash problems have been described as well. The simplest and the most efficient measure, which is ought to be carried out in order to avoid the danger of agglomeration, is the usage of new bed materials. A positive effect has been recorded in relation to the agglomeration and the building of ash coatings of the grains of Olive sand, mullite, aluminum oxide, and blast furnace slaq.The second possibility for the counteraction of agglomeration is the addition of additives into the combustion chamber. The researches have shown that with additives such as kaolin, dolomite, mullite, and aluminium sulfat it is possible to fight ash problems.The optimal combination and dosage has to be detected to each fuel.

In addition, the effect of different additives used in three different fuel ashes has been tested via thermodynamic simulation program called FactSage. The results are not satisfying: new computation methods and/or data bases are necessary.

For the planned experiments the existing plant had to be adapted and modified. An important point of these changes was the construction of a conveyor. The conveyor has to be optimal for different fuels and in addition, it must have the gas-tight seal. That is why we chose the combination of a rotary feeder and a screw conveyor that transfers the fuel from above through a chute into the combustion chamber. With the help of this data all components of the fluidised bed facility have been designed and constructed. The manufacturing of the plant parts will take place in the workshop of the institute of Thermal Engineering. With these modifications an experimental investigation of the additives will become possible.

VORWORT

Diese Diplomarbeit entstand am Institut für Wärmetechnik der Technischen Universität Graz mit Unterstützung der Austrian Energy and Environment.

Ich möchte mich bei meinem Betreuer, Herrn Dipl.-Ing. Bernhard Gatternig, besonders bedanken. Seine fachliche, wie auch persönliche Unterstützung hat sehr zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen. Ein weiterer Dank gilt dem Vorstand des Instituts, Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Jürgen Karl, der diese Arbeit ermöglicht hat. Schließlich möchte ich mich noch bei den Mitarbeitern der Institutswerkstatt bedanken, die die Fertigung meiner Konstruktion durchführen werden.

Besondere Dankbarkeit möchte ich auch an meine Eltern aussprechen, die mir dieses Studium ermöglicht und mich immer bestens und liebevoll unterstützt haben.

Großer Dank gilt auch meiner Freundin, MMag.^a Silvija Lovrinovic, die mich während meines Studiums unterstützt und motiviert hat. Auch an dieser Stelle möchte ich mich auch bei allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, recht herzlich bedanken.

Graz, März 2011

Mato Adzaga

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Nutzung von Biomasse	1
2	Aufgabenstellungen	3
3	Grundlagen	4
3.1	Biomasse als Brennstoff.....	4
3.1.1	Biomasseaufbau	6
3.1.2	Nutzbare und meistens eingesetzte Biomasse	7
3.1.3	Effekte bestimmter Elemente im Biomasse	9
3.2	Die Feuerungskonzepte	13
3.2.1	Allgemeine Einteilung von Feuerungssystemen	13
3.3	Wirbelschichtfeuerung.....	16
3.3.1	Funktionsweises der Wirbelschichttechnologien.....	17
3.3.2	Fluidisierungsregime	18
3.3.3	Zustandsdiagramm	21
3.4	Stationäre Wirbelschichtfeuerungen.....	23
3.5	Zirkulierende Wirbelschichtfeuerungen.....	25
3.6	Wirbelschichtanlagen in Österreich	28
4	Ascheproblematik in biomassegefeuerten Wirbelschichtanlagen	30
4.1	Charakterisierung der Biomasseaschen.....	30
4.1.1	Aschebestandteile	31
4.1.2	Ascheschmelzverhalten von Festbrennstoffen	33
4.2	Mechanismen und Auswirkungen der Ascheprobleme	37
4.2.1	Fouling / Slagging	37
4.2.2	Hochtemperatur – Chlorkorrosion.....	38
4.2.3	Agglomeration des Bettmaterials.....	39
5.1	Bettmaterialien	46
5.1.1	Beispiele von verwendeten Bettmaterialien	47
5.2	Additive	48
5.2.1	Kaolin.....	49
5.2.2	Dolomit.....	50
5.2.3	Aluminiumoxid.....	51
5.2.4	Mullit	51
5.2.5	Aluminiumsulfat.....	52
5.2.6	Eisensulfat	52

5.2.7	Kalkstein	53
5.2.8	Bauxit	53
5.2.9	Ankerit	54
5.2.10	Gibbsit	54
5.2.11	Magnesit	55
5.2.12	Ophit	55
5.2.13	Elementare Schwefel	56
5.2.14	Zeolit	56
5.2.15	Ammoniumsulfat	56
5.2.16	Andere wenig benutzte oder nur vorgeschlagene Additive	57
5.3	Wirkung von verwendeten Additiven	58
6	Simulation	62
6.1	Thermodynamische Rechnungen mit Fact Sage	62
6.2	Verwendete Datengrundlage	63
6.2.1	Hackschnitzel	64
6.2.2	Weizenstroh	66
6.2.3	Weide gehäckselt Daubenspeck Brox	68
6.3	Kritische Bewertung der thermodynamischen Oxid-Systeme	70
6.3.1	System K_2O-SiO_2	71
7	Versuchsanlage	75
7.1	Bestehender Brennstoffförderer	77
7.2	Erweiterung der Anlage	78
7.2.1	Adaptierter Brennstoffförderer	78
8	Zusammenfassung	94
9	Ausblick	96
10	Literaturverzeichnis	97
11	Anhang A	101

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Weltenergieverbrauch 2000 - 2060 (Shell Studie) [47].....	1
Abbildung 3-1: Bestandteile der Zellwand von Hölzern [9].....	6
Abbildung 3-2: Bestandteile von Fichtenpellets und Pellets aus Baumwollresten [9]	7
Abbildung 3-3: Primärenergieeinsatz aus Holz in kWh pro Einwohner in 2004 [48]	8
Abbildung 3-4: Chlor-Gehalte von Biomasse-Brennstoffen [10].....	9
Abbildung 3-5: Schwefel-Gehalte von Biomasse-Brennstoffen [10].....	10
Abbildung 3-6: S- und Cl- Anteile im Brennstoff als Maß für Korrosionspotenziale [10]	11
Abbildung 3-7: Feuerungssysteme für feste Brennstoffe [46]	13
Abbildung 3-8: Einteilung der Feuerungssysteme [1].....	14
Abbildung 3-9: Druckverlust in einer körnigen Schicht in Abhängigkeit der Fluidgeschwindigkeit [12]	17
Abbildung 3-10: Fluidisierungsregime [49].....	19
Abbildung 3-11: Mechanismen des Partikeltransports in einer Wirbelschicht [15].....	20
Abbildung 3-12: Reh-Diagramm [14]	22
Abbildung 3-13: Aufbau einer stationären Wirbelschicht [10].....	23
Abbildung 3-14: Aufbau einer zirkulierenden Wirbelschicht [10]	25
Abbildung 3-15: Regionale Unterschiede beim Einsatz von Biomasse in zirkulierende.....	26
Abbildung 3-16: Biomasseeinsatz in Österreich in den Jahren 2004 und	28
Abbildung 4-1: Aschezusammensetzung von 340 Biomassen [29].....	31
Abbildung 4-2: Typische Werte für die Zusammensetzung von Aschen, berechnet als Oxide [18] [29]	31
Abbildung 4-3: Einteilung von Brennstoffen nach ihren Aschekomponenten [1) Holzartige, 2) Halmgutartige, 3) Abfallstoffe, 4) Kohlen] [18]	32
Abbildung 4-4: Schematische Darstellung des Erhitzungsmikroskops nach DIN 51730 [22].	33
Abbildung 4-5: Schmelzverlauf eines Probekörpers, bezogen auf seine relative Höhe [22] ..	34
Abbildung 4-6: Gleichgewichtsdiagramme der Zweistoffsysteme K_2O / SiO_2 [65].....	36
Abbildung 4-7: Schematische Wirbelschichtbett - Segregation und	39
Abbildung 4-8: Mechanismen für die Agglomeration des Bettmaterials [26].....	40
Abbildung 4-9: Standard Agglomerationstest (Weizenstroh, Bettmaterial: Quarzsand)[28]	41
Abbildung 4-10: Klassifizierung von Nachweismethoden [51]	42
Abbildung 4-11: Gegenwirkungsmethoden [51]	43
Abbildung 5-1: Sinterbeginn für Fichten-, Gras- und Stroh [9].....	60
Abbildung 6-1: FactSage Main Menu.....	62
Abbildung 6-2: Simulationsrechnung für Slag/Salt im Temperaturbereich	64
Abbildung 6-3: Simulationsergebnisse mit Additiven, Massenbereich.....	65
Abbildung 6-4: Simulationsergebnisse mit Additivn, Massenbereich	65
Abbildung 6-5: Simulationsrechnung für Slag/Salt im Temperaturbereich	66
Abbildung 6-6: Simulationsrechnungen mit Additiven, Massenbereich	67
Abbildung 6-7: Simulationsrechnungen mit Additiven, Massenbereich	67
Abbildung 6-8: Simulationsrechnung für Slag/Salt im Temperaturbereich	68
Abbildung 6-9: Simulationsrechnungen mit Additiven, Massenbereich	68
Abbildung 6-10: Phasendiagramm für das Stoffgemisch $K_2O - SiO_2$ [9].....	71
Abbildung 6-11: Phasendiagramm des K_2O-SiO_2 -Systems - Neue erhaltene Daten, - FACT- Datenbank, - Spear-Datenbank [50] [64]	72
Abbildung 6-12: Phasendiagramm des K_2O-SiO_2 -Systems auf Basis der neuen	73
Abbildung 6-13: Phasendiagramm des $SiO_2 - K_2O$ - Systems (MT DATA).....	73

Abbildung 7-1: 3-D Modell der bestehenden Anlage [43].....	75
Abbildung 7-2: Schematischer Aufbau der Versuchsanlage [43]	76
Abbildung 7-3: Strömungsführung durch Ringspalt [43].....	76
Abbildung 7-4: Brennstoffförderer [43].....	77
Abbildung 7-5: Schnecke.....	78
Abbildung 7-6: Zellrad mit runder Kammer (links) und mit dreieckiger Kammer (rechts).....	79
Abbildung 7-7: Zellrad mit Dichtungen.....	80
Abbildung 7-8: Kräfte auf dem Zellrad und der Welle	83
Abbildung 7-9: Zellrad-Wellenverbindung mit Bolzen	87
Abbildung 7-10: Brennstoffspeicher (rechts) und Zwischenspeicher (links)	89
Abbildung 7-11: Messung mit elektromechanischen Lotsystemen (links) und Messung mit Mikrowellen (rechts) [63]	90
Abbildung 7-12: Zellradschleuse	91
Abbildung 7-13: Fördersystem.....	91
Abbildung 7-14: Explosionsdarstellung des Fördersystems.....	92
Abbildung 7-15: 3-D Modell der Versuchsanlage.....	93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Nutzbare Biomasse [11]	7
Tabelle 3-2:	Typische Heizwerte und Feuchtegehalte der Brennstoffe [6]	8
Tabelle 3-3:	Auswirkungen einzelner Brennstoffparameter auf den Feuerungsbetrieb	11
Tabelle 3-4:	Die Richtbereiche für Qualitätsparameter von Biomasse-Brennstoffen und Biomasse-Aschen hinsichtlich deren unproblematischer thermischer Nutzung [21].....	12
Tabelle 3-5:	Fluidisierungszustände [15]	18
Tabelle 3-6:	Charakteristische Daten von stationären Wirbelschichtfeuerungen [46].....	24
Tabelle 3-7:	Charakteristische Daten von zirkulierenden Wirbelschichten [46]	26
Tabelle 3-8:	Überblick über die Vorteile und Nachteile von stationären und zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungen [62]	27
Tabelle 3-9:	Industrielle Wirbelschichtfeuerungen in Österreich [6]	29
Tabelle 4-1:	Ascheschmelztemperatur von Festbrennstoffen nach DIN 51730 [23].....	35
Tabelle 4-2:	Bewertung der technischen und wirtschaftlichen Aspekte der verschiedenen Nachweis- und Gegenwirkungsmethoden [51].....	44
Tabelle 5-1:	Verwendete Bettmaterialien [9] [25]	46
Tabelle 5-2:	Wirkungen von verwendeten Bettmaterialien	47
Tabelle 5-3:	Chemische Zusammensetzung von Kaolin [34]	49
Tabelle 5-4:	Chemische Zusammensetzung von Dolomit [34]	50
Tabelle 5-5:	Chemische Zusammensetzung von Aluminiumoxid [34]	51
Tabelle 5-6:	Chemische Zusammensetzung von Mullit [34].....	51
Tabelle 5-7:	Chemische Zusammensetzung von Kalk [34]	53
Tabelle 5-8:	Chemische Zusammensetzung von Ankerit [34]	54
Tabelle 5-9:	Chemische Zusammensetzung von Gibbsit [34]	54
Tabelle 5-10:	Schlacke- und Flugaschezusammensetzung [52]	58
Tabelle 5-11:	Mineralogische Analyse der Flugasche [33].....	59
Tabelle 5-12:	Zusammensetzung der Flugaschen von Olivenkernen mit Additivbenutzung [33]	59
Tabelle 5-13:	Clorgehalt in Flugasche von biogenen Brennstoffen [33]	60
Tabelle 5-14:	Wirkungen von verwendeten Additiven	61
Tabelle 6-1:	Aschezusammensetzung von Biomassebrennstoffen (wt %) [29]	63
Tabelle 6-2:	Wirkung der Additive.....	66

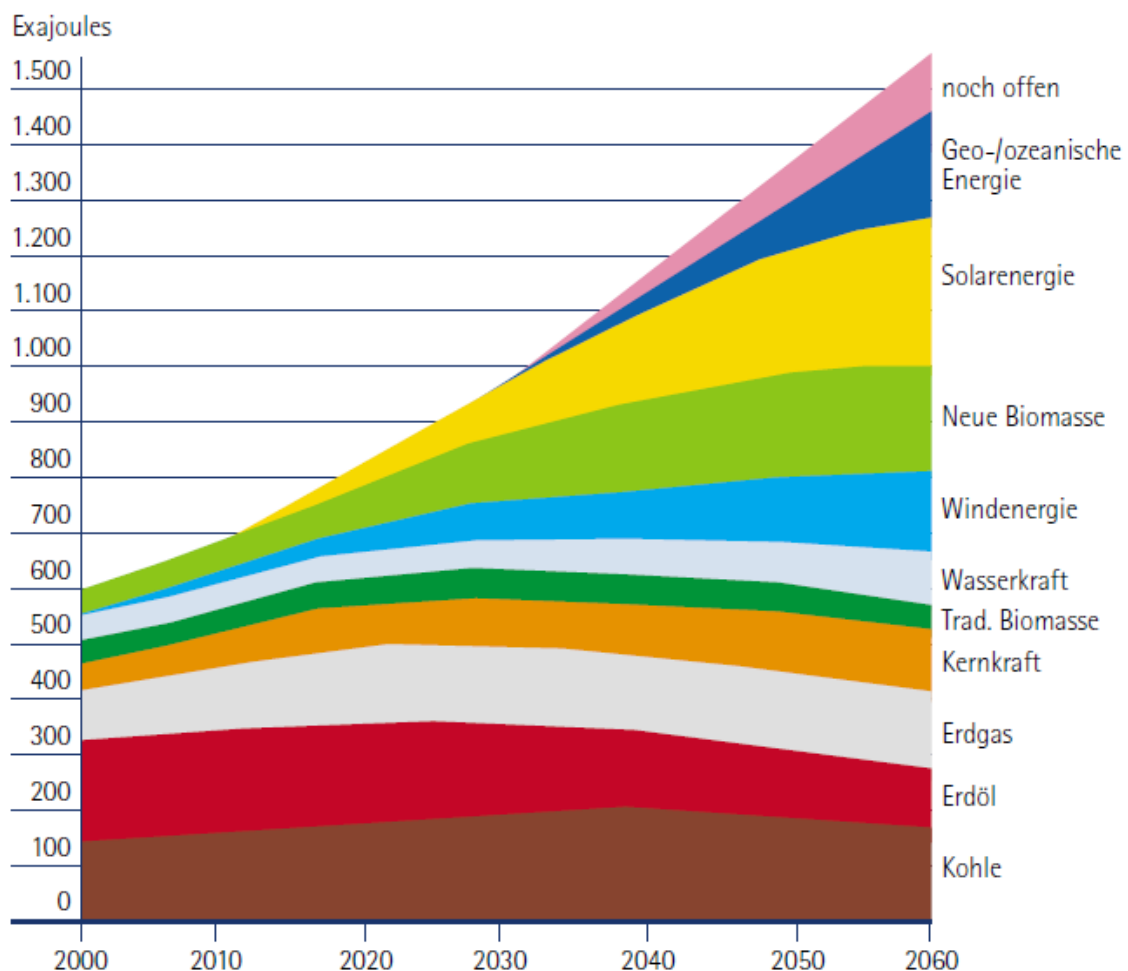
Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

AE&E	Austrian Energy and Environment
SIT	Sinterbeginn
EWT	Erweichungstemperatur
SPT	Sphärischtemperatur
HKT	Halbkugeltemperatur
FLT	Fließtemperatur
BFBC	bubbling fluidized bed combustor
FICFBC	fast internal circulating fluidized bed combustor
DFBG	dual fluidized bed gasifier
CFBC	circulating fluidized bed combustor
CFBG	circulating fluidized bed gasifier
RFBC	rotating fluidized bed combustor
XRD	X-Ray Diffraction (Röntgenbeugung)

1 Einleitung

1.1 Nutzung von Biomasse

Der weltweit ständig steigende Energiebedarf und die Umweltbelastung, die durch seine Deckung entsteht, erfordern neue Konzepte und Lösungen, um vorhandene Ressourcen sinnvoll und schonend einsetzen zu können. Um den stark steigenden Bedarf an Energie, wie in Abbildung 1 ersichtlich, zu decken, führt an der Nutzung der fossilen Energieträger auch in Zukunft kein Weg vorbei. Die Reserven von Öl und Gas neigen sich allerdings dem Ende zu. So wird damit gerechnet, dass die konventionellen Quellen noch in diesem Jahrhundert vertrocknen [47].



Anmerkung: 1 Exajoule (EJ) = 10 Mrd. Gigajoule (GJ) = 2,8 Mrd. Megawattstunden (MWh)

Abbildung 1-1: Weltenergieverbrauch 2000 - 2060 (Shell Studie) [47]

Das erfordert den Einsatz, bzw. die Suche nach alternativen Energieträgern zu Erdöl und Erdgas. Die zitierte Shell-Studie prognostiziert einen stark zunehmenden Beitrag regenerativer Energien zur globalen Energieversorgung. In März 2007 hat die Europäische Gemeinschaft (EU) als Ziel bis 2020 20% des Energiebedarfs von erneuerbaren Energiequellen, wie Biomasse, Wasserkraft, Wind und Sonnenenergie, abzudecken. Biomasse setzt 14% der globalen Rohenergie, das viertgrößte nach Kohle, Öl und Erdgas fest und ist die wichtigste Energiequelle in Entwicklungsländern und stellt ungefähr 35 % ihres Energiebedarfs bereit [3].

Im Hinblick auf die Reduktion der CO₂ Emission soll dieser Anteil jedoch deutlich erhöht werden. So soll in Schweden bis 2020 über 40 % der Primärenergie aus Biomasse bereitgestellt werden. Danach soll bis 2050 sogar die Hälfte des weltweiten Energiebedarfs durch erneubare Energie gedeckt werden [3] [5].

Biomasse gilt als regenerativer, CO₂- freier Energieträger und sie bindet dieselbe Menge von CO₂ von der Atmosphäre während des Wachstums, die während der Verbrennung freigegeben wird [11]. Die Energieumwandlung aus Biomasse kann einen wichtigen Beitrag am Sektor der elektrischen Energieerzeugung leisten und für diese Aufgabe hat sich die Wirbelschichtfeuerung als sehr geeignet erwiesen. Die Energetische Nutzung biogener Brennstoffe hat die größten Potenziale für einen wirtschaftlichen Einsatz regenerativer Energien [47]. Die Verbrennung ist die einfachste und bisher häufigste Nutzung und sie stellt neben der Vergasung, die wichtigste Form der Energieumwandlung dar.

Die Wirbelschicht-Technologie ist für die Verbrennung verschiedener und inhomogener Brennstoffe besonderes geeignet. Sie bieten Eigenschaften wie z.B. hohes Feuerraum-Wirkungsgrad und einen exzellenten Wärmetransport bei geringen Emissionen. Schwierige Brennstoffe, wie Brennstoffe mit geringerem Heizwert, hohem Aschegehalt oder hoher Feuchtigkeit können gut genutzt werden, die niedrigen Brennkammertemperaturen ermöglichen geringe NO_x und SO₂ Emissionen. Ein weiterer Vorteil der Wirbelschichtbrennkammer ist die gleichmäßige Temperaturverteilung im Bettbereich, die relativ geringe Reaktionstemperatur von meist unter 900°C haben. Es gibt stationäre und zirkulierende Wirbelschichtreaktoren, beide können atmosphärisch oder unter Druck betrieben werden [23]. Es ist notwendig, die aus den besonderen Eigenschaften der Biomasse resultierende Problemstellung (z.B. Chlorgehalt, niedrige Ascheerweichungstemperaturen) und die für den Betrieb einer Anlage bestehenden Risiken detailliert zu untersuchen und zu bewerten. In dieser Arbeit wird über die Ascheproblematik, die Mechanismen, die Auswirkungen und mögliche Gegenmaßnahmen diskutiert.

2 Aufgabenstellungen

Beim Einsatz der Biomassen in Wirbelschichtfeuerungen kommt es zu Problemen bei der Nutzung im Zusammenhang mit dem Ascheverhalten. Die Hauptursache dafür liegt in der Aschezusammensetzung der Biomassen, meist in ihrem hohen Gehalt an Alkalien und Chlor.

Folgende Tätigkeiten in dieser Arbeit werden durchgeführt:

- eine Literaturstudie zum Thema Ascheproblematik. Bei der Verbrennung von biogenen Brennstoffen kommt es zu Problemen, wie z.B. niedrige Ascheschmelzpunkte und Korrosion der metallischen Einbauten im Kessel
- mögliche Gegenmaßnahmen zu den Ascheproblemen. Eine Variante um diese Effekte zu bekämpfen ist die Zugabe von Additiven in dem Brennraum
- Auswahl geeigneter Substanzen mit Hilfe eines thermodynamischen Simulationsprogrammes „FactSage. Es sollten für drei verschiedene Brennstoffaschen die Wirkung von verschiedenen Additiven geprüft werden
- Adaptierung der am Institut für Wärmetechnik befindlichen stationären Wirbelschichtfeuerung. Diese muss in der Lage sein verschiedene Brennstoffe zu verfeuern. Das Fördersystem muss so adaptiert werden, dass es stückige Brennstoffe (Holzpellets, Hackschnitzel) bis zum Reaktorrohr transportieren kann und die Anlage muss gasdicht sein
- schriftliche Dokumentation der Arbeit

3 Grundlagen

Dieses Kapitel befasst sich mit den theoretischen Grundlagen dieser Arbeit, sowie mit möglichen Brennstoffen, die mit dieser Thematik in Verbindung gebracht werden können.

3.1 Biomasse als Brennstoff

Biomasse ist ein biologisches Material, das von den lebenden oder vor kurzem lebenden Organismen abgeleitet wird. Biomasse beinhaltet damit die in der Natur lebende Phyto- und Zoomasse (Pflanze und Tiere), abgestorbene Phyto – und Zoomasse (Stroh) und die daraus resultierenden Reste [8].

Biomasse-Energiequellen sind verschieden und folglich existiert eine große Notwendigkeit für ein komplettes Klassifizierungssystem. Der Beweggrund für die Herstellung eines solchen Systems ist das Verhalten der Biomasse bei der Verbrennung vorauszusagen.

In Bezug auf die energetische Verwertung von Biomasse sind aber vor allem Klassifikationen nach den charakteristischen Eigenschaften wichtig, da sie die Art der energetischen Verwertung beeinflussen [7].

Man betrachtet:

- Zustand (fest/flüssig/gasförmig)
- Feuchte (relativer Wassergehalt)
- Elementarzusammensetzung
- Chemische Stoffgruppen
- Dichte (Logistik, Fördertechnik)
- Thermisches Ascheverhalten (enthaltene Mineralien)
- Heizwert

Biomasse-Brennstoffe können in der Regel in vier primäre Klassen unterteilt werden [8]:

- Primärreste: Nebenprodukte von Nahrungspflanzen und Waldprodukte (Holz, Stroh, Getreide, Mais usw.).
- Sekundärreste: Nebenprodukte der Verarbeitung von Biomasse für Herstellung von Nahrungs- oder Biomassematerialien (Säge und Papierfabriken, Lebensmittel und Getränkeindustrie, Aprikosenkernöl etc.).
- Tertiärereste
- Energiepflanzen

Die Klassifizierung beruht auf Eigenschaften die kategorisiert werden können in:

- Holz und holzartige Biomasse (Hart-und Weichholz)
- Halmartige Biomasse (Stroh, Gräser, Stiele etc.)
- Biogene Abfälle (Klärschlamm)
- Biogene Reststoffe (Abfälle aus Papier und Lebensmittelindustrie etc.)
- Aquatische Biomasse (Algen etc.)
- Energiepflanzen (spezifisch angebaut zu den Energiezwecken).

Die Voraussetzung für eine solche Klassifikation ist, dass sich Biomassen aus verschiedenen Kategorien (Abfall, Holz) ähnlich sind, aber trotz dessen haben sie sehr verschiedene Eigenschaften.

Eine andere neuere Klassifikation die verwendet werden kann, ist der europäische Standard für feste biologische Brennstoffe (CEN TC 335). Diese Klassifikation basiert auf dem Brennstoffursprung und -quelle. Im hierarchischen Klassifizierungssystem sind die auf Ursprung gegründeten festen Brennstoffhauptgruppen [8]:

- Holzartige Biomasse (hölzerne Späne, Tabletten, Maschinenbordbuchholz)
- Halmartige Biomasse
- Frucht-Biomasse
- Mischungen

3.1.1 Biomasseaufbau

Die Bestandteile der Biomasse umfassen Zellulose, Hemizellulose, Lignin, Lipide, Proteine, einfachen Zucker, Stärken, Wasser, Kohlenwasserstoff, Asche und andere Komponenten. Die Konzentration jeder Bestandteile schwankt abhängig von Sorte, Art des Betriebsgewebes, Stadium des Wachstums und Wachstumsbedingungen [8].

Die Cellulose (fachsprachliche Schreibweise, standardsprachlich Zellulose, Summenformel: $C_6H_{10}O_5$) ist der Hauptbestandteil von pflanzlichen Zellwänden (Massenanteil 50%) und damit die häufigste organische Verbindung der Erde. Zellulose ist deshalb auch das häufigste Polysaccharid. Sie ist ein unverzweigtes Polysaccharid, das aus mehreren hundert bis zehntausend Glucose-Molekülen besteht. Sie wird in den Plasmamembranen gebildet und vernetzt sich untereinander zu fibrillären Strukturen [45].

Hemizellulose ist ein in pflanzlicher Biomasse vorkommendes, nicht exakt definierbares Gemisch von Polysacchariden (Vielfachzuckern). Die am häufigsten vorkommenden Monomere (Monosaccharid = Einfachzucker) sind Pentosen, wie D-Xylose und L-Arabinose. Hemicellulose ist ein Bestandteil pflanzlicher Zellwände, deren Matrix aus fibrillärer, teilweise kristalliner Cellulose besteht. Bei Verholzung ist diese Matrix zusätzlich von dem Makromolekül Lignin (Lignocellulose) durchdrungen und bildet so Lignocellulose. Die Hemicellulose bildet somit einen Teil der Stütz- und Gerüstsubstanz von Zellwänden und macht 1/4 bis 1/3 der Pflanzenmasse aus. Sie ist amorph und bildet keine höheren Strukturen aus [45] [9].

Lignin ist ein phenolisches Makromolekül aus verschiedenen Monomerbausteinen und ein fester farbloser Stoff, der in die pflanzliche Zellwand eingelagert wird und dadurch die Verholzung der Zelle bewirkt (Lignifizierung). Lignin ist damit neben Zellulose der häufigste Stoff der Erde. Lignin ist auch für das „Vergilben“ von Papier verantwortlich (bei sogenanntem „holzhaltigem“ mehr als bei „holzfreiem“ Papier [45].

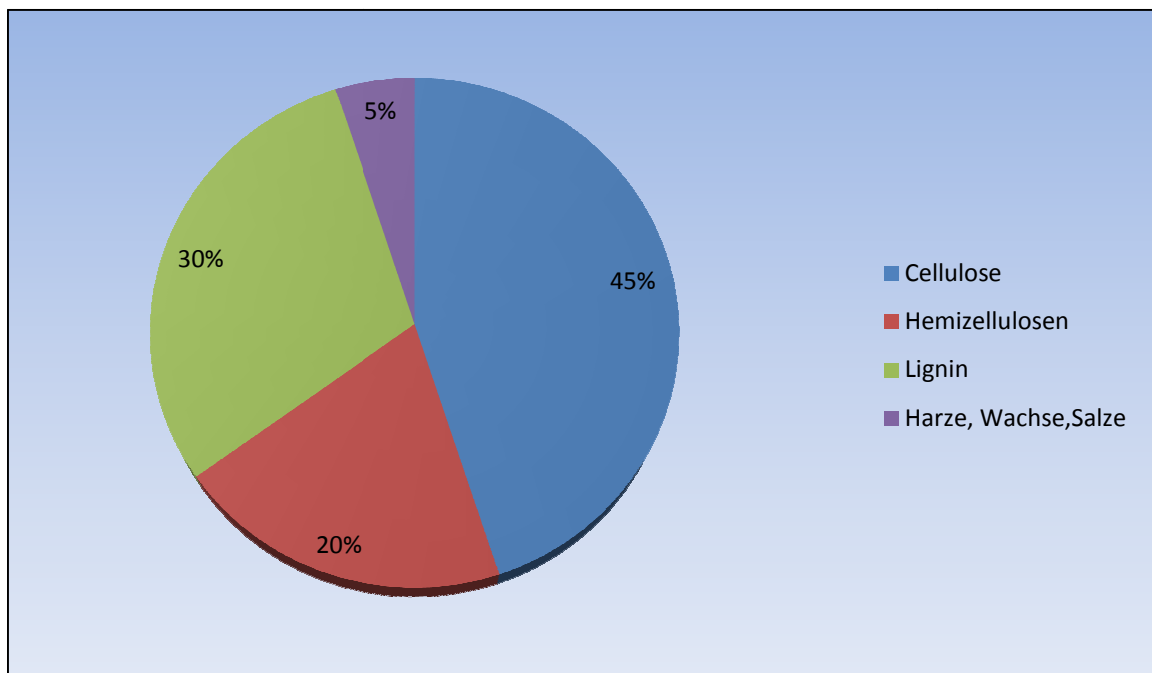


Abbildung 3-1: Bestandteile der Zellwand von Hölzern [9]

Die Hauptbestandteile von Biomasse sind Wasser, organische Substanz (alle Verbindungen aus hauptsächlich Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff) und Mineralien (Asche) [9].

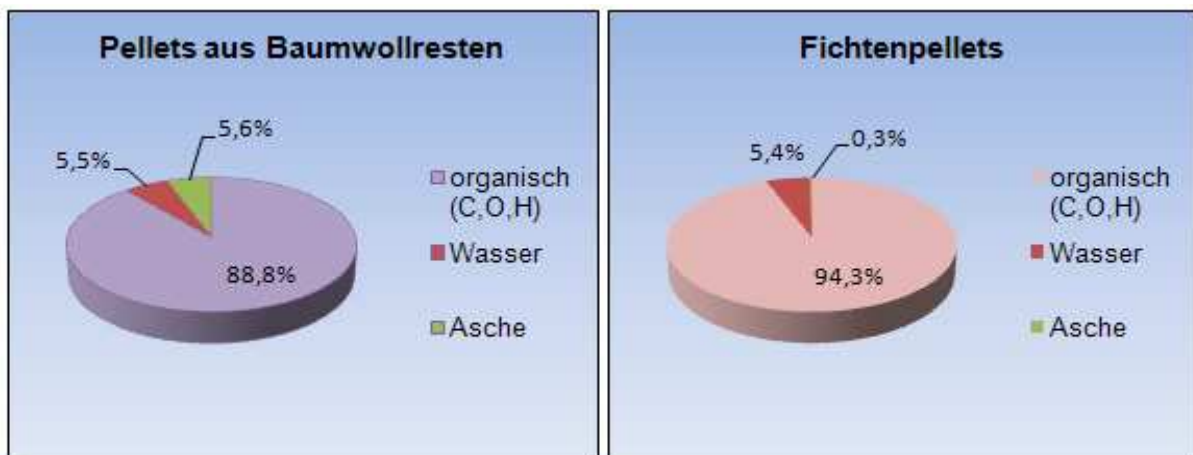


Abbildung 3-2: Bestandteile von Fichtenpellets und Pellets aus Baumwollresten [9]

Andere wichtige Elemente in Biomassen sind Stickstoff, Schwefel, Silicium, Chlor, Phosphor sowie die Metalle Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium und Aluminium. Der Stickstoff im Brennstoff geht während der Verbrennung unter Bildung von molekularem Stickstoff (N₂) und Stickoxiden (NO_x), sowie minimal Cyanwasserstoff (HCN) fast gänzlich in die Gasphase über. In der Asche wird kaum Stickstoff eingebunden [8].

Kalium, Schwefel und Chlor haben bei der Verbrennung einen großen Einfluss auf die Korrosionsvorgänge. Der im Brennstoff enthaltene Schwefel geht während der Verbrennung unter Bildung von SO₂, SO₃ und Alkalisulfaten, zum Großteil in die Gasphase über. Erdalkalimetalle (Ca, Mg), Alkalimetalle (K, Na) und Silizium haben Einfluss auf das Ascheschmelzverhalten [8].

3.1.2 Nutzbare und meistens eingesetzte Biomasse

Tabelle 3-1 zeigt nutzbare Biomassen [11]:

Zucker/Stärke	halmgutartige (cellulosehaltige)	pflanzliche Öle:	holzartige Biomasse
Weizen	Grüngut	Rapsöl	Scheitholz
Triricale	Stroh	Palmöl	Holzhackschnitzel
Maissilage	Miscanthus	Leindotteröl	Altholz
			Holz-Pellets

Tabelle 3-1: Nutzbare Biomasse [11]

Die thermische Nutzung von halmgutartigen Energieträgern erfordert einen vergleichsweise hohen feuerungstechnischen Aufwand – wegen den ungünstigen verbrennungstechnischen Eigenschaften – und oft eine aufwändige Rauchgasreinigung zur Einhaltung der emissionsschutzrechtlichen Vorgaben. Ein Einsatz erfolgt daher meist in speziell ausgelegten Feuerungen größerer Leistung [11].

Pflanzliche Öle werden bei Herstellung von Biodiesel benutzt, und sie sind auch ein problematisches Brennstoff, weil nur ein Teil des Heizwerts der Pflanze genutzt wird. Zucker/Stärke wird bei der Herstellung von Bioethanol und Biogas eingesetzt und man kann nur einen Teil des Heizwerts der Pflanze nutzen [11].

Die in den modernen Biomassefeuerungsanlagen meistens eingesetzten Brennstoffe sind: Altholz, Pellets, Stroh, Ganzpflanzen, Waldhackgut, Sägespäne, Industriehackgut, Rinde, Reste aus der landwirtschaftlichen Industrie wie Kerne und Schalen [6].

Ein Überblick über einzelne Brennstoffe und deren Heizwerte ist in der Tabelle 3-2 dargestellt.

Brennstoff	Heizwert (MJ/kg) trocken	Feuchte (%)
Fichte	19 - 21	10 - 30
Gräser	17 - 18	10 - 40
Abfallholz	16 - 17	10 - 30
Papier	17 - 18	5 - 30
Rinde	15 - 16	10 - 30
Klärschlamm	15 - 17	55 - 70
Braunkohle	15 - 17	25 - 60
Steinkohle	29 - 33	3 - 5
Polyethylen (PE)	46	Kaum
Polypropylen (PP)	44	Kaum
Polystyrol (PS) (Schlagfest)	40	Kaum
Polyamid (PA)	31	Kaum

Tabelle 3-2: Typische Heizwerte und Feuchtegehalte der Brennstoffe [6]

In allen Ländern der EU wird der Hauptteil der energetischen Biomassenutzung aus Holz abgedeckt. In Vergleichsdarstellungen der energetischen Nutzung von Holz in der EU wird die Vorreiterrolle Österreichs verdeutlicht. Pro-Kopf-Verbrauch von Holz für energetische Zwecke, liegt Österreich, nach dem Wood Energy Barometer (Oktober 2005), an vierter Stelle hinter Finnland, Schweden und Lettland [48].

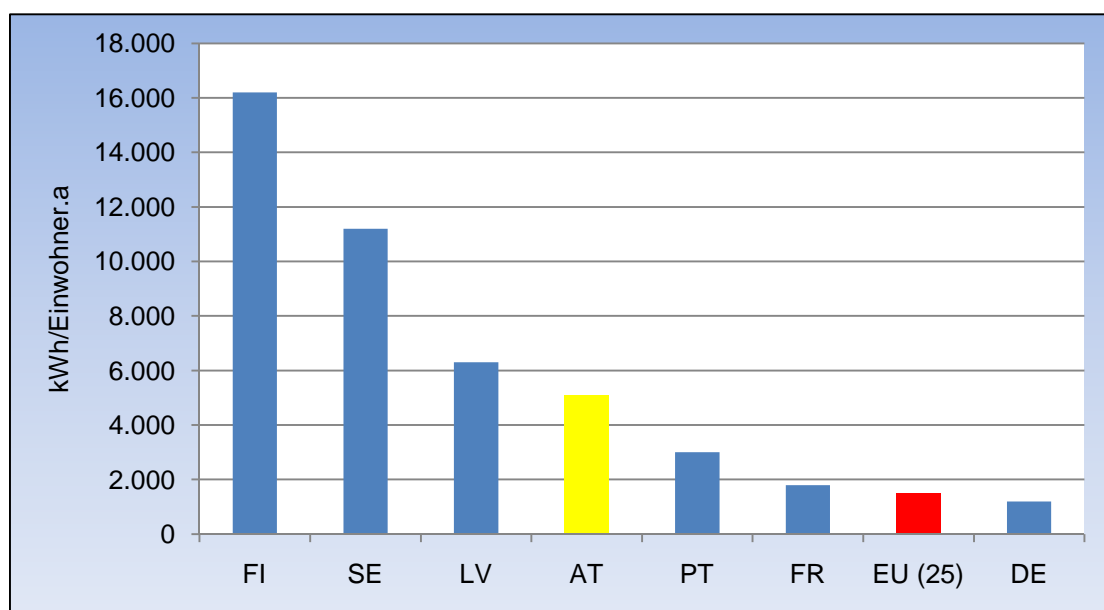


Abbildung 3-3: Primärenergieeinsatz aus Holz in kWh pro Einwohner in 2004 [48]

In Österreich legt man besonders Wert auf die weitere Forcierung dezentraler Biomassefernheizwerke und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen sowie auf die Forcierung moderner Biomasse-Einzelofenfeuerungen auf Pellet-, Brikett und Brennholzbasis [21].

3.1.3 Effekte bestimmter Elemente in Biomassen

Bestimmte Elemente in der Biomasse verdienen besondere Aufmerksamkeit. Das sind Chlor, Kalium und Schwefel. Bei holzartiger Biomasse sind die Gehalte an Schwefel (S), Chlor (Cl) und Kalium (K) sehr gering, so dass die entsprechenden Emissionen in der Regel nur von untergeordneter Bedeutung sind. Bei Halmgutbrennstoffen sind diese Gehalte jedoch höher und hier können gebildete Stoffe Bedeutung erlangen. Schwefel, Chlor und Kalium können je nach den Bedingungen in der Feuerung nennenswert freigesetzt werden und ein Großteil ihrer Verbindungen kann man im Abgas wiederfinden. Wie die Chlor- und Schwefelgehalte in verschiedenen Biobrennstoffen variieren, ist in Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5 zu sehen [10].

Der bei halmguttriger Biomasse befindliche Chlor liegt nach der Verbrennung in Form von Salzen (KCl, NaCl) vor, die sich in der Asche wiederfinden. Kleinere Anteile können auch als Chlorwasserstoff (HCl) emitieren. Holzbrennstoffe zeigen folglich mit ca. 0,005% bis 0,02% Chlor in der Trockenmasse so niedrige Gehalte, dass oft die Nachweisgrenze der Bestimmungsverfahren unterschritten wird. Dagegen ist der Chlorgehalt im Getreidestroh mit ca. 0,1% bis 0,5% (1000 - 5000 mg/kg TM) um ein Vielfaches höher [10].

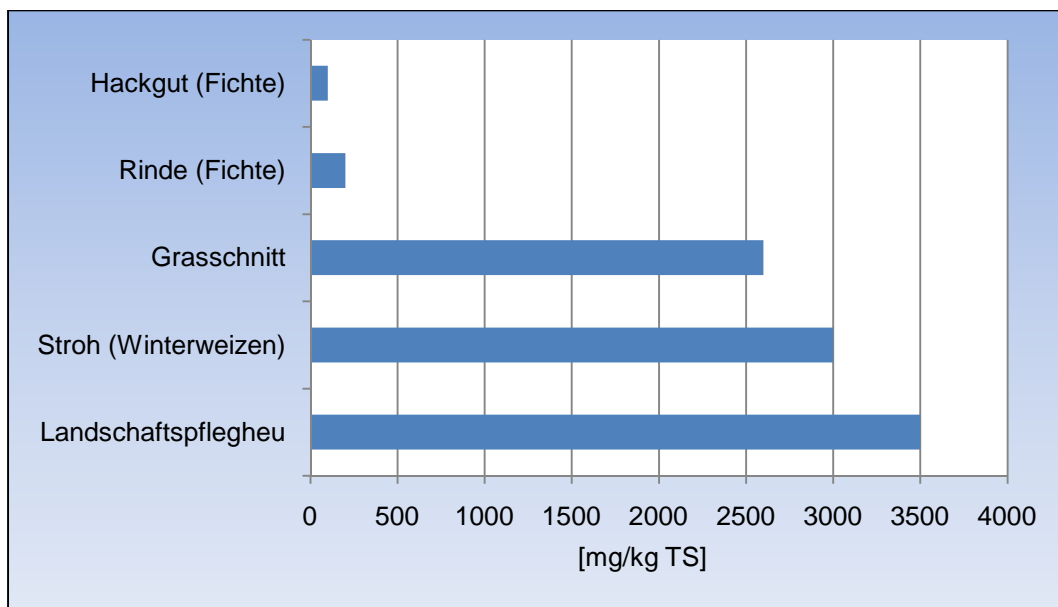


Abbildung 3-4: Chlor-Gehalte von Biomasse-Brennstoffen [10]

Das größte Interesse konzentriert sich auf die Hochtemperaturkorrosion der Überhitzerrohre, die durch Chlor auf der Oberfläche verursacht werden.

Kalium ist eine Schlüsselkomponente im Zusammenhang mit der Verschlackung und der Bildung von Ablagerungen und Korrosion in Feststoff-Feuerungen. Es liegt im Abgas vor allen in Form von Salzen vor (d.h. KCl, K_2SO_4), deshalb bietet sich eine Nutzung der Asche als Kaliumdünger an. Kaliumsulfat (K_2SO_4) weist mit 1070 °C eine vergleichsweise hohe Schmelztemperatur auf und bei Kalziumchlorid (KCl) beträgt sie nur 760 °C. Hohe Kaliumgehalte führen dabei generell zu niedrigeren Ascheerweichungstemperaturen [8] [2].

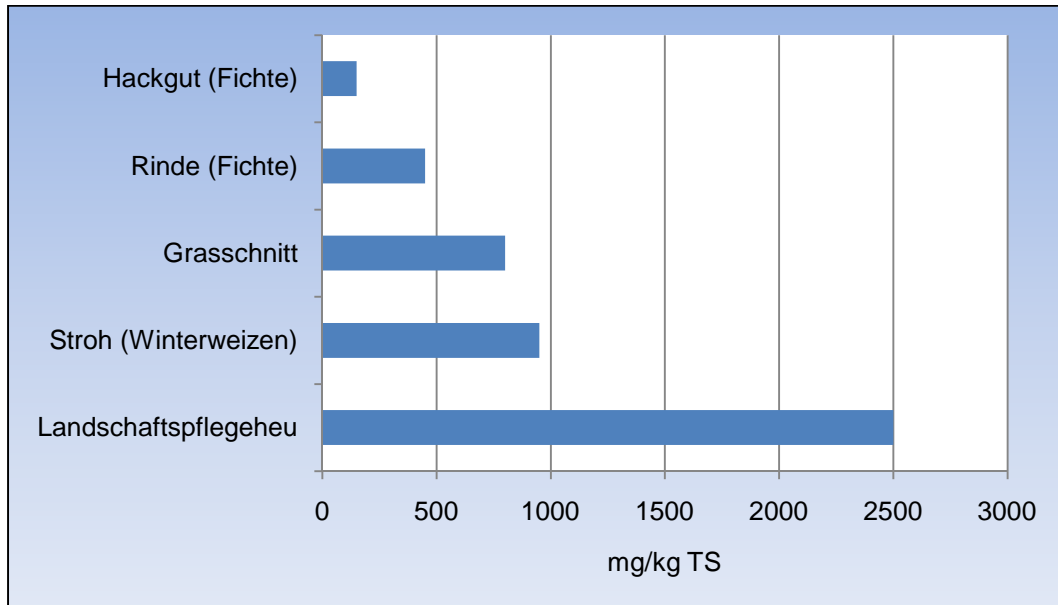


Abbildung 3-5: Schwefel-Gehalte von Biomasse-Brennstoffen [10]

Der im Brennstoff befindliche Schwefel kann in der Asche eingebunden (z.B. CaSO_4 , K_2SO_4) oder mit den Abgasen ausgetragen werden (also SO_2/SO_3 und bei unvollständiger Verbrennung auch H_2S). Die Einbindung variiert in Abhängigkeit von der Verbrennungs- und Ascheabscheidungstechnik, der Abscheidetemperatur und der Verweilzeit des Abgases im Verbrennungsraum. Die Konzentration des Schwefels in der Biomasse ist niedrig [2] [8].

Die hohen Prozentansätze dieser Elemente (Cl, K, Si) werfen auch tiefe Besorgnisse für Agglomeration in den Wirbelschichtkesseln auf. In den Biobrennstoffen sind auch Schwermetalle enthalten (z.B. Vanadium, Chrom, Kobalt, Nickel, Kupfer, Zink, Cadmium, Quecksilber und Blei) sowie andere Schadstoffe (z.B. Arsen). Es handelt sich dabei um lokal bedingte Konzentrationen umweltbelastender Elemente, die der Pflanze entweder äußerlich anhaften, oder die durch die Wurzeln aus den belasteten Böden aufgenommen werden. Diese Aufnahme erfolgt im Austausch für ladungsgleiche Komponenten, wie z.B. Calcium, dessen Platz in Komplexen eingenommen wird. Bei Cadmium wirkt sich die Bodenbelastung direkt proportional auf die Belastung der Pflanze aus [8]. Schwermetalle finden sich nach der Verbrennung als Asche, je nach Flüchtigkeit in den verschiedenen Aschefractionen wieder. Ableitung einzelner Elemente bzw. Brennstoffparameter und Auswirkungen auf Feuerungsbetrieb sind in Tabelle 3-3 gezeigt [10].

Elemente	Mögliche Auswirkungen
Chlor (Cl)	HCl – Emissionen Bildung Dioxine, Furane Bildung Aerosole (Feinstäube) Hochtemperatur – Chlorkorrosion
Schwefel (S)	SO _x – Emissionen Beitrag zur Aerosolbildung Bildung von Aschedepositionen auf Wärmetauscherrohren Korrosion
Eisen (Fe)	Mechanische Einwirkungen
Aluminium (Al)	Mechanische Einwirkungen Schädigungen Feuerungseinrichtung durch Al – Schmelzen Einbindung in Depositions – und Schlackebildungsprozesse
Silizium (Si)	Einbindung in Depositions – und Schlackebildungsprozesse
Natrium (Na), Kalium (K)	Bildung Aerosole Aschedepositionen auf Wärmetauscherrohren Einbindung in Korrosionsmechanismen
Schwermetalle: • Zink (Zn) • Blei (Pb) • Cadmium (Cd) • Quecksilber (Hg)	Reduktion Ascheschmelzpunkte Einbindung in Bildungsmechanismen harter Depositionen Schwermetallbelastung der Aschen

Tabelle 3-3: Auswirkungen einzelner Brennstoffparameter auf den Feuerungsbetrieb

Eine besondere Bedeutung wird dabei dem Verhältnis Schwefel zu Chlor beigemessen. Bei Untersuchungen von Salmenoja führten Quotienten $< 2 \text{ mol S / mol Cl}$ zu erheblichen Korrosionserscheinungen, während bei einem Verhältnis $> 4 \text{ mol S / mol Cl}$ kaum Korrosion nachgewiesen werden konnte [10].

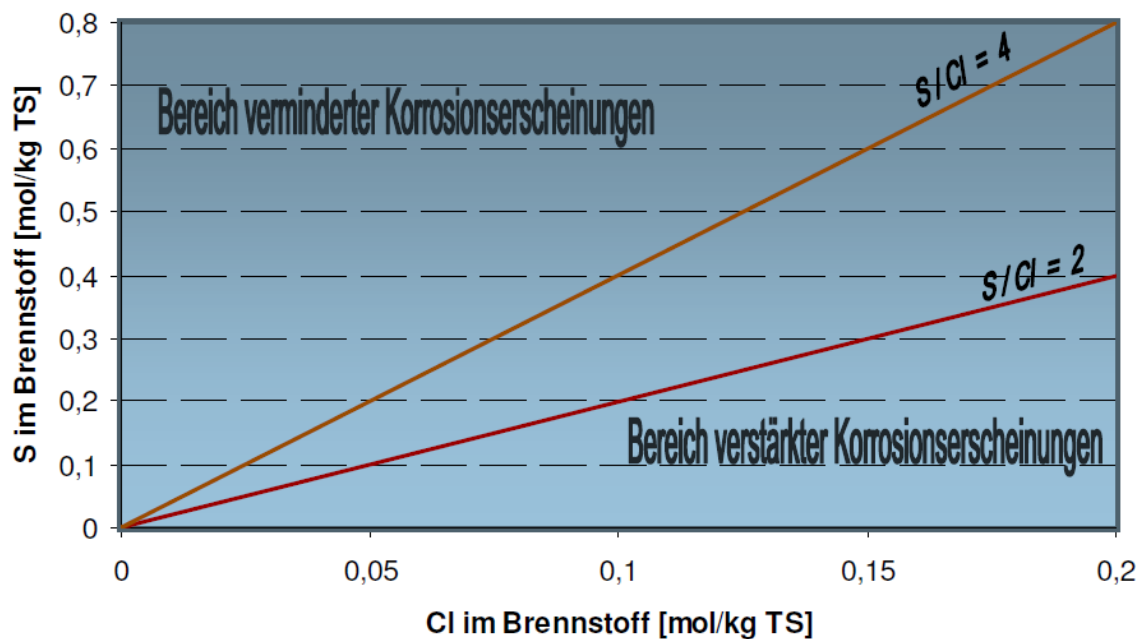


Abbildung 3-6: S- und Cl- Anteile im Brennstoff als Maß für Korrosionspotenziale [10]

Die Richtbereiche für Qualitätsparameter von Biomasse-Brennstoffen und Biomasse-Aschen hinsichtlich deren unproblematischen thermischen Nutzung sind in Tabelle 3-4 gezeigt.

Element	Richtkonzentration im Brennstoff [Gew %]	Limitierender Parameter	Problem können auftreten bei
N	< 0.6	NO _x -Emissionen	Stroh, Ganzpflanzen, Heu, Restholz, Altholz
Cl	<0.1	Korrosion, HCl-Emission	Stroh, Ganzpflanzen, Heu
S	<0.1	Korrosion	Stroh, Ganzpflanzen, Heu
Element	Richtkonzentration im der Asche [Gew %]	Limitierender Parameter	Problem können auftreten bei
Ca	15-35	Aschenschmelzpunkt	Stroh, Ganzpflanzen, Heu
Mg	>2,5	Aschenschmelzpunkt	
K	<7.0	Aschenschmelzpunkt, Ablagerung, Korrosion	Stroh, Ganzpflanzen, Heu
Na	<0.6	Aschenschmelzpunkt, Ablagerung, Korrosion	
Zn	< 0.08	Rezyklierbarkeit der Asche	Stroh, Ganzpflanzen, Heu
Cd	< 0.0005	Rezyklierbarkeit der Asche	Stroh, Ganzpflanzen, Heu

Tabelle 3-4: Die Richtbereiche für Qualitätsparameter von Biomasse-Brennstoffen und Biomasse-Aschen hinsichtlich deren unproblematischer thermischen Nutzung [21]

3.2 Die Feuerungskonzepte

Feuerungssysteme für feste Brennstoffe sind in Abbildung 3-7 gezeigt:

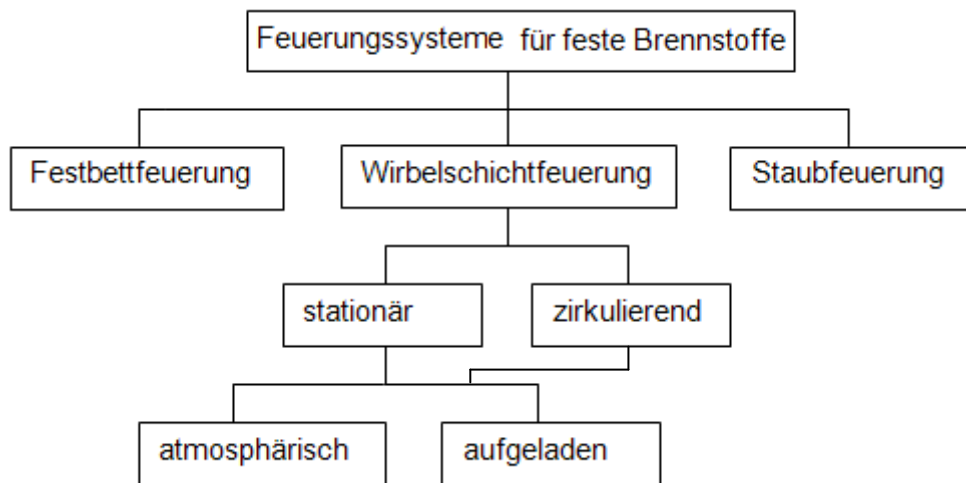


Abbildung 3-7: Feuerungssysteme für feste Brennstoffe [46]

3.2.1 Allgemeine Einteilung von Feuerungssystemen

Systeme, mit denen die chemische Energie fossiler Brennstoffe freigesetzt wird, heißen Feuerungen. Der dabei benötigte Sauerstoff wird in der Regel durch Luftzufuhr zur Verfügung gestellt. Nach dem Suspensionszustand des Brennstoffs können Feuerungen unterteilt werden in:

- Festbett – oder Rostfeuerungen
- Wirbelschichtfeuerungen
- Brennerfeuerungen (Staubfeuerung)

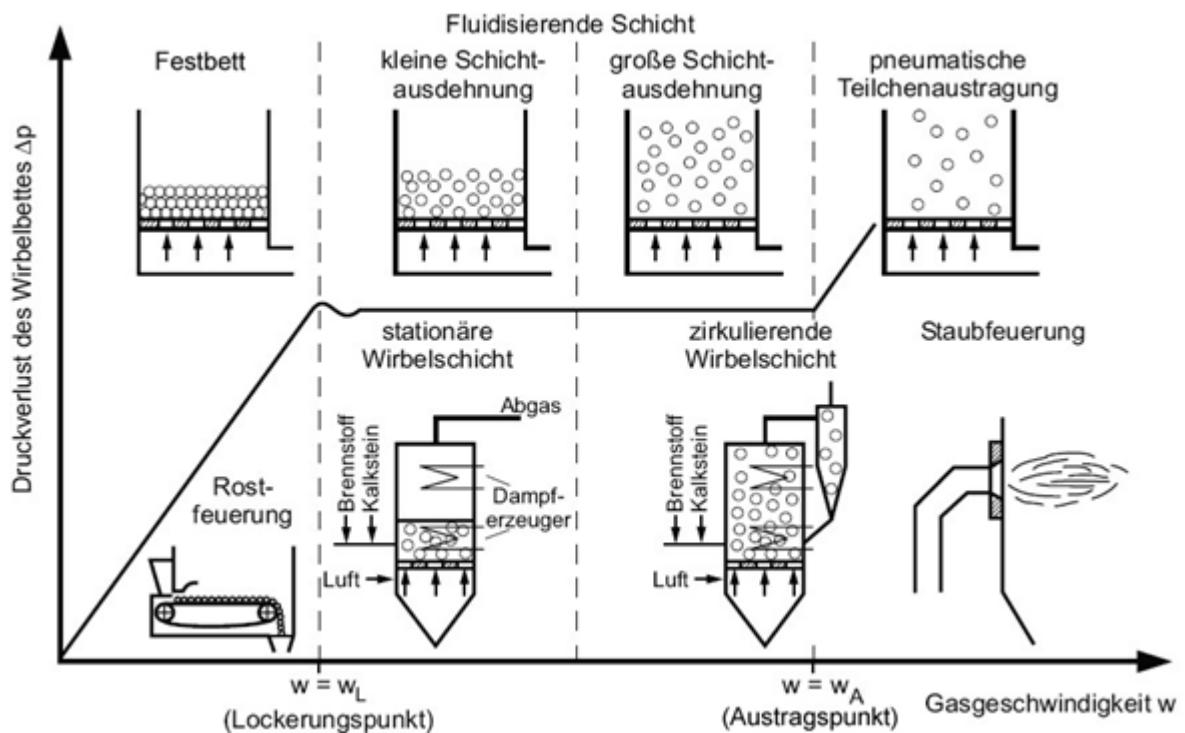


Abbildung 3-8: Einteilung der Feuerungssysteme [1]

Bereich I: Festbett

Mit zunehmender Durchstromungsgeschwindigkeit steigt der Strömungswiderstand in der Schicht an. Der Druckverlust wird größer. Die dadurch auf die Schüttung wirkenden Kräfte sind allerdings geringer als deren Gewichtskraft. Dieser Zustand entspricht den Verhältnissen bei Rostfeuerungen [1].

Bereich II: Wirbelbett

Mit Überschreitung des Lockerungspunktes reicht der Fluideintrag aus, um die Schicht zu lösen und zu tragen. Ab dieser Geschwindigkeit wird das Festbett zum Wirbelbett. Geschwindigkeitserhöhungen werden in dieser Phase durch größere Partikelabstände ausgeglichen. Die Schüttung wird fluidisiert, d.h. sie verhält sich ähnlich einer Flüssigkeit. Der Druckverlust bleibt in diesem Bereich konstant. Bei weiterer Geschwindigkeitssteigerung beginnt der pneumatische Austrag. Der Druckverlust steigt wieder an [1].

Bereich III: Pneumatischer Transport

Mit ausreichender Geschwindigkeit liegt keine Schicht mehr vor, die gesamte Schüttung wird durch den Luftstrom mitgerissen. Es findet ein pneumatischer Transport statt [1].

Rostfeuerungen, die eine Brennstoffschüttung horizontal oder mit Schrägneigung(Festbett) durchwandern, haben die Hauptanwendung im Leistungsbereich von 1 bis 30 MW_{th}. Sie sind für feste Brennstoffe und für Verbrennung auf einem festen oder beweglichen Rost geeignet. Der Brennstoff wird von unten (Primärluft) und oberhalb der Brennstoffschüttung (Sekundärluft) mit Verbrennungsluft versorgt [11].

Die Teilprozesse einer Verbrennung: Trocknung, Entgasung/Pyrolyse, Oxidation der Pyrolysegase und Ausbrand finden am Einzelkorn und für die gesamte Brennstoffschüttung aufeinander folgend, beim Durchwandern des Feuerraumes statt. Die Rostfeuerungen können sehr grobstückige Brennstoffe umsetzen, aber dann neigen sie zu unsauberer Verbrennung. Sie sind für verschiedene Brennstoffe geeignet: Kohle, Holz, Biomasse und Siedlungsabfälle. Die für die Biomasseverbrennung am häufigsten anzutreffende Rostbauart ist die Vorschubrostfeuerung. Brenngut trocknet, vergast und verbrennt während der Vorlaufzeit vollständig [11] [16].

Die Unterschubfeuerung ist für Brennstoffe mit hohem Wassergehalt geeignet. Die Unterschubfeuerungen haben die Hauptanwendung im Leistungsberiech bis ca.1 MW_{th} (bzw. 6 MW_{th}). Ihr Vorteil sind die niedrigen Investitionskosten und der Nachteil ist, dass sie nur für sehr homogene Brennstoffe mit niedrigem Aschgehalt geeignet sind.

Die Ganzballen-Feuerungen verursachen sehr hohe CO- Werte, sie sind meistens mit Rostfeuerung (z.B. mit Holzhackschnitzel) kombiniert. Problem der Ganzballen-Feuerung stellt die sehr geringer Energiedichte von Ballen dar. Runde und quaderförmige Strohballen werden unzerkleinert verbrannt, ein runder Strohballen mit 1,7 m Durchmesser brennt mit etwa 140 kW bis zu 8 Stunden [11].

Die Staubfeuerungs-Technik entspricht der Kohlenstaubfeuerung. Sie ist nur für staubförmige Brennstoffe einsetzbar und hat sehr niedrige Investitionskosten. Brennstoff wird zusammen mit dem Sauerstoffträger in die Brennkammer eingeblasen. Es ist für Gase, flüssige Brennstoffe und für fein gemahlene feste Brennstoffe geeignet [11] [16].

3.3 Wirbelschichtfeuerung

Das Prinzip der Wirbelschicht wurde 1922 von Winkler in einer Patentanmeldung zur Vergasung von Kohle erstmalig beschrieben. Sie fand danach Eingang in die chemische Industrie und erst in den 70er Jahren in die Kraftwerkstechnik als Wirbelschichtfeuerung zur Verbrennung von Kohle. Den Wirbelschichtfeuerungen wurden folgende Anforderungen gestellt [12].

- Einsatzmöglichkeit verschiedener Brennstoffe mit qualitativ breitem Spektrum
- Erreichung hoher Umwandlungswirkungsgrade durch niedrige Verluste im Feuerungsbereich
- Niedrige Schadstoffemissionen und somit hohe Umweltfreundlichkeit

Als Wirbelschicht werden jene Zustände bezeichnet, bei denen eine Schüttschicht eines Feststoffes von einem gasförmigen Medium durchströmt und die Feststoffpartikel dadurch in Schwebe gehalten werden. Bei Geschwindigkeiten, bei denen die Schüttschicht eine definierte Oberfläche behält und Feststoffteilchen nicht vom Gasstrom ausgetragen werden, spricht man von einer stationären atmosphärischen Wirbelschicht. Mit weiter steigender Geschwindigkeit kommt es zu einer weiteren Expandierung der Schicht und der Feststoff wird aus der Schüttschicht ausgetragen und im Zyklonabscheider getrennt. Wenn die abgetrennten Partikel üblicherweise über einen Siphon mit separater Fluidisierung zurück in die Brennkammer geführt werden, spricht man von zirkulierender atmosphärischer Wirbelschicht. Beide Prozesse können auch bei höherem Druck betrieben werden, dann spricht man von stationärer und zirkulierender Druckwirbelschicht [12] [43].

Weitere Vorteile von dieser Technologie sind [12]:

- intensive Wärme und Stoffaustausch in der Feststoffschicht was zu einem fast vollständigem Ausband führt
- umweltfreundliche und wirtschaftliche Verbrennungstechnologie, die eine hohe Verfügbarkeit besitzt
- feste Brennstoffe verschiedener Qualitäten, auch mit hohem Ballastgehalt zu verbrennen
- Feuerungswirkungsgrad von 96 bis 99 % zu erreichen
- die SO_2 - Emission um 80 bis 90 % durch Additivzugabe in dem Wirbelbett zu reduzieren
- Verschlackung und Verschmutzung der Heizflächen zu vermeiden
- die NO_x – Emission um 50 bis 60 % zu verringern
- Laständerung von 5 % min^{-1} zu gewährleisten

Den genannten Vorteilen stehen auch Nachteile gegenüber:

- Hoher Energiebedarf für die Fluidisierung
- Agglomeration
- Hochtemperatur – Clorkorrosion
- Fouling / Slagging

3.3.1 Funktionsweises der Wirbelschichttechnologien

Wie bereits erläutert, wird eine Schüttschicht von einem Fluid durchströmt und die Teilchen sind in ständiger Durchmischung und können sich je nach Fluidgeschwindigkeit in verschiedene Zustände einstellen. Es stellt sich ein Druckverlust in Abhängigkeit der Höhe und Porosität der Schicht, sowie Geschwindigkeit ein. Ab einer gewissen Fluidgeschwindigkeit (Lockerungsgeschwindigkeit u_L), bildet sich eine Wirbelschicht, das Bettmaterial beginnt sich fluidähnliche zu verhalten. Ab Punkt C ist der Druckabfall über das Bett konstant. In Punkt D wird die Austragggeschwindigkeit u_s erreicht und ab hier werden Feststoffpartikel aus der Wirbelschicht ausgetragen (siehe Abbildung 3-9).

Der Druckverlust errechnet sich nach (3-1), die aus dem Gleichgewicht zwischen der Widerstandskraft vom Fluid auf den Feststoff und der, um die Auftriebskraft verminderte, Schwerkraft hergeleitet wird [43].

$$\Delta p_L = (\rho_p - \rho_f) \cdot (1 - \epsilon) \cdot g \cdot H \quad (3-1)$$

ρ_p	....	Dichtes des Partikels
ρ_f	....	Dichte des Fluides
ϵ	....	Porosität
g	....	Erdbeschleunigung
H	....	Höhe der Schüttschicht

Porosität ist das Verhältnis des Zwischenkornvolumens (Gesamtvolumen – Partikelvolumen) zum Gesamtvolumen der Schicht. Bei konstanter Porosität der Schicht steigt der Druck stetig bis zum Punkt B, dem Lockerungspunkt an. Ein Abfall des Druckverlusts bis zum Punkt C ist wegen den Haltekräften zwischen den Teilchen. Mit steigender Geschwindigkeit haben wir eine stärkere Wirbelbewegung, und der Lückenvolumen zwischen den Teilchen nimmt auch zu [12].

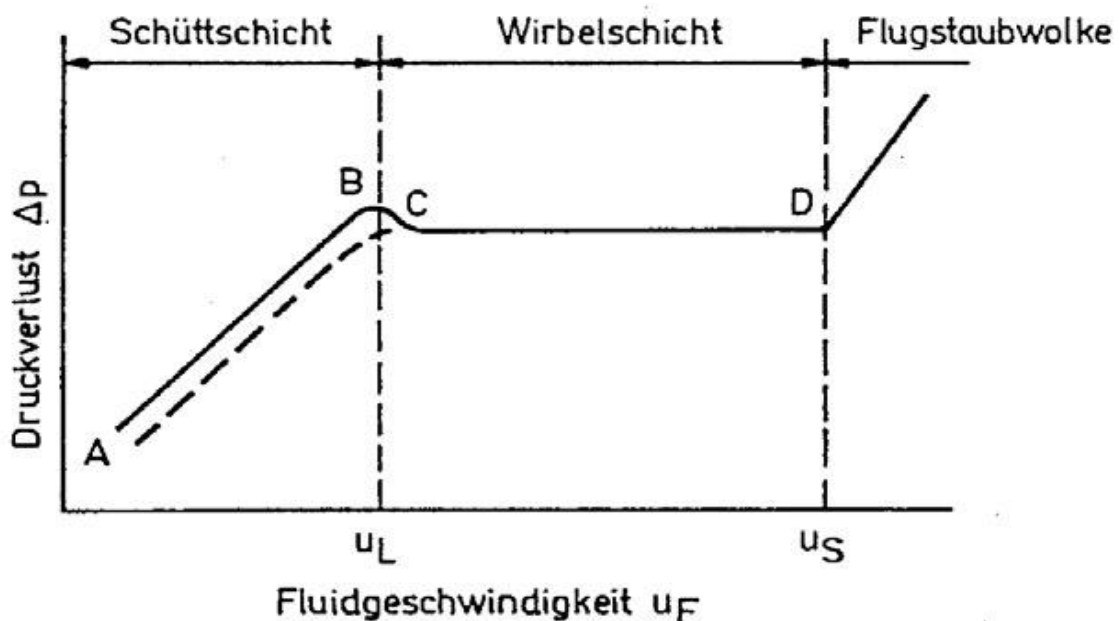


Abbildung 3-9: Druckverlust in einer körnigen Schicht in Abhängigkeit der Fluidgeschwindigkeit [12]

Damit sind die Lockerungsgeschwindigkeit und die Austragggeschwindigkeit die wichtigen Größen für die Wirbelschichten. Für stationäre Wirbelschicht gilt $u_L \leq u_B \leq u_S$ und für zirkulierende Wirbelschicht $u_S < u_B$ [12].

u_S Austragggeschwindigkeit

u_B Betriebsgeschwindigkeit

u_L Lockerungsgeschwindigkeit

3.3.2 Fluidisierungsregime

Je nach Partikeleigenschaften, Gaseigenschaften und Fluidodynamik stellen sich im Reaktor verschiedene Fluidisierungszustände ein [15].

Fluidisierungszustand	Merkmale
Festbett	Die Partikel bilden ein Festbett und bewegen sich nicht. Das Gas strömt durch die Zwischenräume hindurch.
Blasenfreie Wirbelschicht	Das Bett dehnt sich gleichmäßig und ruhig aus. Die Bettoberfläche ist klar definiert. Es herrschen sehr geringe Druckschwankungen.
Blasenbildende Wirbelschicht	Am Düsenboden bilden sich Gasblasen, die nach oben steigen. Die Bettoberfläche ist noch immer klar definiert. Die Blasengrößen steigen mit der Leerrohrgeschwindigkeit.
Stoßende Wirbelschicht	Die Gasblasen füllen den Großteil des Bettquerschnitts aus. Die Bettoberfläche hebt und senkt sich mit den zerplatzenden Blasen.
Turbulente Wirbelschicht	Die Blasenphase stellt die kontinuierliche Phase dar. In der Gasphase finden sich verteilt Feststoffstrahlen vor. Eine Bettoberfläche ist nicht sichtbar.
Schnelle Wirbelschicht	Bettmaterial wird ausgetragen und muss, um die Wirbelschicht aufrecht zu halten, wieder in den Reaktor zurückgeführt werden.
Pneumatischer Transport	Es bildet sich kein sichtbares Wirbelbett mehr aus. An den Wänden können sich Partikelstrahlen bilden. Hier wird am meisten Bettmaterial ausgetragen.

Tabelle 3-5: Fluidisierungszustände [15]

Bei Wirbelschichten können folgende Erscheinungsformen auftreten, abhängig von der Gasstromgeschwindigkeit.

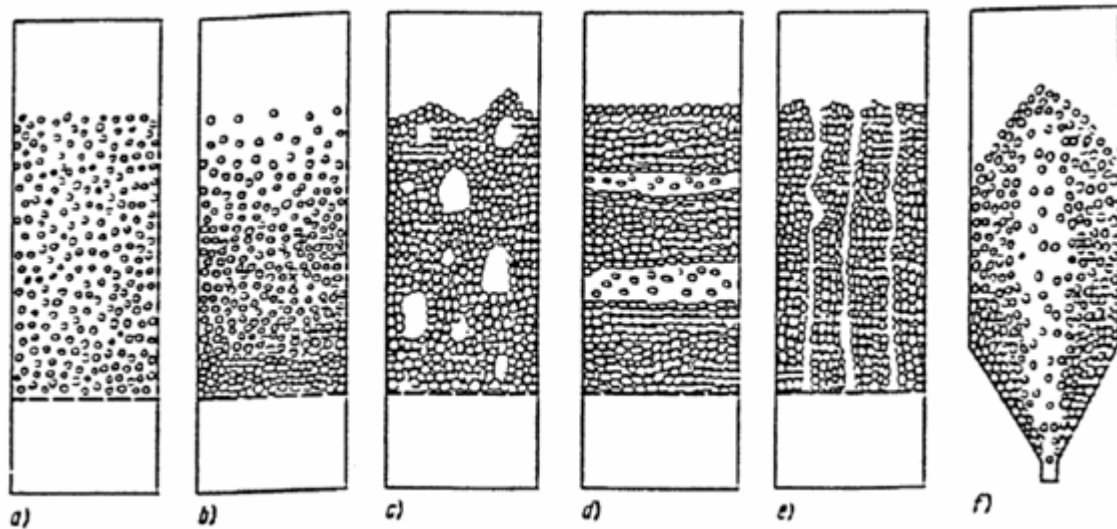


Abbildung 3-10: Fluidisierungsregime [49]

- | | | | |
|----|----------------------------|----|------------------------------|
| a) | homogene Wirbelschicht | d) | stoßende Wirbelschicht |
| b) | klassierende Wirbelschicht | e) | gassenbildende Wirbelschicht |
| c) | brodelnde Wirbelschicht | f) | Sprudelschicht |

Homogene Wirbelschicht entsteht, wenn in einem Kontrollvolumen die Feststoffkonzentration an jedem Ort innerhalb der Schicht und zu jeder Zeit gleich ist. In Praxis ist das kaum realisierbar. Bei inhomogenen Wirbelschichten ist die Feststoffkonzentration im Kontrollvolumen variabel [17].

In der Praxis sind blasenbildende Wirbelschichten häufig vertreten. Dabei durchströmt das Fluid unter Blasenbildung die Schüttung, wobei die Blasen über die Höhe der Schicht koalieren und demnach wachsen. Stoßende Wirbelschichten bilden derart große Blasen, dass deren Dimension zeitweise einen großen Teil des Strömungsquerschnittes einnehmen. Der Feststoff wird dabei wie ein Kolben von der Blase geschoben. Diese Art tritt vor allem bei kleinen Bettdurchmessern auf und ist in der Regel unerwünscht. Die gassenbildende Wirbelschicht ist die Übergangsform der gassendurchbohrten Schüttung. Es herrschen keine typischen Wirbelschichteigenschaften [17].

Die Blasen in der Wirbelschicht sind hauptverantwortlich für die gute Feststoffdurchmischung. Dabei werden die Partikel auf zwei Arten transportiert [15]:

- Partikel werden in Nachlauf der Blase (wake) nach oben transportiert. Gelangt die Blase an die Bettoberfläche, zerplatzt sie und die Partikel im Nachlauf werden zur Seite geschleudert. Während des Aufstiegs der Blase kann es vorkommen, dass Partikel „verloren“ gehen. Dieses Phänomen wird shedding genannt und führt zu einer horizontalen Durchmischung.
- In der Schleppe (drift) werden die Partikel nur vertikal durchmischt.

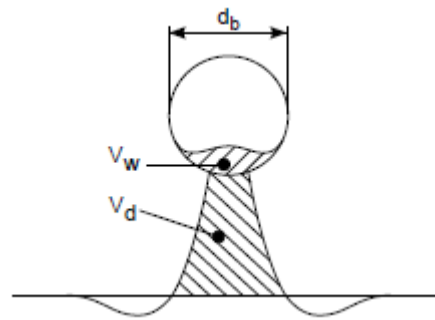


Abbildung 3-11: Mechanismen des Partikeltransports in einer Wirbelschicht [15]

In der Wirbelschicht bilden sich Zonen aus, in denen die Blasen bevorzugt aufsteigen, und solche in denen sie nur vereinzelt auftreten. Dabei wird das Bettmaterial nach oben transportiert und gelangt in die Zone, mit niedriger Blasendichte, wo es wieder nach unten fällt.

3.3.3 Zustandsdiagramm

Um die Strömungszustände charakterisieren zu können, bedient man sich des Reh-Diagrammes. Man kann mit der Hilfe von dimensionslosen Kennzahlen die verschiedenen Ausprägungsformen von Gas-Feststoffströmungen darstellen. Als Kennzahlen sind definiert [43]:

Reynolds -Zahl

$$\text{Re} = \frac{u_L \cdot d_p}{\nu_F} \quad (3-2)$$

Froude- Zahl

$$\text{Fr}_p = \frac{u^2}{g \cdot d_p} \quad (3-3)$$

Archimedes -Zahl

$$\text{Ar} = \frac{d_p^3 \cdot g}{\nu_F^2} \cdot \frac{\rho_p - \rho_G}{\rho_G} \quad (3-4)$$

Beranek –Zahl

$$\Omega = \frac{u^3}{\nu_F \cdot g} \cdot \left(\frac{\rho_F}{\rho_p - \rho_F} \right) \quad (3-5)$$

Die Reynolds- Zahl stellt das Verhältnis von Trägheit- zu Zähigkeitskräften dar. Die Froude-Zahl ist ein Maß für das Verhältnis von Trägheits- zur Schwerkraft. Archimedes-Zahl kann als das Verhältnis zwischen Auftriebs- und Trägheitskraft eines umströmten Partikels interpretiert werden oder als die Bewegung von Partikeln in Gasen.

Die Beranek- Zahl stellt ein Maß für die Gasbelastung dar. Diese Parameter können in Form des sogenannten Reh- Diagramms miteinander in Verbindung gebracht werden und mit Hilfe der Kennzahlen kann der Existenzbereich von Schüttschicht sowie stationäre und zirkulierende Wirbelschicht gekennzeichnet werden [43].

u_L	....	<i>Lockerungsgeschwindigkeit</i>
u	....	<i>Strömungsgeschwindigkeit</i>
ν_F	....	<i>Viskosität des Fluides</i>
d_p	....	<i>Partikeldurchmesser</i>
ρ_p	....	<i>Dichte des Partikels</i>
ρ_F	....	<i>Dichte des Fluides</i>

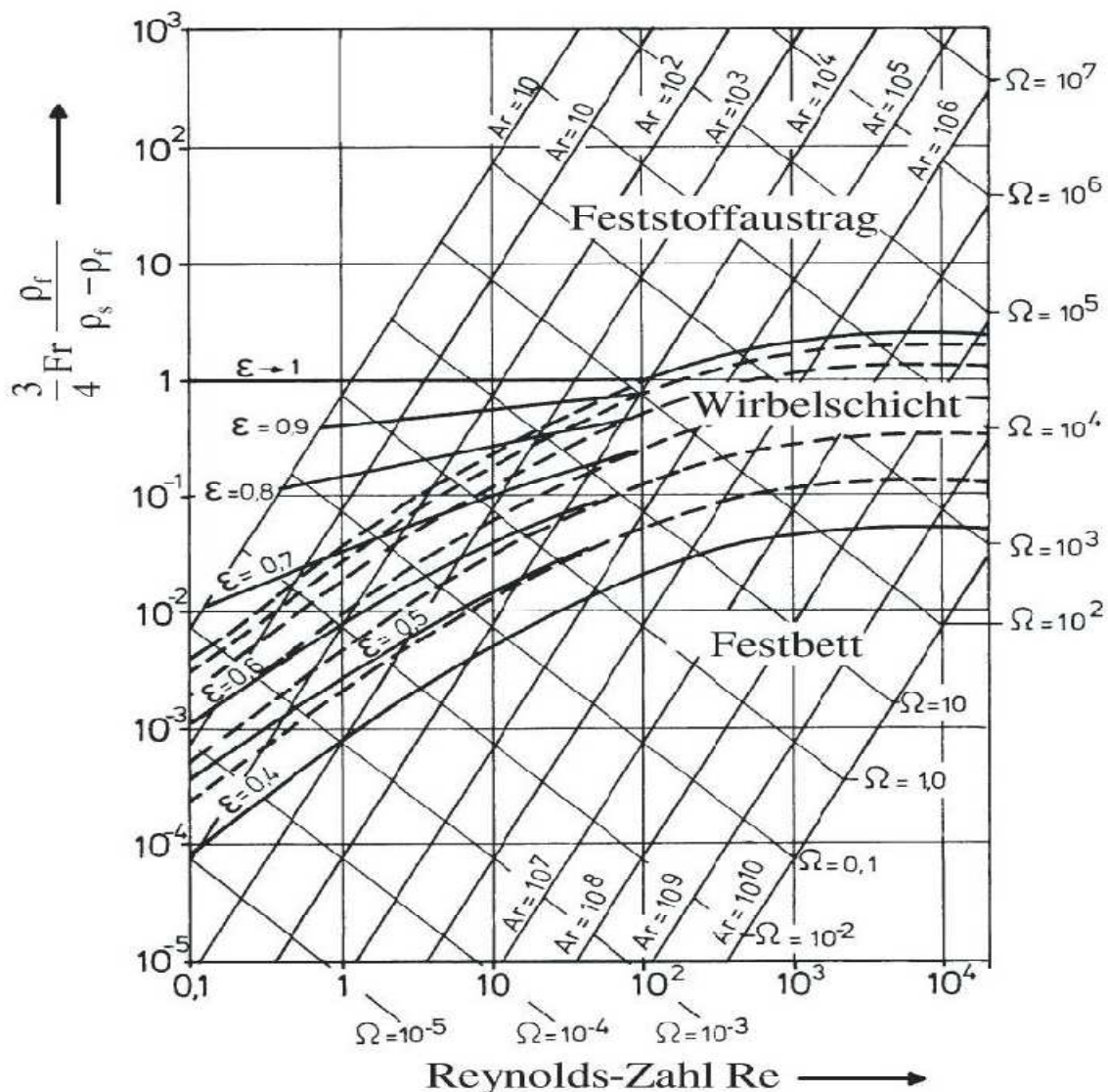


Abbildung 3-12: Reh-Diagramm [14]

Im Reh-Diagramm ist auf der Ordinate die Froude-Zahl des Partikels Fr_p , multipliziert mit dem Verhältnis der Gasdichte zur Dichtedifferenz zwischen Festpartikel und Gas, und auf der Abszisse ist die Reynolds-Zahl aufgetragen (siehe Abbildung 3-12).

Um die Wirbelgeschwindigkeit u_L zu bestimmen, bringt man die Linie konstanter Archimedeszahl (Ar) für das entsprechende Korngemisch zum Schnitt mit der Linie der gewünschten Porosität und aus der sich ergebenden Reynolds-Zahl (Re) kann die Geschwindigkeit u_L errechnet werden. Die Linie $\epsilon = 0,4$ grenzt das Festbett von der Wirbelschicht ab. Arbeitsbereich der Wirbelschicht liegt zwischen der $\epsilon = 0,4$, und der $\epsilon = 1$ Linie. Über der gestrichelten bzw. ausgezogenen $\epsilon = 1$ Linie findet ein Totalaustrag aus der Wirbelschicht statt [13] [12].

3.4 Stationäre Wirbelschichtfeuerungen

Bei stationären Wirbelschichten liegt die Wirbelgeschwindigkeit bei 1- 2 m / s und ist damit um das zwei- bis dreifache höher als die Lockerungsgeschwindigkeit. Bei diesen Geschwindigkeiten ergibt sich ein Schwebезustand und es liegt eine definierte Betthöhe von typischerweise 1 bis 1,5 m vor. Dabei erfolgt in der Regel nur ein geringer Partikelaustrag bestehend aus Staub und Feinkorn, d.h. durch thermische und mechanische Einflüsse zerkleinerte Schüttungsbestandteile.

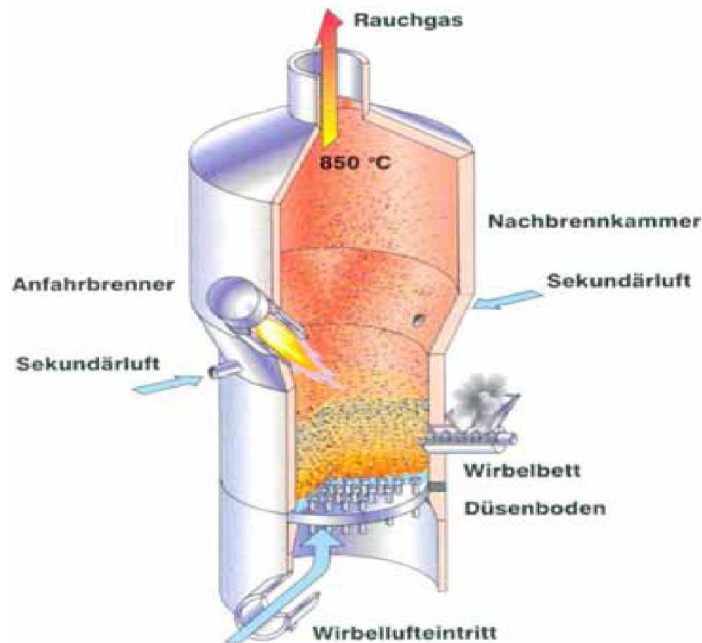


Abbildung 3-13: Aufbau einer stationären Wirbelschicht [10]

Der Betriebsbereich einer stationären Wirbelschicht ist durch folgenden Kennzahlbereich eingesetzt [1]:

$$50 < Ar < 104 \text{ und } 102 < Fr < 5 \cdot 10^3 \quad (3-6)$$

Ar = Archimedes-Zahl

Fr = Froudes-Zahl

Charakteristische Daten von stationären Wirbelschichtfeuerungen:

Charakteristische Daten	Einheit	atmosphärisch	aufgeladen
Typische Geschwindigkeit	[m/s]	0...2,5	0.5...3
Typische Feststoffverweilzeiten	[h]	0,2...1	- -
Mindestluftbedarf		1,1...15	1,2...1,5
Maximale Feuerungstemperatur	[°C]	bis 1.000	750...900
Partikelgrößen	[mm]	1 ...20	1 ...20
Mittlere Partikelgröße	[mm]	2	2

Tabelle 3-6: Charakteristische Daten von stationären Wirbelschichtfeuerungen [46]

Ein Vorteil der stationären Wirbelschicht besteht darin, dass keine besondere Brennstoffaufbereitung erfordert ist – es reicht den Brennstoff auf Korngröße, kleiner als 10 mm, zu brechen. Die Querschnittsbelastung liegt bei 1,2 – 1,6 MW/m² und hat damit dieselbe Größenordnung wie bei der Rostfeuerung. Hauptsächlich aus Gründen der Bettabmessungen eignet sich dieser Feuerungstyp deshalb nur für kleinere Anlagen bis etwa 80 MW_{th} [10].

3.5 Zirkulierende Wirbelschichtfeuerungen

Neben der blasenbildenden, stationären Wirbelschichtfeuerung werden für größere Leistungsbereiche (typisch ab 100 MW_{th}) Anlagen mit zirkulierender Wirbelschicht eingesetzt. Zirkulierende Wirbelschichten werden mit Leerrohrgeschwindigkeit oberhalb der Sinkgeschwindigkeit der einzelnen Partikel betrieben. Dies bedingt Gasgeschwindigkeiten bis zu etwa 9 m/s [10]. Generell kann ein großer Brennstoffbereich abgedeckt werden. Die Leistungsgrenze ist bei ca. 1000 MW_{th}. Bei diesen Bedingungen liegt keine definierte Schichtoberfläche mehr vor, die Feststoffbeladung in der Brennkammer nimmt nach oben hin stetig ab. Daraus ergibt sich eine intensive Durchmischung der Feststoffe. Um einen Materialverlust der Schüttung zu vermeiden, werden die ausgetragenen Partikel zurückgeführt. Diese Zirkulation kann intern im Feuerraum oder ausgegliedert, extern, erfolgen [10].

Charakteristisch für extern zirkulierende Wirbelschichten ist die dem Feuerraum nachgeschaltete Trennung der ausgetragenen Partikel aus dem Rauchgas durch einen Zyklonabscheider. Die abgetrennten Partikel werden üblicherweise über einen Siphon mit separater Fluidisierung zurück in die Brennkammer geführt.

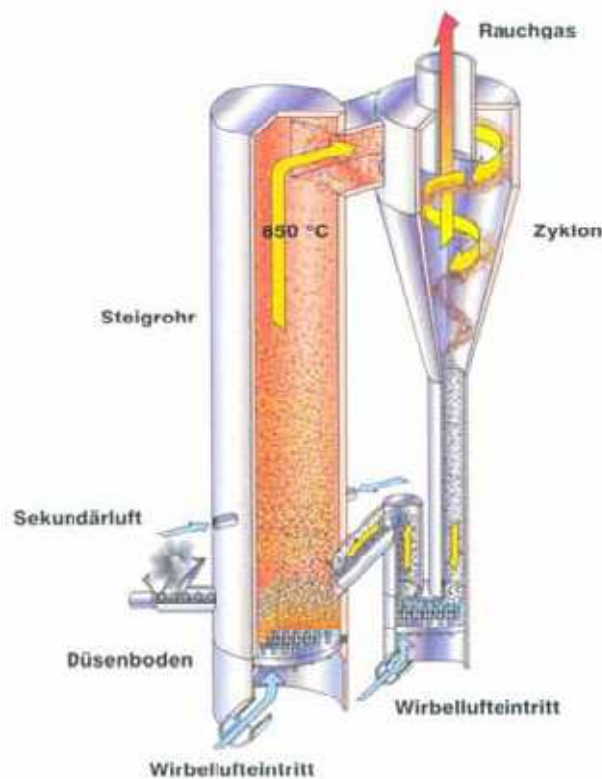


Abbildung 3-14: Aufbau einer zirkulierenden Wirbelschicht [10]

Der Brennstoff bei stationären Wirbelschichtfeuerungen kann entweder oberhalb des Bettes eingeworfen oder unmittelbar in das Bett eingeschoben werden. Bei Überbetteintrag können Feinanteile stärker mitausgetragen werden und so den unverbrannten Feststoffanteil erhöhen. In zirkulierenden Wirbelschichten sind ebenfalls beide Aufgabenmöglichkeiten realisierbar, eine klare Zuordnung ist allerdings aufgrund der fehlenden Bettoberfläche schwer möglich [10].

Die Betriebsbereich einer zirkulierenden Wirbelschicht ist durch folgende Kennzahlenbereiche eingegrenzt [1]:

$$100 < Ar < 104 \text{ und } 103 < Fr < 105$$

Der wesentliche Vorteil einer zirkulierenden Wirbelschicht ist die Temperaturkonstanz im gesamten Feststoffkreislauf, die durch die große umlaufende Feststoffmasse mit ihrer hohen Wärmekapazität verursacht wird.

Charakteristische Daten von zirkulierenden Wirbelschichten:

Charakteristische Daten	Einheit	
Typische Geschwindigkeit	[m/s]	8 ...10
Typische Feststoffverweilzeiten	[h]	0,05 ...0,2
Mindestluftbedarf		1,1 ...1,3
Maximale Feuerungstemperatur	[°C]	bis 1.000
Partikelgrößen	[mm]	0,15 ...20
Mittlere Partikelgröße	[mm]	0,25

Tabelle 3-7: Charakteristische Daten von zirkulierenden Wirbelschichten [46]

Bei einer zirkulierenden Wirbelschicht ist die Gasgeschwindigkeit so gewählt, dass ein Umlauf des Bettmaterials erzielt wird. Im Gegensatz dazu verbleibt bei einer stationären Wirbelschicht das Bett im Reaktorgefäß. Neben diesen beiden atmosphärischen Wirbelschichttechnologien gibt es die druckaufgeladene Wirbelschichttechnologie. Sie wird z.B. als festbrennstoffbetriebene Brennkammer in Gasturbinenprozessen angewendet. Diese Technologie befindet sich aufgrund der nicht gelösten heißen Gasreinigung zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch im Entwicklungsstadium [10].

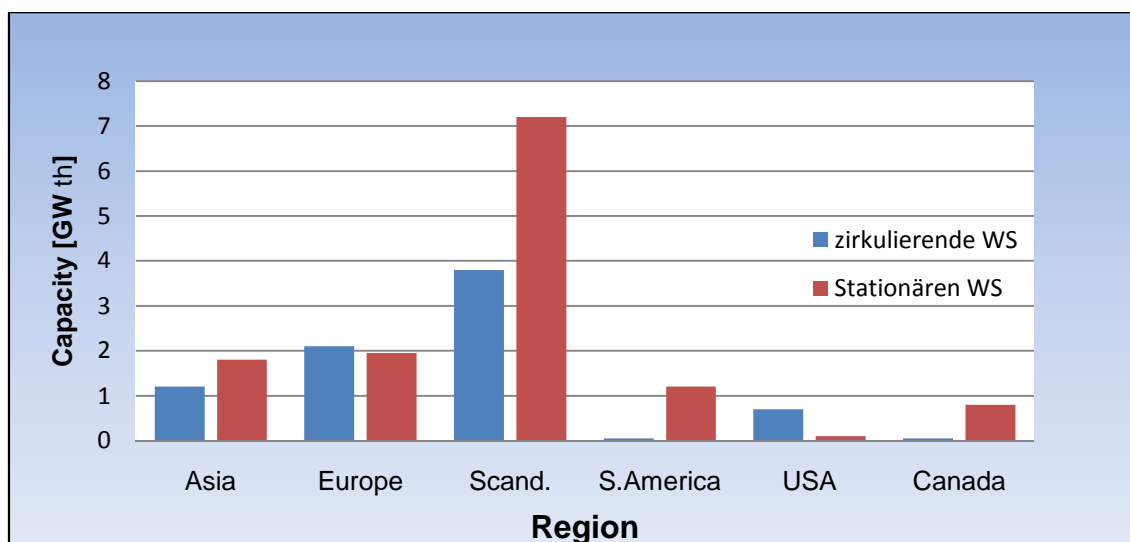


Abbildung 3-15: Regionale Unterschiede beim Einsatz von Biomasse in zirkulierende und stationären Wirbelschichtfeuerungen [6]

In der Abbildung 3-15 erkennt man die regionalen Unterschiede im Einsatz von Biomasse. Besonders in den skandinavischen Ländern und Europa wird Biomasse gerne eingesetzt. Im Vergleich zwischen der zirkulierenden und der stationären Wirbelschichttechnologie gibt es signifikante Unterschiede. Die stationäre Wirbelschicht wird überwiegend mit Biomassen und Reststoffen beschickt. Für die absoluten Mengen sind die jeweiligen Skalierungen zu beachten [6].

Tabelle 3-8 stellt die Vorteile, Nachteile und Einsatzbereiche von stationären und zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungen im Überblick dar. Hinsichtlich der zu erwartenden gasförmigen Emissionen dieser Systeme kann festgehalten werden, dass, nach derzeitigem Stand der Technik, Wirbelschichtfeuerungen niedrigere CO- und NOx-Emissionen verursachen und Rostfeuerungen weisen niedrigere Staubemissionen und eine besser ausgebrannte Flugasche auf [62].

Stationäre Wirbelschichtfeuerungen	
Vorteile	Nachteile
Moderate Investitionskosten für Anlagen >10M W_{th}	Hohe Betriebskosten
Keine bewegten Teile im heißen Feuerraum	Höhere Staubbilddung im Rauchgas
Effiziente NOx Reduktion durch Luftstufung	Teillastbetrieb erfordert spezielle Technologie
Hohe Flexibilität bezüglich Korngröße, Wassergehalt und Art des Biomasse-Brennstoffs	Mittlere Anfälligkeit bezüglich Aschenschmelze
Niedriger O ₂ -Überschuß erhöht den Wirkungsgrad	Mittlere Anfälligkeit bezüglich Erosion der Wärmetauscherrohre im Wirbelbett
	Verlust von Bettmaterial mit Asche
Zirkulierende Wirbelschichtfeuerungen	
Vorteile	Nachteile
Keine bewegten Teile im Heißen Feuerraum	Hohe Investitionskosten (erst ab Anlage > 30 MW _{th} interessant)
Hohe Flexibilität bezüglich Wassergehalt und Art der Biomasse- Brennstoffe	Hohe Betriebskosten
Effiziente NOx Reduktion durch Luftstufung	Niedrige Flexibilität bezüglich der Brennstoff-Korngröße
Homogene Verbrennungsbedingungen im Feuerraum	Hohe Staubbilddung im Rauchgas
Hohe Wärmeübertragung durch die hohe Turbulenz	Mittlere Anfälligkeit bezüglich Erosion der Wärmetauscherrohre
Zugabe von Additiven einfach	Verlust von Bettmaterial mit der Asche
Effiziente S –Einbindung in die Asche, wenn genug Ca vorhanden ist	Hohe Anfälligkeit bezüglich Aschenschmelze

Tabelle 3-8: Überblick über die Vorteile und Nachteile von stationären und zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungen [62]

3.6 Wirbelschichtanlagen in Österreich

Tabelle 3-9 wird der aktuelle Stand der Wirbelschichtfeuerungsanlagen in Österreich mit dem wichtigsten Merkmalen gezeigt.

Die Nutzung des Biomassepotenzials in Österreich könnte den Biomasseeinsatz bis 2020 auf 256 PJ erhöhen [48].

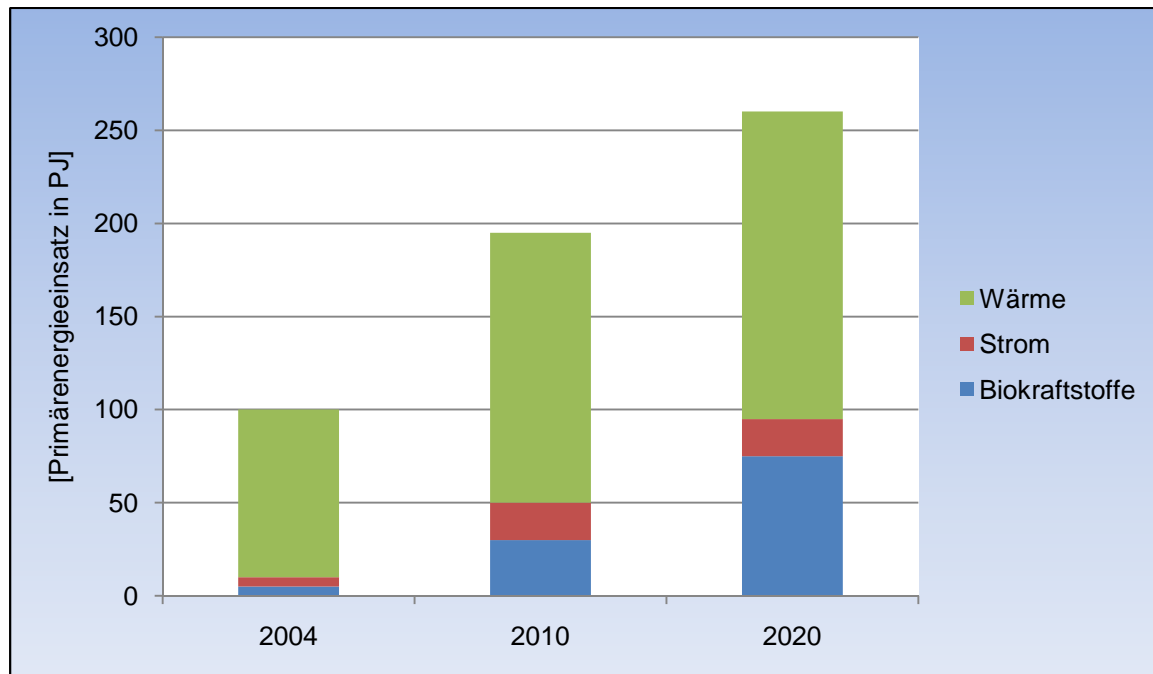


Abbildung 3-16: Biomasseeinsatz in Österreich in den Jahren 2004 und Prognose für 2010 und 2020 [48]

Die Ökostromproduktion auf Basis von Biomasse hat einen starken Zuwachs. Die Produktion im Jahr 2003 waren 218 GWh und sie kann bis zu 4 TWh im Jahr 2013 ansteigen. Es lässt sich abschätzen, dass zusammen mit der Ökostromproduktion von 3,2 TWh im Jahr 2010 bis zu 5,6 TWh Nutzwärme anfallen. Ziel ist den Anteil erneuerbarer Energie bis 2050 auf 85 % zu nutzen, und dass ist nur durch eine massive Steigerung der Effizienz möglich [48].

Wirbelschichttechnologie wird in Österreich vor allem zur dezentralen Wärme- und Stromerzeugung eingesetzt. Die thermische Nutzung von Reststoffen vor allem aus gewerblichen Produktionsprozessen, wie der Papier- und Zellstoffindustrie ist als Ziel eingesetzt. Typische Brennstoffe sind Rinde, Holzabfälle, Kohlen mit niedrigen Heizwerten, flüssigen Konzentraten (Emulsionen, Öle), Schlämmen und seit kurzem auch Kunststoffe, Hausmüll und Klärschlamm. Die Leistungsbereiche liegen typischer Weise zwischen 14 bis 133 MWth (Feuerungen) und 8 bis 10 MWth (Gaserzeugung) [6].

Ort	Jahr	Typ	Wärmeleistung	Brennstoffe
Gratkorn	1981	CFBC	25 MW	Rinde, Schlamm, Biogas, Erdgas
Gratkorn	1986	CFBC	133 MW	Kohle, Schlamm, Biogas, Erdgas
Bruck a.d. Mur	1984	BFBC	15 MW	Rinde, Kohle, Schlamm, Biogas, Erdgas
Zeltweg	1998	CFBG	10 MW	Holz
Niklasdorf	2004	BFBC	40 MW	MSW, Industrieabfall, Holzabfälle, Klärschlamm
Lenzing	1987	CFBC	108 MW	Rinde, Kohle, Schlamm, Altholz, Öle
Lenzing	1998	CFBC	110 MW	Kunststoff, Abfall, Schlamm, Altholz
Ebensee	1987	CFBC	43 MW	Kohle, Holzabfälle
Steyrermuehl	1994	CFBC	48 MW	Rinde, Holz, Altholz, Schlamm
Timelkam	2006	FBC	49 MW	Holz, Altholz, Rinde, Sägemehl
Hallein	2006	BFBC	30 MW	Holzhackschnitzel
St. Gertaud im Lavanttal	1984	CFBC	61 MW	Rinde, Kohle, Klärschlamm, Schweröl
St. Veit a.d. Glan	1990	FICFBC	33 MW	Rinde, Schlamm, Sägemehl, Holzabfälle, Kunststoff
Arnoldstein	2000	FBC	8 MW	Öle, Emulsionen, Holzabfälle, Schlamm, Kunststoff
Pitten	1984	BFBC	65 MW	Kohle, Biogas, Klärschlamm
Bad Vöslau	2003	BFBC	1 MW	Klärschlamm
Wien	1992	FBC	3 x 25 MW	Klärschlamm
Wien	2003	RFBC	40 MW	Hausmüll, Klärschlamm
Wien –Simmering	2006	CFBC	66 MW	Waldrestholz
Heiligenkreuz	2006	BFBC	43 MW	Waldrestholz
Güssing	2001	FICFB	8 MW	Holzhackschnitzel, Holzabfälle
Oberwart	2008	FICF	10 MW	Holzhackschnitzel

Tabelle 3-9: Industrielle Wirbelschichtfeuerungen in Österreich [6]

BFBC	....	bubbling fluidized bed combustor	CFBC	....	circulating fluidized bed combustor
FICFBC	....	fast internal circulating fluidized bed combustor	CFBG	....	circulating fluidized bed gasifier
DFBG	....	dual fluidized bed gasifier	RFBC	....	rotating fluidized bed combustor

4 Ascheproblematik in biomassegefeuerten Wirbelschichtanlagen

Die Wirbelschichtfeuerungen sind geeignet für eine Vielzahl unterschiedlicher Brennstoffe und Biomassen, die man in konkurrierten Systemen nicht nutzen kann. Sie können niederkalorische, aschenreiche Brennstoffe verfeuern, niedrige Verbrennungstemperatur (meist 800- 900°C) ermöglichen und geringe Emission verursachen. Weitere Vorteile sind, dass ideale Durchmischung im Wirbelbett und keine lokale Überhitzungen zu erwarten sind. Zusätzliche Probleme entstehen allerdings dadurch, dass vor allem Brennstoffasche, mit hohem Alkali- und Erdalkalianteil, an den Partikeln des Bettmaterials niedrige schmelzende Eutektika bilden. In diesem Kapitel wird über die Aschenprobleme und über die Mechanismen, die Auswirkungen und mögliche Gegenmaßnahmen diskutiert [22].

4.1 Charakterisierung der Biomasseaschen

Die Biomasseklassifizierung nach Eigenschaften lässt sich in sechs Kategorien einteilen (siehe Kapitel 4.1.2) und jede Biomasse aus dieser Gruppe zeichnet sich durch besondere Eigenschaften aus:

- Zusammensetzung
- Verbrennungsverhalten
- entstehende Asche

Weiteres ist hier interessant: Heizwert, der Anteil an Inertmaterial (Asche und Wassergehalt), Anteil der Flüchtigen und Gehalt von Chlor, Stickstoff oder Schwefelgehalt. Die Asche ist anteilig meist die kleinste Biomassekomponente. Je nach chemischen und physikalischen Eigenschaften verbleiben sie im Brennraumbereich, oder werden als Staub mit dem Rauchgas ausgetragen und sammeln sich in Zyklonen und Feistaubfiltern an. Nach den Aschebestandteilen ergeben sich unterschiedliche Erweichungs- und Schmelztemperaturen [8].

4.1.1 Aschebestandteile

Hauptbestandteile von Biomasseaschen sind: SiO_2 , CaO und K_2O , wie man in der Abbildung Abbildung 4-1 erkennen kann.

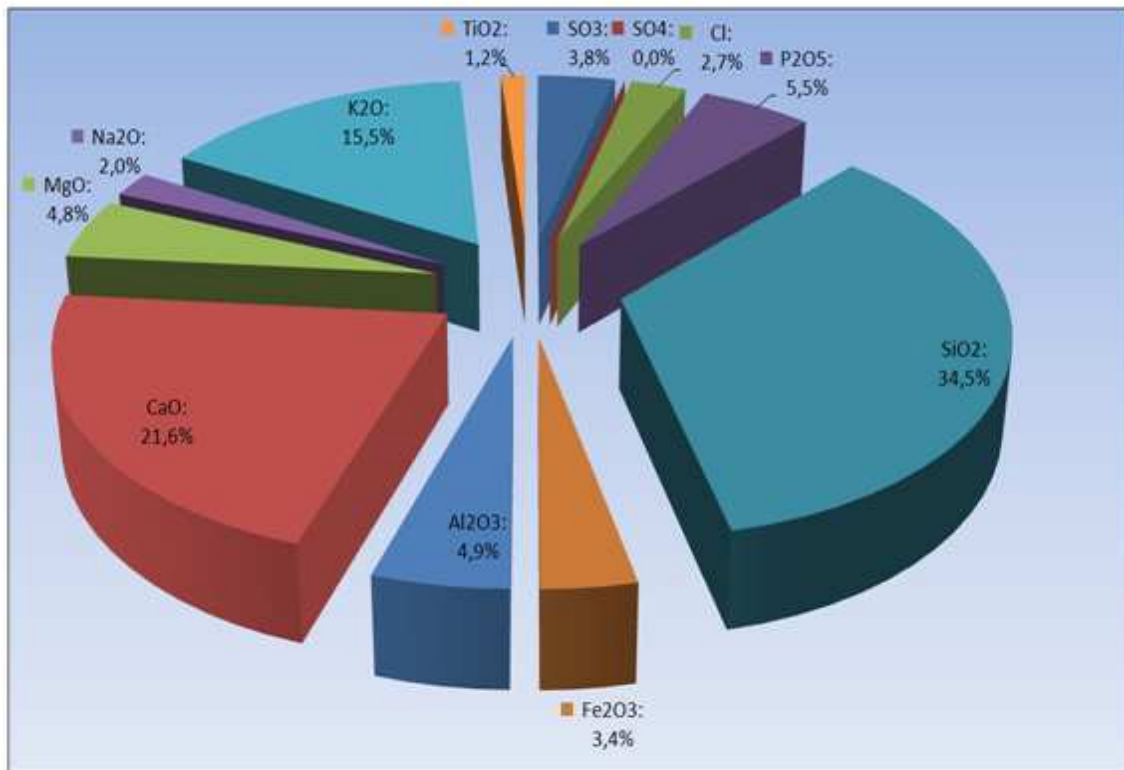


Abbildung 4-1: Aschezusammensetzung von 340 Biomassen [29]

In Abbildung 4-2 sind typische Zusammensetzungen von Biomasseaschen mit acht der wichtigsten Inhaltsstoffen gezeigt.

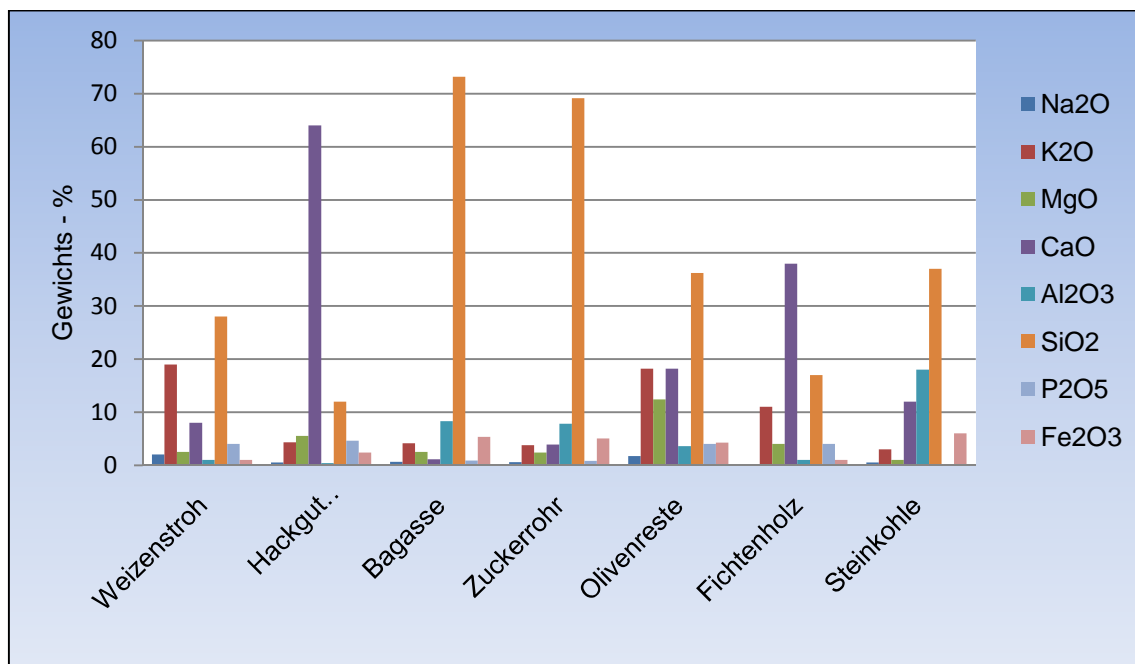


Abbildung 4-2: Typische Werte für die Zusammensetzung von Aschen, berechnet als Oxide [18] [29]

Hauptbestandteile der Biomasseaschen sind Erdalkalimetalle (Kalzium, Magnesium), Silizium, Alkalien (Kalium, Natrium), sowie Phosphor, Schwefel und einige metallische Komponenten (Eisen, Aluminium, etc.). Ihre relative Häufigkeit lässt sich wieder verschiedenen Biomassekategorien zuordnen, so ist in halmgutartiger Biomasse der Anteil an Alkalien sehr hoch, während Holz und holzartige Biomassen hohe Gehälter an Kalzium aufweisen. Man konnte eine große Anzahl verschiedener Biomassen mittels Hauptkomponentenanalyse in vier Sektoren einteilen [18].

Man erkennt wieder die Zuordnung der Hölzer zu kalziumreichen Aschen, den breiten Bereich der halmgutartigen von silikatreichen zu alkalienreichen Substanzen und die Abfallstoffe und Kohle – inkl. Torf – bei den metallreichen Sorten.

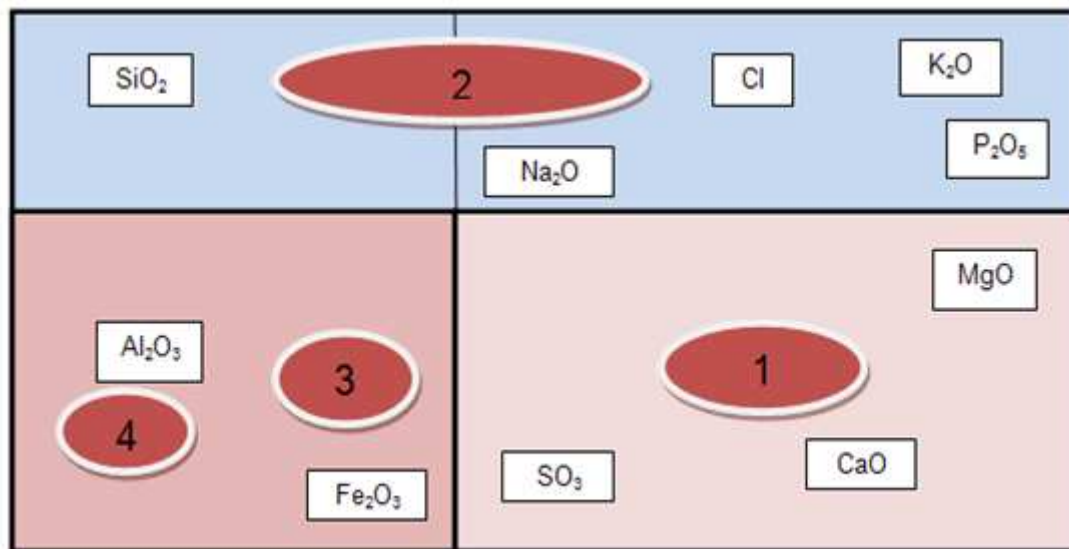


Abbildung 4-3: Einteilung von Brennstoffen nach ihren Aschekomponenten [1) Holzartige, 2) Halmgutartige, 3) Abfallstoffe, 4) Kohlen] [18]

Typische Ascheverbindungen [19] :

- das Kalium liegt in der Flugasche als KCl oder Kaliumsulfat vor und in Bett bildet es Silikate ($K_2Si_2O_5$) oder Aluminiumsilikate ($KAlSi_3O_8$) aus
- das Kalzium liegt hauptsächlich als Sulfat, Karbonat oder Silikat vor
- die Verbindung mit Phosphor als Hydroxylapatit ($Ca_5(PO_4)_3(OH)$) wird oft angetroffen
- metallische Komponenten liegen bevorzugt als Oxide vor (MgO , Fe_2O_3)

4.1.2 Ascheschmelzverhalten von Festbrennstoffen

Eine für die Verbrennung wesentliche Eigenschaft von biogenen Festbrennstoffen ist die zum Teil sehr niedrige Ascheerweichungstemperatur. Je nach Aschebestandteilen ergeben sich unterschiedliche Erweichungs- und Schmelztemperaturen. Die niedrigen Sinter- und Ascheerweichungstemperaturen führen in Wirbelschichtfeuerungen zum Verkleben der Bettpartikel (Coating und Agglomeration) und zu Anbackungen an den Brennkammerwänden und den Heizflächen. An den Überhitzerheizflächen führen Überschreitungen der Ascheerweichungstemperaturen zu Anbackung, die den Wärmeübergang reduzieren und gegebenenfalls aufwändig abgereinigt werden müssen. Durch die Ausbildung einer flüssigen Phase kommt es zu einer erhöhten Tendenz zu Ablagerungen, und zur erleichterten Diffusion in Flüssigkeiten. Während Holz eine sehr hohe Ascheerweichungstemperatur (ca. 1400 °C bis 1500 °C) aufweist, schmelzen Aschen von Halmgütern oder verschiedenen biogenen Rückständen aus lebensmittelverarbeitenden Betrieben schon bei sehr niedrigen Temperaturen (unter 900 °C). Um problematische Temperaturbereiche verschiedener Brennstoffe zu bestimmen, werden Schmelzversuche im Labor durchgeführt. Die Bestimmung der Ascheschmelztemperatur erfolgt standardmäßig nach DIN 51730, mittels Ascheschmelzmikroskop (siehe Abbildung 4-4). Die untersuchenden Brennstoffe werden zunächst verascht und in definierte Formen (z.B. Würfel) gepresst. Anschließend wird der Aschewürfel erhitzt [23].

Über ein Mikroskop wird die Formänderung beobachtet und aufgezeichnet.

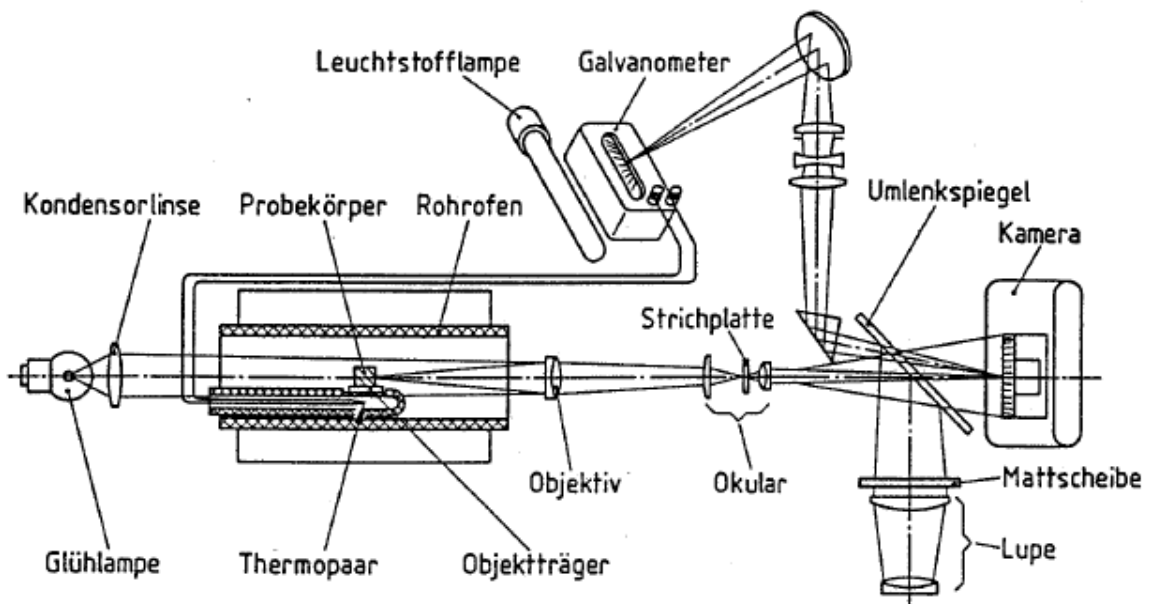


Abbildung 4-4: Schematische Darstellung des Erhitzungsmikroskops nach DIN 51730 [22]

Mögliche Verfahren zur Bestimmung der Ascheschmelztemperatur sind [22]:

- Auswertung nach DIN 51730, wobei 3 charakteristische Aschetemperaturen vorgegeben sind. Dank einer Videoaufzeichnung können die gesuchten Punkte ermittelt werden
- Auswertung nach Höhe: Hierbei wird die Höhe der Probe, bezogen auf die Ausgangshöhe, über der Temperatur aufgetragen. Mit dieser Methode lässt sich in der Regel der Sinterpunkt besonders gut ermitteln (siehe Abbildung 4-5). Auch hier werden die gesuchten Punkte anhand einer Videoaufzeichnung ermittelt
- Die Fa. Hesse, Hersteller von Erhitzungsmikroskopen, hat eine sehr effiziente Bilderkennungssoftware entwickelt. Damit können die beiden vorgenannten Methoden zusammen in einem Diagramm dargestellt werden. Allerdings findet nicht der Bezug zur Höhe Anwendung, sondern ein so genannter Formfaktor

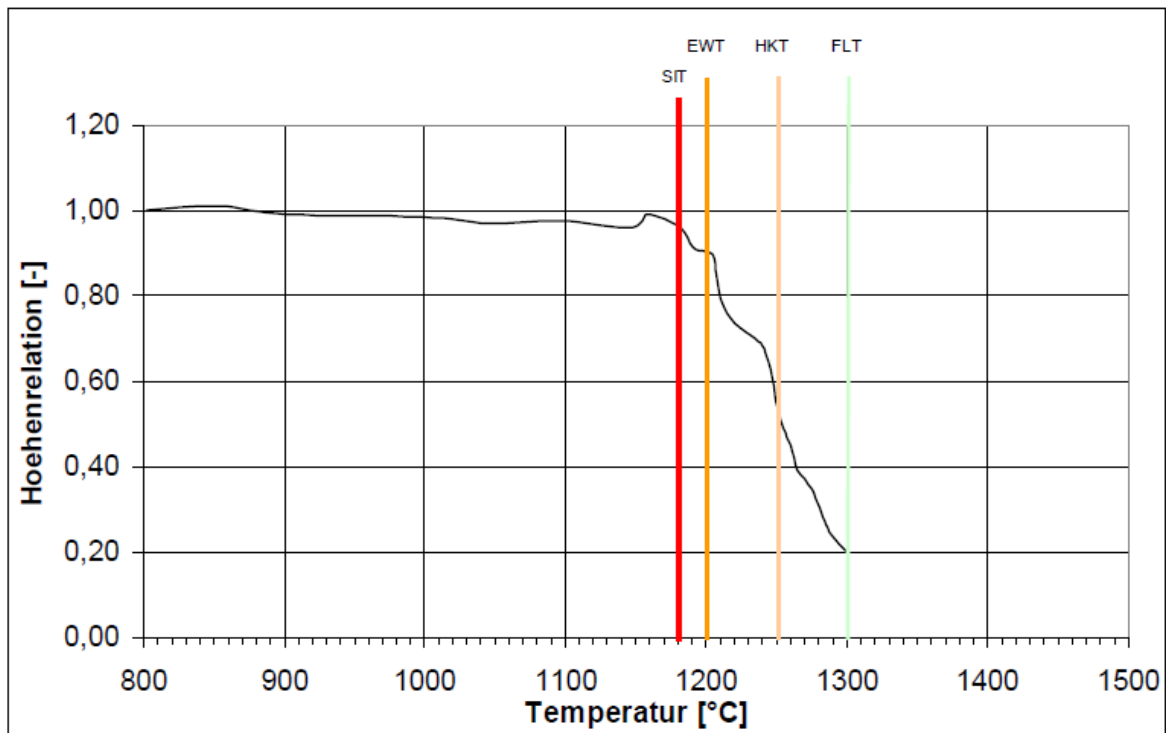


Abbildung 4-5: Schmelzverlauf eines Probekörpers, bezogen auf seine relative Höhe [22]

Bezeichnung	nach DIN
SIT Sinterbeginn	kein Kennbuchstabe
EWT Erweichungstemperatur	Kennbuchstabe A
SPT Sphärischtemperatur	Kennbuchstabe B
HKT Halbkugeltemperatur	Kennbuchstabe C
FLT Fließtemperatur	Kennbuchstabe D

Der Sinterbeginn ist nicht gleich Sinterungspunkt und darf nicht verwechselt werden. Dieser steht für den Bereich der höchsten Verdichtung, also dem Ende des Sintervorganges. Im Bereich der Wirbelschichtfeuerung ist diese Methode jedoch umstritten, da sie weder den Einfluss des Bettmaterials, noch die Fraktionierung der Asche innerhalb der Feuerung beachtet. Aus diesem Grund haben sich für die Bestimmung der Einsatztemperatur eines Brennstoffs Wirbelschichtanlagen im Labormaßstab etabliert, die die Verhältnisse in kommerziellen Großanlagen besser abbilden können [23].

Biomasse	Sinterpunkt [°C]	Erweichungspunkt [°C]	Halbkugel- temperatur [°C]	Fliesstemperatur [°C]
Braunkohle		970		
Steinkohle		1250		
Holzrinde	1250	1320	1340	1410
Getreidekörner	710	740	800	850
Getreide- Ganzpflanze	850	870	1040	1080
Grasschnitt, Heu	830-1130	950-1230	1030-1280	1100-1330
Miscanthus	820-980	820-1160	960-1290	1050-1270
Sägemehl	1150	1180	1200	1225
Raps, Presskuchen	1000	1120	1140	1140
Raps, Ganzpflanz	1140	1505	1650	1705
Fichte	1110-1340	1410-1640	1630->1700	>1700
Stroh	930	960	1170	1210
Altholz	990-1110	1120-1180	1230-1500	1250-1700
Karton/Kunststoff- Abfall	1210	1360	1700	1700

Tabelle 4-1: Ascheschmelztemperatur von Festbrennstoffen nach DIN 51730 [23]

Insbesondere bei Brennstoffgemischen kann sich die Ascheschmelztemperatur durch die Bildung von Eutektika reduzieren. Eine weitere Rolle spielt das Bettmaterial und Ausmauerungen in Wirbelschichtfeuerungen. Auch hier bilden sich oftmals Eutektika, die die Schmelztemperatur des reinen Brennstoffes zusätzlich reduzieren. Die Ascheschmelztemperatur hat daher einen entscheidenden Einfluss auf die Auswahl des Feuerungssystems [23].

Eutektika sind Mischung mit dem niedrigsten Schmelzpunkt, die entstehen, wenn mehrere Stoffe vorhanden sind, die Mischkristalle bilden.

Das sind z.B.:

- K_2O und SiO_2 ;
- $CaCO_3$ und SiO_2 ;
- K_2SO_4 und K_2O

Die Abbildung 4-6 zeigt das Gleichgewichtsdigramm der Zweistoffsysteme K_2O / SiO_2 . In der Mischung mit Alkalimetallen sinkt der Schmelzpunkt des reinen SiO_2 ab. Besonders niedrige Werte werden an den sog. eutektischen Punkten erreicht.

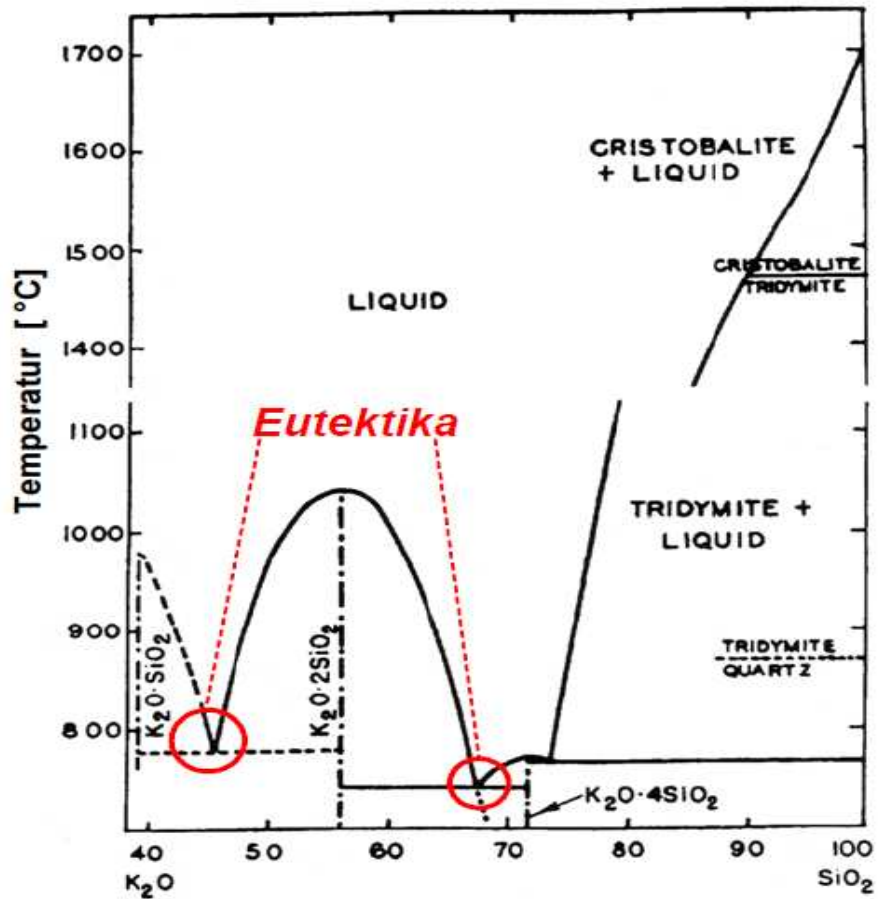


Abbildung 4-6: Gleichgewichtsdiagramme der Zweistoffsysteme K_2O / SiO_2 [65]

Wie zu sehen ist, kann der Schmelzpunkt am eutektischen Punkt minimal bei ca 730 °C liegen. Im Falle von kaliumbasierten Systemen sind, bei entsprechender Zusammensetzung, Schmelzpunkte im Bereich von 600 °C möglich.

4.2 Mechanismen und Auswirkungen der Ascheprobleme

4.2.1 Fouling / Slagging

Unter Fouling und Slagging (Beschmutzung und Schlacke) versteht man die Ablagerung von Asche an Heizflächen beziehungsweise an den Wänden des Rauchgaskanals. Die Auswirkungen sind eine Änderung der Strömungsverhältnisse– bis hin zur vollständigen Verlegung des Rauchgaswegs. Die Anlagerung von Partikeln geschieht überall dort, wo die Ascheteilchen der Strömung des Gases nicht mehr folgen können [19].

Gründe dafür sind [19]:

- Unterschreitung der Partikelsinkgeschwindigkeit (wenn Partikel zu groß sind, oder Rauchgasgeschwindigkeit lokal absinkt). Beispiel sind Toträume im Rauchgaskanal oder Lee-Seite von Wärmetauscherrohren
- Trägheit der Partikel (zur Beschreibung der Ablagerung dienen die Stokes-Zahl und kritische Haftgeschwindigkeit V_s . Die Haftgeschwindigkeit wird im Fall sauberer Rohre und fester Partikeln im Staupunkt (Gasgeschwindigkeit = 0) und im Ablösepunkt (Scherkräfte = 0) unterschritten. Kommt es jedoch zum Schmelzen der Aschen erhöht sich V_s und es kann mit vermehrter Ablagerungstendenz gerechnet werden

Stokes Zahl:

$$Stk = \frac{\rho_p d_p U_\infty}{9\mu_g D_{Rohr}} \quad (4-1)$$

Aschenverhalten- und Ablagerungstendenzen werden durch den Gebrauch von empirischen Indizes für Biomasseasche vorausgesagt. Ein einfacher Index, der Alkaliindex, drückt die Menge der Alkalioxide im Brennstoff pro Maßeinheit aus.

$$AI = \frac{kg(K_2O + NaO)}{GJ} \quad (4-2)$$

Wenn Alkaliindexwerte im Bereich von 0,17 – 0,34 kg/GJ sind, ist Fouling möglich. Wenn $AI > 0,34$ ist Fouling wahrscheinlich. Bei der Biomasse gestaltet sich die Vorhersage schwieriger, aber trotzdem haben entsprechende Indizes gute Ergebnisse erzielt [33].

Eine weitere Möglichkeit um Fouling zu verringern ist die Auslaugung der rohen Brennstoffe mit Wasser. Dies ergab eine bedeutende Verringerung der problematischen Elemente K, Na, Cl und S der Flugaschen [33].

4.2.2 Hochtemperatur – Chlorkorrosion

Biomassen haben im Vergleich zu fossilen Brennstoffen einen hohen Chlorgehalt. Vor allem in schnellwachsenden Arten, wie den halmgutartigen, finden sich zum Teil sehr hohe Anteile. Er kommt in Biomassen ausschließlich in reduzierter Form - als organisches und hauptsächlich anorganisches Chlorid - also in der Oxidationsstufe -1 vor. Der hohe Chlorgehalt vieler Brennstoffe ist verantwortlich für eine der häufigsten Schadensursachen an Wärmeübertragern von Biomassefeuerungen.

In Biomassekesseln gibt es drei Varianten, durch die das Chlor seine Wirkung entfalten kann [8]:

- Gasphasenkorrosion
- Flüssigkeitskorrosion
- Festphasenkorrosion

Bei Gasphasenkorrosion entsteht ein direkter Angriff von Cl_2 auf die Rohrwand. Bei der Flüssigkeitskorrosion wird bei der Verbrennung entstehendes HCl im Rauchgas mit Sauerstoff reagieren und dadurch entsteht relevantes Chlor für die Korrosion. Bei Festphasenkorrosion haben wir eine Anreicherung von Chlor in den Ascheablagerungen an den Heizflächen. Für die Hochtemperatur-Chlor-Korrosion wurden folgende Schadensmechanismen angegeben [23]:

- Sulfatierung von Alkali- und Erdalkalichloriden in Belägen auf der Rohrwand
- direkter Angriff von Cl_2 bzw. HCl auf die Rohrwand
- die Bildung niedrigschmelzender Metallchlorid-Eutektika
- die Alkalisulfat- Korrosion
- Erosion

Dabei dominieren die Sulfatierung von Alkali- und Erdalkalichloriden an der Rohrwand und der direkte Chlorangriff durch HCl.

4.2.2.1 Chemische Reaktionen bei der Hochtemperatur-Chlorkorrosion

Die Umsetzung von Chlor aus dem Brennstoff in den Rauchgasstrom findet im Brennraum statt. Bei der Verbrennung wird organisches und anorganisches Chlor praktisch vollständig in Cl_2 , HCl sowie in Alkali und Erdalkalichloride, insbes. KCl, umgesetzt. Der dominierende Anteil sind die Metallchloride. Sie gehen überwiegend, eingebettet in Mikropartikeln oder als Aerosole, in den Rauchgasstrom über. Folgende Mechanismen beschreiben den Ablauf der Hochtemperatur-Chlorkorrosion [23] [9]:

- Reaktion im Rauchgasstrom
→ Sulfatierung von Alkali- und Erdalkalichloride im Rauchgas (Chlor-Bildung)
- Reaktion an den Wärmeübertragern
→ Direkte Angriff von Cl_2 auf die Rohrwand (Chlorangriff)
→ Sulfatierung von Alkali- und Erdalkalichloriden in Belägen auf der Rohrwand (Chlorfreisetzung)

Bei allen Reaktionen und Umlagerungen entstehen Chloratome, welche hinsichtlich der Korrosion besonders aggressiv sind [21].

4.2.3 Agglomeration des Bettmaterials

Das Hauptproblem in Wirbelschichtfeuerungen ist die Defluidisierung die zur Bettagglomeration führt. Die Agglomeration ist eines der größten Probleme bei der Nutzung biogener Brennstoffe in der Wirbelschicht. Dabei verbacken die Partikel zu immer größeren Klumpen (Agglomeraten) im Bettmaterial und verhindern eine weitere Fluidisierung des Betts. Die Ursache dieses Zusammenbackens ist eine Erhöhung der Adhäsionskräfte zwischen den Bettmaterialpartikeln, die aufgrund des teilweisen Schmelzens der Biomasseasche entsteht [19].

Die Defluidisierung bei den Wirbelschichtfeuerungen verringert die Zuverlässigkeit der Stromerzeugung von Biomasse, was die Investitionen in zukünftige Wirbelschichttechnologien negativ beeinflusst. Das Hauptproblem ist hier die niedrig schmelzende Brennstoffasche, die Betriebsstörungen und Schäden an Verbrennungsanlagen verursachen kann. Es ist daher unerlässlich, die Eigenschaften der verwendenden Brennstoffe diesbezüglich zu kennen. Wenn die Asche eines Brennstoffs niedrig schmilzt, kann man Maßnahmen einleiten, um Störungen und Schäden entgegenzuwirken [51].

Am Anfang der Agglomeration erhält man, wegen den Kornblöcken, ein gestörtes Fluidisierungsverhalten und infolgedessen ist die konstante Hitzeverteilung nicht mehr möglich. Das führt zu lokalen Höchsttemperaturen, die eine Agglomeration/Sinterung und Defluidisierung verursacht. Als Folge muss der Reaktorbetrieb gestoppt werden, um das Bettmaterial zu ersetzen. In Abbildung 4-7 sieht man die schematische Wirbelschichtbett-Segregation und Defluidisierung [26] [25].

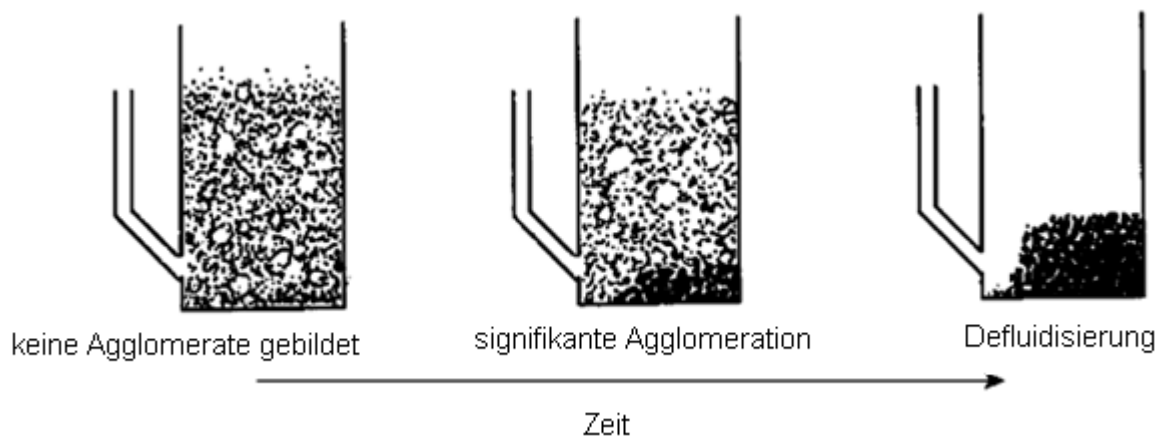


Abbildung 4-7: Schematische Wirbelschichtbett - Segregation und Defluidisationsprozess bei Strohverbrennung [51]

Die Interaktion von Asche und Bettmaterial kann auf verschiedene Arten erfolgen. Die zwei wichtigsten sind in Abbildung 4-8 gezeigt [26]:

1. coatinginduzierte Agglomeration
2. schmelzinduzierte Agglomeration

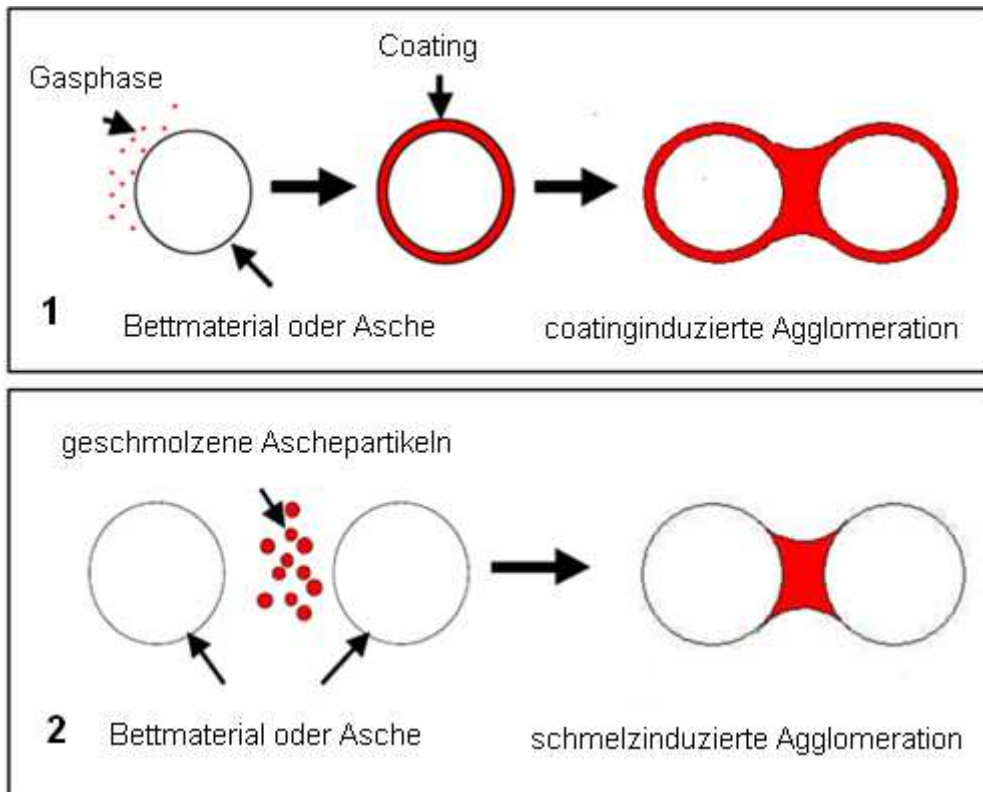


Abbildung 4-8: Mechanismen für die Agglomeration des Bettmaterials [26]

Einerseits kommt es zur Bildung von Ascheschichten (Coatings) um die Partikel, die beim Aufschmelzen die Adhäsionskräfte erhöhen. Dieser Effekt ist üblicherweise bei holzartigen Biomassen anzutreffen. Bei halmgutartiger Biomasse überwiegt der Mechanismus der schmelzinduzierten Agglomeration. In diesem Fall „verkleben“ die Bettmaterialkörner bis zu der Schmelzphase zusammen, die ungefähr den chemischen Aufbau der Asche besitzen und bei normaler Betriebstemperatur entstehen. Bei halmgutartiger Biomasse schmilzt die Asche unabhängig vom Bettmaterial, formt Flüssigkeitsbrücken zwischen den Teilchen und führt damit zur Agglomeration. Im Folgenden wird der Fokus auf die „Coating induzierte“ Agglomeration gelegt, da dies die häufigere Form bei der Verbrennung von Biomasse darstellt [26].

Agglomeration ist in diesen Systemen vor allem auf zwei Quellen zurückzuführen: Design-Probleme, die zur schlechten Verteilung der Luft führen und die zur Bildung von Hotspots im Wirbelbett führen. Die zweite Quelle ist die Wirkung der Chemie in der Brennstoffasche. Interaktion und Verschmelzung der Bettmaterialien und Brennstoffasche gilt als die primäre Quelle der Agglomeration in Wirbelschicht- Verbrennungsanlagen. Eine weitere Ursache für die Agglomeration von Bettmaterialien sind die unverbrannten Brennstoffpartikeln. Sie können lokal hohe Temperaturen verursachen und damit zu Bettagglomeration führen [23].

Die Ablagerung der Asche auf dem Bettmaterial wird wahrscheinlich dominiert durch die Kombination von [18]:

- der Ablagerung von kleinen Ascheteilchen auf dem Bettmaterialpartikeln,
- der Kondensation gasförmiger Alkalien (KCl , KOH , K_2SO_4 , K) auf dem Bettmaterialpartikeln und
- der chemischen Reaktion der gasförmigen Alkalien auf den Oberflächen

4.2.3.1 Erkennung der Agglomeration in der Wirbelschicht

Die Agglomeration in Wirbelschichtfeuerung kann ein großes operatives Problem sein, was zu unerwünschter Defluidisation und somit zum Abfahren der Anlage führen kann. Deshalb ist es wichtig das Problem rechtzeitig zu erkennen und in einem frühen Stadium mit kombinierten Gegenaktionen weitere Agglomerationen und Defluidisationen zu vermeiden. Die Merkmale der Agglomeration und die Zeit bis zum Defluidisationsauftritt können je nach Maßstab und Prozessbedingungen stark variieren. Die Steuerung der Gesamtbettchemie (eingestellt nach Brennstoffart, Bettmaterial und Additiven) ist eine allgemeine Möglichkeit zur Minderung der Agglomeration [51].

In der Literatur sind verschiedene Methoden zur Überwachung der Wirbelschicht-Hydrodynamik vorgeschlagen worden. Die meisten Methoden basieren auf Druckabfall oder Temperaturdifferenz-Messungen im Bett. Allerdings haben frühere Arbeiten gezeigt, dass Druckverlust und Temperaturdifferenzen nicht ausreichend für genaue "Frühwarnindikatoren" in der Hydrodynamik sind [28].

Die Druckschwankungen enthalten viele Informationen über die Wirbelschicht-Dynamik. Die einfachste Möglichkeit ist, die Druckschwankungen (Standardabweichung) zu prüfen. Die Standardabweichung hängt allerdings stark von der oberflächlichen Gasgeschwindigkeit ab und sie ist daher für die Erkennung der Veränderungen in der Hydrodynamik in industriellen Anlagen nicht geeignet. In industriellen Anlagen zeigt die Gasversorgung in der Regel signifikante Unterschiede [28]. In Abbildung 4-9 ist ein Standard Agglomerationstest dargestellt.

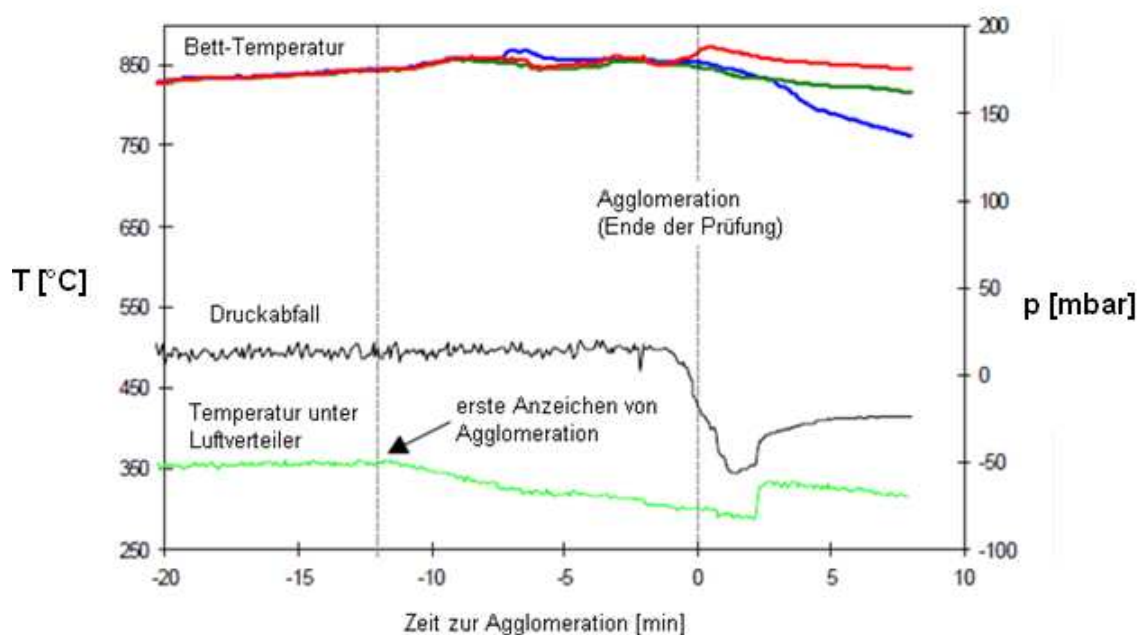


Abbildung 4-9: Standard Agglomerationstest (Weizenstroh, Bettmaterial: Quarzsand)[28]

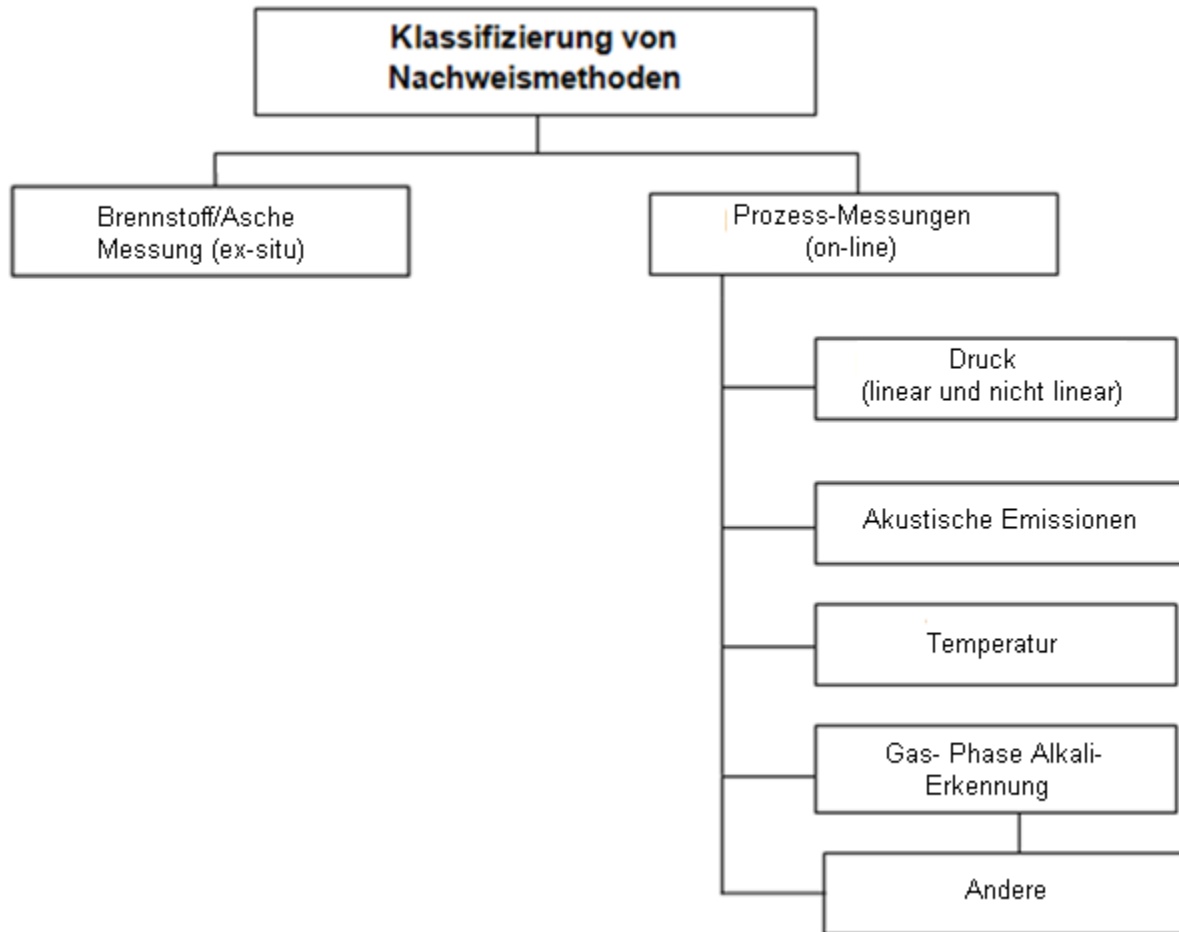


Abbildung 4-10: Klassifizierung von Nachweismethoden [51]

Alle diese Methoden wurden ausschließlich auf der Grundlage vom Brennstoff, Aschemessungen und unterschiedlicher rheologischer Eigenschaften bewertet.

Absolut- und Differenzdruckmessungen werden häufig in Wirbelschichten durchgeführt. Die Analysemethode kann linear und nichtlinear sein. Der Druck wird als eine geeignete Quelle zur Wirbelschicht-Überwachung verwendet, weil er die Hydrodynamik der Wirbelschicht darstellt. Durchschnittliche Druckabfall-Messungen liefern Informationen über globale Bett-Eigenschaften, z.B. Dichte und Höhe. Hochfrequente Druckmessungen geben Informationen über die lokalen und/oder globalen Strömungsphänomene [51].

Akustische Emission tritt auf, wenn eine kleine Oberflächenversetzung eines Materials produziert wird. Dieses tritt wegen den erzeugten Druckwellen, wenn es eine schnelle Freigabe von Energie in einem Material gibt, oder auf seiner Oberfläche auf.

Akustische Emissionen beziehen sich auf ein breites Spektrum der Wirbelschicht emittierter Frequenz. Akustische Messungen beschränken sich nicht auf den menschlichen Hörbereich. Diese Methode ist sehr teuer und wird daher wenig benutzt [51].

Die Temperaturmessung wird üblicherweise in industriellen Wirbelschichtbetten durchgeführt. Die Temperaturmessungen bei festen Brennstoffumwandlungsprozessen enthalten Informationen über den Grad der Vermischung im Wirbelschichtbett, d.h. wie schnell werden lokale Temperaturunterschiede ausgeglichen. Aus diesem Grund ist es eine relevante Messung im Hinblick auf die Agglomerationserkennung. Verglichen mit Druckmessungen, haben Temperaturmessungen eine kleinere zeitliche Auflösung. Idealerweise sollte die Temperatur in Wirbelschichten relativ homogen sein. Allerdings zeigen größere Installationen und insbesondere zirkulierende Wirbelschichten große inhomogene Strömungsmuster [51].

Die nächste Prozess-Messung basiert auf der Gas-Phase-Alkali-Erkennung. Die Anwesenheit von gasförmigen Alkalien können nicht sehr schlüssige Informationen über die tatsächliche Agglomerationstendenz in einer Wirbelschicht geben. Die Anwesenheit von gasförmigen Alkalibestandteilen kann auf potenzielle Probleme bei Agglomerationen hinweisen, aber die Gegenwart von gasförmigen Alkalimetallen ist nicht ausreichend für das eigentliche Auftreten von Agglomeration. Man muss bedenken, dass nicht nur gasförmige Alkali-Komponenten eine Rolle in dem Agglomerationprozess spielen. Die Alkali-Konzentration in der Gasphase innerhalb des Wirbelschichtbetts ist auch relevant.

Diese Methoden basieren auf verschiedenen Arten von Messungen für Wirbelschichten, vor allem für Wirbelschichten in der Industrie. Die Messung von der Temperatur und dem Druck sind die am besten geeigneten Optionen [51].

Zur Bekämpfung der Agglomeration werden in erster Linie Methoden für die Implementierung in bestehenden Prozessen angewendet. Dabei unterscheiden wir [51]:

- die Verwendung von Zusatzstoffen (Additiven) und
- die Anwendung von alternativen Bettmaterialien.

Eine zweite, kleinere Gruppe zur Bekämpfung der Agglomeration ist ein verbessertes Reaktor-Design, welches man vor allem in der Patentliteratur finden kann.

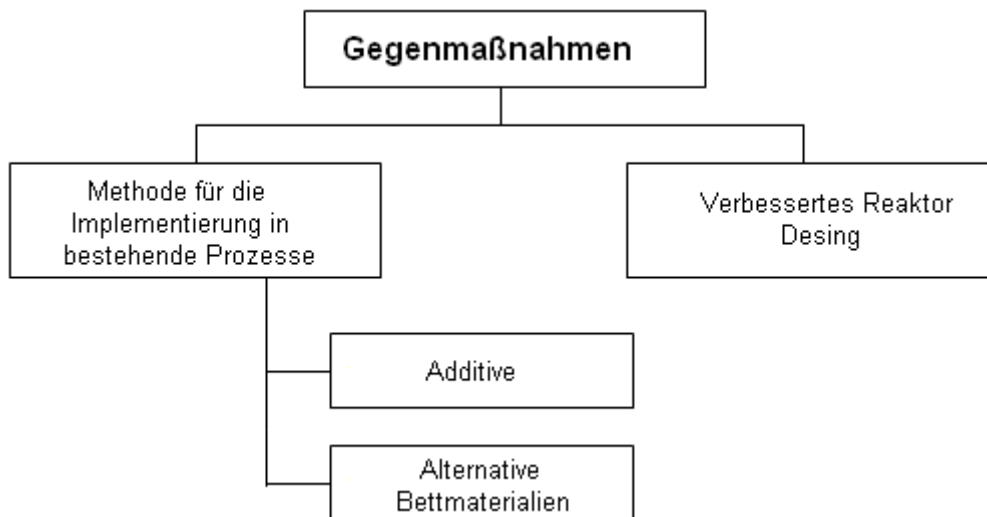


Abbildung 4-11: Gegenwirkungsmethoden [51]

Die Methoden zur Bekämpfung der Agglomeration mit Additiven und alternativen Bettmaterialien werden im Kapitel 5 vorgestellt. Die am besten geeigneten Additive und Bettmaterialien enthalten Ca, Al, Mg, Fe oder deren Mischungen. Die Elemente selbst sind von hoher Bedeutung, während die spezifische Zusammensetzung weniger wichtig ist [51].

Das verbesserte Reaktoren-Design ist von verschiedenen Autoren untersucht worden. Eine große Patentgruppe stellt ein spezielles Bodenplatte-Design vor, das die Bildung von Klumpen nicht vermeiden kann, sondern dient nur zur Agglomeraten-Entfernung während des Betriebs. Trotz des vielversprechenden Bodenplatten-Designs, zeigt die Literatur nicht deutlich, wie weit diese Entwürfe in der Industrie umgesetzt werden können und wie sie tatsächlich in der Praxis durchzuführen sind [51].

Es stellt sich die Frage ob die relativ hohen konstruktiven Aufwände wirtschaftlich, attraktiv und operativ robust in der Praxis sind.

Eine Bewertung der technischen und wirtschaftlichen Aspekte der verschiedenen Nachweismethoden und der Gegenwirkungsmethoden sind in Tabelle 4-2 zusammengefasst.

	Technische Aspekte	Ökonomische Aspekte
Nachweismethoden		
Brennstoffasche-Messungen (off-line/ex-situ)	o/-	o
Prozess-Messungen (on-line)		
Druck und Druckschwankungen (lineare Methoden)	+/o	+
Druckschwankungen (nicht-lineare Methoden)	+	+
Temperatur	o	+
Nachweis von Gasphasen-Alkali-Komponenten	-	o
Methoden auf akustischen Emissionen	-	o
Andere Methoden (Feinanteil, bogging Index FFCD)	o/-	n/a
Gegenmaßnahmen		
Additive		
Verschiedene Elemente z.B. Ca, Al, Mg, Fe	+/o	o
Zusätzlicher Brennstoff / Abfall	+/o	+/o/-
Bettmaterialien	+/o	o
Verbessertes Reaktor- Design	+/o	n/a

Das Ranking geht von + (positive / billig) über o bis - (wenig Nutzen / teuer); Kombinationen von zwei oder mehreren Symbolen zeigen an, dass der tatsächliche Nutzen / Kosten in dem angegebenen Bereich liegen könnte. n / a ist nicht anwendbar.

Tabelle 4-2: Bewertung der technischen und wirtschaftlichen Aspekte der verschiedenen Nachweis- und Gegenwirkungsmethoden [51]

Neben dem Reaktoren-Design existieren spezielle Techniken, mit denen man der Agglomeration entgegenwirken kann. Mit lokal höheren Gasgeschwindigkeiten oder mit internem Rühren können Agglomerate aufgebrochen werden [51].

Eine weitere Methode zur Agglomerationserkennung in der Wirbelschicht ist von Visser [26] vorgeschlagen worden. Zum Nachweis der Agglomeration verwendet er dabei zwei unterschiedliche Agglomerationindices.

Der erste Agglomerationindex:

$$(Na + K) / (2 S + Cl) > 1 \quad (4-3)$$

Dieser Index, basiert auf der allgemeinen Beobachtung und berücksichtigt die Summe der Alkalikonzentration und das Vorhandensein von S und Cl. Es kann angenommen werden, dass bei einem Verhältnis $(Na+K)/(2S+Cl)$ größer als 1 Agglomeration stattfindet, ansonsten ist mit Fouling zurechnen.

Der zweite Agglomerationsindex:

$$(K + Na + Si) / (Ca + P + Mg) > 1 \quad (4-4)$$

Dieser Index basiert auf studierten Proben, die häufig Ascheschichten (Coatings) um Partikel entwickelt. Das Verhältnis von $(Ca + P + Mg)$ muss größer als $(K + Na + Si)$ beim Brennstoff sein, um eine äußere nicht-klebrige Schicht zu bilden. Die oben erwähnten Agglomerationsindices sind neu und müssen durch entsprechende Daten überprüft werden. Es wird eine weitere Prüfung dieser beiden Indexe vorgeschlagen und sie basiert auf den Brennstoffeigenschaften im Verbindung mit SiO_2 -Bettmaterial bei Temperaturen über 800 °C [26].

5 Maßnahmen gegen Ascheproblematik

Im Kapitel 4 sind negative Auswirkungen der Ascheproblematik beschrieben. Um diese Effekte zu minimieren gibt es verschiedene Möglichkeiten. Somit können [19]:

- über eine Änderung der Prozessparameter die Bildungsmechanismen unterbunden und
- durch die Änderung der Aschezusammensetzung die chemischen Voraussetzungen für diese Effekte beseitigt werden.

5.1 Bettmaterialien

Die Verwendung von neuen Bettmaterialien ist die einfachste und effektivste Maßnahme zur Minderung der Agglomerationbildungsgefahr. Das häufigst eingesetzte Bettmaterial in Wirbelschichtbrennkammern ist Quarzsand. Die Wirbelschicht enthält in Feuerungsanlagen meist nur 1-3 Gew. % Brennstoff, der überwiegende Teil ist Inertmaterial (z.B. Quarzsand, bestehend aus SiO_2). Als Inertmaterial oder Bettmaterial sind nach Anforderung unterschiedliche Substanzen geeignet. Die Verwendung von Quarzsand ist preisgünstig aber in Verbindung mit Brennstoffaschen kann es niedrig schmelzende Eutektika bilden [9] [29].

Zwei weitere thermisch beständige Bettmaterialien sind Mullit oder Molochit. Beide sind Mischoxide von Silizium und Aluminium mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen. Eine Substanz, welche sich als Inertmaterial in Verbindung mit Biomassen besonders hervorhebt, ist Olivin. Olivin ist ein Mischsilikat aus Eisen und Magnesium, enthält Schwermetalle (Nickel, Eisen), hat einen hohen Schmelzpunkt und ist sehr hart. Sein Nachteil sind abrasive Eigenschaften für die Kesselwerkstoffe [9].

Kalkstein (Kalziumkarbonat) und Dolomit (Calcium-Magnesium-Mischcarbonat) sind als Bettmaterial zu weich. Ihr Nachteil ist ihre veränderbare Bettpartikelgröße. Eine weitere wichtige Eigenschaft von Inertmaterialien ist deren Dichte, da sich daraus direkt die Gasmenge ergibt, die erforderlich ist um das Bett zu fluidisieren und somit auch zu durchmischen [9].

Quarz führt oft zu Bettagglomeration in einem alkalireichen Bereich durch Bildung von Alkali-Silikaten mit niedrigem Schmelzpunkt. Zur Bekämpfung der Agglomeration wird häufig eine hohe Austauschrate des Bettmaterials gewählt, deswegen strebt man danach, das Bettmaterial durch Alternativen zu ersetzen. Nebeneffekte sind dabei sehr wichtig sowie, etwa ein geändertes Verhalten bezüglich der Abrasion, oder der Langzeitbeständigkeit des Materials (z.B. Kornbruch). Mehrere Autoren haben diese Varianten auf ihre Tauglichkeit in Großanlagen überprüft. Frühere Arbeiten haben gezeigt, dass es bei der Verbrennung von alkalireichen Brennstoffen oder Brennstoffmischungen günstiger ist, den Quarzsand als Bettmaterial nicht zu verwenden, sondern Quarzsand mit einem anderen alternativen Bettmaterial zu ersetzen [9]. In der Tabelle 5-1 ist eine Zusammenfassung möglicher Bettmaterialien aufgelistet.

Material	Bestandteile [kg/m^3]	Schmelzpunkt [$^{\circ}\text{C}$]
Quarz	SiO_2	1750
Molochit	SiO_2 (55%) • Al_2O_3 (45%)	1770
Mullit	Al_2O_3 (75%) • SiO_2 (25%)	1870
Olivin	$\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$ • Fe_2 [SiO_4 (8%)]	1760
Korund	Al_2O_3	2050
Dolomit	CaCO_3 • MgCO_3	>2000 (als Oxide)
Feldspalt	$(\text{Ca}, \text{K}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_8$	1100
Kalkstein	CaCO_3	800 - 900

Tabelle 5-1: Verwendete Bettmaterialien [9] [25]

5.1.1 Beispiele von verwendeten Bettmaterialien

Mehrere Autoren haben verschiedene Bettmaterialien untersucht um die Bettagglomeration zu verhindern.

Pettersson, A. untersuchte die Verbrennung eines Gemisches aus 80 % Holz und 20 % Strohpellets in einer 12 MWth zirkulierenden Wirbelschicht. Verwendet wurden drei verschiedene Bettmaterialien: Quarzsand, Olivinsand, Hochofenschlacke.

Eine positive Wirkung hinsichtlich der Agglomerationen und der Bildung von Asche coatings auf den Körnern zeigten Olivinsand und Hochofenschlacke, allerdings kam es bei der Hochofenschlacke zu einem erhöhten Austrag des Bettmaterials. Wegen seiner Bewegung in der Wirbelschicht wurde es zermahlen und als Flugasche ausgetragen, und dies ist auf seine kleine mechanische Beanspruchbarkeit zurückzuführen. Außerdem wurden weniger Alkali und Chlor in den Flugaschen gefunden. Infolgedessen steht der Vorteil eines kaliumarmen Bettes mit hohen möglichen Einsatztemperaturen einer verstärkten Neigung zu Ablagerungen im Rauchgaskanal gegenüber [30] [19].

Sun kam 2008 zu einer agglomerationsbedingten Defluidisation des Bettes durch die Verwendung von Quarzsand und die Verbrennung von Baumwollstengeln bei 800°C. Ein Wechsel des Bettmaterials zu Alumina beseitigte diese Tendenz. Keine Agglomerate wurden auch bei 880°C im Bettmaterial gefunden. Es wurde jedoch kein Beweis über die abrasive Wirkung dieses Materials gefunden [31]. Auch Werther berichtet 2000 vom positiven Einfluss dieses Materials bei der Verbrennung der landwirtschaftlichen Rückstände (Erdnussschale) in der Wirbelschicht. Bei solcher Verbrennung kommt es sehr oft zur Bettagglomeration [32].

Vamvuka hat 2008 Olivenholz und Kerne in einer stationären Wirbelschicht bei 800°C verbrannt, die beim zuvor eingesetzten SiO₂ zu Agglomerationen führten. Mit dem Einsatz von Natrium-Feldspat wurden keine Anzeichen von Ascheablagerung oder Bettagglomeration bemerkt [33].

Van der Drift untersuchte 1999, Mullit und Alumina bei der Strohverbrennung. Dadurch wurde deutlich, dass sie keinen Einfluss auf die Agglomerationstemperatur haben [28].

Ungeklärt bleiben noch die Fragen nach dem Einfluss der Bettmaterialien auf die Asche Probleme im Rauchgaskanal (Fouling, Korrosion), oder nach dem mechanischen Verhalten (Abrasion, Kornbeständigkeit) [19].

Am Ende kann man zusammenfassen, dass der Wechsel auf ein anderes Bettmaterial in Bezug auf die Agglomerationsproblematik sehr wirksam ist.

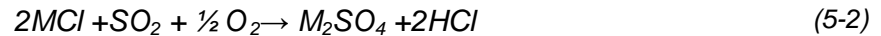
Bettmaterial	Stroh	Holz	Baumwollstengeln	Erdnussschale	Olivenzholz und Kerne
Olivinsand	+	+++			
Hochofenschlacke		+++			
Alumina	-		+++	+++	
Mullit	-				
Natrium-Feldspat					+++

+++ : die beste Wirkung; ++ : sehr gute Wirkung ; + : gute Wirkung

Tabelle 5-2: Wirkungen von verwendeten Bettmaterialien

5.2 Additive

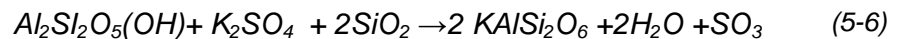
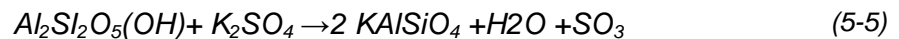
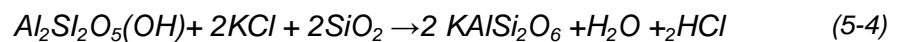
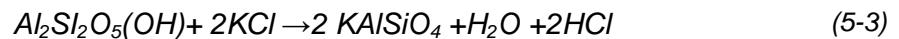
Eine Variante, um die chemischen Vorgänge in der Brennkammer zu beeinflussen, ist die Zugabe von Additiven in den Brennraum. Gemeinsamer Ansatzpunkt für alle ist die Bindung von Alkalien (Alkalichloriden) in neuen, für den Prozess unschädlichen Produkten. In den Gleichungen (5-1) und (5-2) sind die gewünschten Reaktionen gezeigt [39] [36].



M entspricht K oder Na

Aluminosilikate sind Bestandteil von Kaolin und sie reagieren mit dem Kalium, das während der Verbrennung entsteht, um $KAiSiO_4$ (Kalsilite) und $KAiSi_2O_6$ (Leucite) zu bilden. Die entstandenen Produkte haben hohe Schmelzpunkte, d.h. $1600^\circ C$ für reines Kalsilite und $1500^\circ C$ für Leucite und somit sind sie weniger problematisch.

Die Kalium-Bindung durch Kaolin ist mit den folgenden Reaktionen gezeigt [53]:



Die Alkalien werden als Aluminosilikate oder Sulfate gebunden und das Chlor verlässt als gasförmiges HCl die gefährdeten Bereiche des Kessels [36].

Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass mit Additiven die Ascheprobleme sehr gut bekämpft werden können. Die optimale Kombination und Dosierung muss für jeden Brennstoff speziell ermittelt werden.

Die folgenden Beschreibungen der Additive wurden aus Mineralienatlas und Fossilienatlas [34] übernommen.

5.2.1 Kaolin

Kaolin, auch als Porzellanerde, Porzellanton, weiße Tonerde, Aluminiumsilikat oder in der Apotheke als Bolus Alba oder Pfeifenerde bezeichnet, ist ein feines, eisenfreies, weißes Gestein, das als Hauptbestandteil Kaolinit, ein Verwitterungsprodukt des Feldspats enthält. Weitere Bestandteile sind verschiedene andere Tonminerale und unzersetzte Feldspatteilchen.

Mineralklasse/Gruppierung: Silikate
 Chemische Formel: $Al_2Si_2O_5(OH)_4$
 Farbe: weiß, bräunlich weiß, grauweiß, gelblich weiß, graulich grün
 Manipulation/Imitation: Dickit, Nakrit

Chemische Zusammensetzung:

Element	Symbol	Masse %	Atome	Atome %	Atommasse
Wasserstoff	H	1.56	4	25.53	1.0079470
Sauerstoff	O	55.78	9	52.94	15.9994300
Aluminium	Al	20.90	2	11.76	26.9815382
Silizium	Si	21.76	2	11.76	28.0855300

Tabelle 5-3: Chemische Zusammensetzung von Kaolin [34]

Mehrere Autoren haben Kaolin als Additiv untersucht:

Pettersson [39] untersuchte Kaolin bei der Verbrennung eines Gemisches aus 80 % Holz – und 20 % Strohpellets in einer 12 MW_{th} zirkulierenden Wirbelschicht. Quarzsand verwendete er als Bettmaterial. Die Ergebnisse der Studie zeigten, eine reduzierte Alkali- Belastung in dem Konvektionsabschnitt. Außerdem wurde weniger Alkali und Chlor in der Flugasche gefunden. Nach dem Vergleich der verschiedenen Additive, hat sich Kaolin als das beste Additiv bestätigt. Die Zugabe von Kaolin erfasst 80 % des Alkalis in der Flugasche als unlösliche Alkali – Aluminium – Silikate. Kaolin konnte den KCl-Gehalt in der Flugasche verringern und das Kalium in stabile Verbindungen überführen.

Coda [40] studierte den Einfluss aluminiumreicher Additive (z.B. Kaolin) auf die Aschebildung bei Verbrennung von Holz und Reststoffen (Reste aus der Papiererzeugung, landwirtschaftliche Abfälle, Plastikmüll). Kaolin hat sehr gute Ergebnisse erzielt.

Vamvuka [33] untersuchte das thermische Verhalten der Asche bei Verbrennung in einer Wirbelschichtfeuerung im Hinblick auf die Verschlackung/Fouling und Agglomeration von Bettmaterial. Ausgewählte Brennstoffe sind Olivenkerne und Olivenholz und als Bettmaterial verwendete er Quarzsand. Kaolin hatte als Aufgabe die Erfassung der Alkali und Vermeidung des Agglomerationspotenzials. Bei der Verwendung von Additiven (Kaolin) werden keine Anzeichen von Ascheablagerung oder Bettagglomeration bemerkt.

Drift [28] untersuchte 7 verschiedene Biomassen: Gras, dänisches Weizenstroh, niederländisches Weizenstroh, verwitterten dänischen Weizenstroh, Klärschlamm und Stroh / Schlamm-Gemische, Kakaoschalen, Weide (als Bezugbrennstoff). Es hat sich gezeigt, dass Kaolin bei allen deutlich das Risiko der Agglomeration reduziert. Die Schmelztemperatur erhöhte sich mindestens um 60° C.

Llorente [41] untersuchte 5 Biomassen: Gerstenstroh, Mandelschalen, Rückstände von Olivenölgewinnung, Diestel (wichtiges Potenzial als Energiepflanze in den semiariden Bedingungen der südlichen EU-Ländern) und Brassica carinata (eine der wichtigsten Quellen von Pflanzenöl der Welt. Aufgrund des hohen Biomasse-Ertrags, beobachtet in einigen Sorten, gibt es auch ein Interesse an der Entwicklung dieser Arten als neue Quelle von fester Biomasse). Kaolin hat sich als geeignet erwiesen, um die Biomassesintern in allen betrachteten Fällen zu reduzieren.

Öhman [18] experimentierte bei der Verbrennung von Weizenstroh in einer 5-Kilowatt Anlage. Durch die Zugabe von Kaolin, wird die Anfangsagglomerationstemperatur über 100 °C erhöht. Kaolin wurde zu den Meta-Kaolinit Partikeln umgewandelt, die möglicherweise Kalium absorbieren.

Konsomboon [53] benutzt Kaolin als Additiv bei der Verbrennung von Resten aus der Palmölindustrie (leeres Fruchtbündel der Palme). Sie werden als ein Brennstoff für Energieerzeugung in Thailand benutzt. Eine Zugabe von 8 % Kaolin war genügend, um das Kalium bei niedrigen Temperaturen (700°C – 800°C) aufzunehmen. Die Schmelztemperatur erhöht sich um 100 °C. Bei Zugabe von 16 % wird Kalium vollständig aufgenommen und im festen Aggregatzustand vollständig behalten.

Devidsson [37] untersuchte Kaolin als Additiv und Hochofenschlacke als Bettmaterial an einer 12 MW_{th} Anlage. Für die Verhinderung von Bettagglomeration und für die Eliminierung von Ablagerung im Rauchgaskanal verwendet er Kaolin als Additiv und erreicht damit eine sehr gute Wirksamkeit. Die wirtschaftlichste der untersuchten Varianten zur Verhinderung von Bettagglomeration ist die Kaolinzugabe in das Bett.

Kaolin erwies sich als geeignet, um die Biomasse-Sintern in allen betrachteten Fällen zu reduzieren.

5.2.2 Dolomit

Dolomit, auch unter den Bezeichnungen Dolomitspat, Rautenspat und Perlspat bekannt, ist ein sehr häufig vorkommendes Mineral aus der Mineralklasse der wasserfreien Carbonate ohne fremde Anionen.

Mineralklasse	Carbonate
Chemische Formel	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Farbe	farblos / weiß / grünlichgrau / allochromatisch durch Fremd Beimengungen
Manipulation/Imitation:	Ankerit, Kutnohorit, Minrecordit

Chemische Zusammensetzung:

Element	Symbol	Masse %	Atome %	Atommasse
Kohlenstoff	C	13.03	2	12.0107800
Magnesium	Mg	13.18	1	24.3050600
Calcium	Ca	21.73	1	40.0784000
Sauerstoff	O	52.06	6	15.9994300

Tabelle 5-4: Chemische Zusammensetzung von Dolomit [34]

Drift [28] untersuchte Dolomit als Additiv, und dabei zeigte sich, dass Dolomit deutlich das Risiko der Agglomeration reduziert. Die Schmelztemperatur erhöht sich mindestens um 60°C.

Llorente [41] bei der Verbrennung von Gerstenstroh, Mandelschalen, Rückständen von Olivenölgewinnung, zeigt sich Dolomit wenig wirksam gegen Bettagglomeration.

5.2.3 Aluminiumoxid

Aus Bauxit wird Aluminiumhydroxid durch Aufschließen in Natronlauge gewonnen (Bayer-Verfahren). Durch Entziehen des Wassers, z.B. durch Brennen, Sintern oder Kalzinieren erhält man Aluminiumoxid.

Anderer Name	Korund oder Alumina
Chemische Formel	Al_2O_3 mit Fe und Ti
Klasse/ Gruppierung	Oxide
Manipulation/Imitation	Hämatit, Eskolait, Karelianit
Farbe	rot, blau, hellblau, grünlich, gelb, lila, grau

Chemische Zusammensetzung:

Element	Symbol	Masse %	Atome	Atome %	Atommasse
Aluminium	Al	26.24	2	28.57	26.9815380
Sauerstoff	O	23.34	3	42.86	15.99943000
Titan	Ti	23.27	1	14.29	47.8671000
Eisen	Fe	27.15	1	14.29	55.8452000

Tabelle 5-5: Chemische Zusammensetzung von Aluminiumoxid [34]

Llorente [41] bei der Verbrennung von Gerstenstroh, Mandel-Shell, Rückständen von Olivenölgewinnung würde Aluminiumoxid als Additiv untersucht und zeigte schlechte Ergebnisse.

5.2.4 Mullit

Mullit ist ein eher selten vorkommendes Mineral aus der Mineralklasse der Silikate, genauer ein Inselsilikat mit tetraederfremden Anionen. Es kristallisiert im orthorhombischen Kristallsystem und entwickelt meist kleine, prismatische Kristalle in weißer, gelber, roter oder violetter Farbe. Auch farblose Mullit-Kristalle sind bekannt.

Mullit entsteht durch Metamorphose aus Kaolin bei etwa 1200 C oder als Zerfallsprodukt aus Sillimanit bei über 1000 C (Sillimanit→Mullit+SiO₂) [34].

Chemische Formel	$Al_6Si_2O_{13}$
Mineralklasse/Gruppierung	Silikate
Farbe	farblos, violett, gelb, weiß, hell rosa
Manipulation/Imitation	Sillimant (Al_2SiO_5), Andalusit, Kanonait, Kyanit, Topas, Yoderit

Chemische Zusammensetzung:

Element	Symbol	Masse %	Atome	Atome %	Atommasse
Aluminium	Al	48.82	13	61.90	15.9994300
Sauerstoff	O	28.00	6	28.57	26.9815382
Titan	Si	13.18	2	9.52	28.0855300

Tabelle 5-6: Chemische Zusammensetzung von Mullit [34]

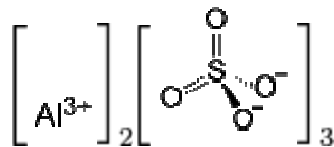
D. Vamvuka [33] schlägt Mullit als Additiv vor, und es wird wahrscheinlich gute Ergebnisse erzielen, weil der Hauptbestandteil von Mullit Kaolin ist.

5.2.5 Aluminiumsulfat

Das Hydrat des Aluminiumsulfats lässt sich durch das Auflösen von reinem, eisenfreiem Aluminiumhydroxid in heißer Konzentration aus Schwefelsäure gewinnen. Aluminiumsulfat, bildet ein farbloses Pulver mit einer Dichte von $2,71 \text{ g/cm}^3$ [35].



Strukturformel:



Chemische Eigenschaften [35]:

Chemische Formel	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
Aggregatzustand	fest
Dichte	$2,71 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Molare Masse	$342,15 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
Schmelzpunkt	$770 \text{ }^\circ\text{C}$
Löslichkeit	Gut in Wasser
Klasse	Sulfate

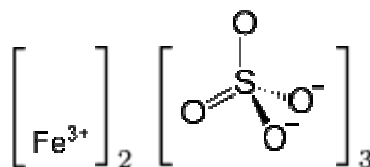
Aho [36] untersuchte schwefelhaltige Additive die auf der Reaktion (5-2) basieren. Aluminiumsulfat in wässriger Lösung wurde als Additiv bei einer Wirbelschichtversuchsanlage verwendet.

Aluminiumsulfat wird in gelöster Form durch eine Sprühdüse dem oberen Teil des Freeboards hinzugefügt. Bei kleiner Dosierung ($\text{S}/\text{Cl}_2 = 1,5$) kann es die Entstehung von Ascheablagerungen verhindern. Das Aluminiumsulfat zeigte eine hohe Wirksamkeit.

5.2.6 Eisensulfat

Eisensulfat ist eine chemische Verbindung aus der Gruppe der Sulfate. Eisensulfat kommt als Abfallprodukt der chemischen Industrie vor. Weiterhin kommt es als Nonahydrat in dem Mineral Coquimbite vor [35].

Strukturformel:



Eisensulfat Eigenschaften [35]:

Chemische Formel	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$
Schmelzpunkt	$480 \text{ }^\circ\text{C}$
Molare Masse	$399,88 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
Dichte	$3,10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Farbe	farb- und geruchloses, hygroskopisches, feuchtigkeits- und lichtempfindliches Pulver

Aho [36] untersuchte auch Eisensulfat als Additiv bei einer Wirbelschichtversuchsanlage. Eisensulfat wurde zu einem Versuchsreaktor als Wasserlösungen in tröpfchenform addiert. Die chemische Dosierung von 1.5 (angezeigt als Verhältnis S/Cl₂) war genügend um bei der Verbrennung riskante Cl-Absetzung zu verhindern. Auch hier war der SO₂ Ausstoß nicht signifikant höher als in Referenzfall.

5.2.7 Kalkstein

Kalkstein ist ein äußerst variables Gestein und das betrifft sowohl seine Entstehung als auch seine Eigenschaften, das Aussehen und die wirtschaftliche Verwendbarkeit. Es gibt daher innerhalb der Geologie eine eigene Fachrichtung, die Karbonatsedimentologie, die sich ausschließlich mit der Entstehung und den Eigenschaften der verschiedenen Kalksteintypen befasst. Der größte Teil aller Kalksteine ist biogener Entstehung (von Lebewesen abgelagert). Es gibt aber auch chemisch ausgefällte und klassische Kalksteine [34].

Farbe grau, hellgrau, weiß, bräunlich, rötlich, bläulich bis schwarz
 Mineralbestand: hauptsächlich zusammengesetzt aus Calcit (80%) und Dolomit, als Verunreinigungen treten z.T. beträchtliche Mengen von Ton, Sand, Kohle und Bitumen auf.

Chemische Formel CaCO₃
 Mineralklasse Karbonat

Chemische Zusammensetzung

Element	Symbol	Masse %	Atome	Atome %	Atommasse
Kohlenstoff	C	12.00	1	20.00	12.0107800
Sauerstoff	O	47.96	3	60.00	15.9994300
Calcium	Ca	40.04	1	20.00	40.0784000

Tabelle 5-7: Chemische Zusammensetzung von Kalk [34]

Drift [28] sagte, dass Kalkstein auch negative Auswirkungen haben kann, durch die Bildung von Ablagerungen auf Wärmeübertragungsflächen und Reaktorwänden und es ist sogar berichtet, dass sie Asche-Verformungstemperaturen verringern.

Llorente [41] untersuchte Kalkstein als Additiv bei der Verbrennung von Gerstenstroh, Mandelschalen, Rückständen von Olivenölgewinnung und kam zu schlechten Ergebnissen

Coda [40] berichtet auch von schlechten Ergebnissen bei Verbrennung von Holz und Reststoffen (landwirtschaftliche Abfälle).

5.2.8 Bauxit

Bauxit ist ein wichtiges Aluminium- Rohstoff das vorwiegend aus den Aluminium-Mineralen Gibbsit (Hydrargillit) γ -Al(OH)₃, Böhmit γ -AlO(OH), Diaspor α -AlO(OH), ferner den Eisenoxiden Hämatit Fe₂O₃ und Goethit FeO(OH), dem Tonmineral Kaolinit und geringen Anteilen des Titanoxids Anatas TiO₂ besteht. Seinen Namen verdankt es seinem ersten Fundort Les Baux-de-Provence in Südfrankreich, wo es 1821 von Pierre Berthier entdeckt wurde [34].

Aus etwa 95 % des abgebauten Bauxits wird Aluminium produziert. Geringe Mengen dienen bei günstiger Zusammensetzung der Herstellung von Al-Chemikalien, Schleifmitteln und feuerfesten Steinen. Ein Nebenprodukt der Aluminiumgewinnung ist Gallium.

In den Geowissenschaften werden Lateritbauxite (Silikatbauxite) von den Karstbauxiten (Karbonatbauxite) unterschieden [35].

Coda [40] untersuchte den Einfluss von Bauxit auf die Aschebildung bei der Feuerung von Holz und Reststoffen (landwirtschaftliche Abfälle) und dabei hat Bauxit gute Ergebnisse erzielt.

5.2.9 Ankerit

Ankerit (Braunspat) ist ein häufig vorkommendes Mineral aus der Mineralklasse der wasserfreien Carbonate ohne fremde Anionen [35].

Mineralklasse: Carbonate und Borate
 Chemische Formel: $Ca(Fe^{2+},Mg,Mn)(CO_3)_2$
 Farbe: weiß, grau, gelblich, bräunlich, i.d.R. umso dunkler, je höher der Eisengehalt

Manipulation/Imitation: Dolomit, Kutnohorit, Minrecordit

Chemische Zusammensetzung:

Element	Symbol	Masse %	Atome	Atome %	Atommasse
Kohlenstoff	C	11.64	2	20.00	12.0107800
Sauerstoff	O	46.51	6	60.00	15.9994300
Magnesium	Mg	3.53	0.3	3.00	24.3050600
Calcium	Ca	19.42	1	10.00	40.0784000
Mangan	Mn	2.66	0.1	1.00	54.9380499
Eisen	Fe	16.23	0.6	6.00	55.8452000

Tabelle 5-8: Chemische Zusammensetzung von Ankerit [34]

Vamvuka [33] untersuchte Ankerit als Additiv bei der Verbrennung von Olivenkernen und Olivenholz. Durch die Angabe von Ankerit wurde die Menge von Alkali (K, Na), Chlor in der Flugasche reduziert aber diejenigen Mengen von Ca, Mg und Mineralien waren signifikant höher. Es reduziert sich die Verschlackung /Fouling und es wurden keine Anzeichen von Asche-Ablagerung oder Bettagglomeration bemerkt.

5.2.10 Gibbsit

Gibbsit, auch unter dem Synonym Hydra(r)gillit bekannt, ist ein aluminiumhaltiges Mineral aus der Mineralklasse der Oxide und Hydroxide, genauer aus der Gruppe der Hydroxide und oxydischen Hydrate.

Chemische Formel: $Al(OH)_3$
 Mineralklasse: Oxide und Hydroxide
 Farbe: bläulich, grün, grün weiß, grau, grauweiß
 Manipulation/Imitation: Bayerit, Doyleit, Nordstrandit

Element	Symbol	Masse %	Atome	Atome %	Atommasse
Wasserstoff	H	3.88	3	42.86	1.0079470
Sauerstoff	O	61.53	3	42.86	15.9994300
Aluminium	Al	34.59	1	14.29	26.9815382

Tabelle 5-9: Chemische Zusammensetzung von Gibbsit [34]

Drift [28] untersuchte 7 verschiedene Biomassen und verwendet Gibbsit als Additiv. Gibbsit hat keine positiven Wirkungen gegen die Agglomeration gezeigt.

5.2.11 Magnesit

Magnesit ist ein häufig vorkommendes Mineral aus der Mineralklasse der wasserfreien Carbonate. Magnesit wurde nach seinem metallischen Bestandteil Magnesium benannt. Aufgrund seiner hohen Temperaturbeständigkeit ist Magnesit ein wichtiger Rohstoff zur Herstellung von feuerfesten Ziegeln, mit denen unter anderem Hochöfen-Konverter zur Stahlerzeugung und andere Schmelzöfen ausgekleidet werden [34].

Chemische Formel	$Mg[CO_3]$
Mineralklassifikation	Wasserfreie Carbonate ohne fremde Anionen

Drift [28] untersuchte Magnesit als Additiv bei der Verbrennung von sieben Biomassen. Magnesit zeigte sich sehr wirksam und es kann das Risiko der Agglomeration reduzieren. Es erhöht die Schmelztemperatur um min. 60 °C.

5.2.12 Ophit

Ophit (Griechisch ὄφις (óphis):Schlange) nach der Ähnlichkeit des Gefüges mit der Rückenzeichnung mancher Schlangen ist ein dunkelgrünes, körniges bis dichtes Gestein aus Plagioklas und pseudomorphem Amphibol (so genannte uralitische Hornblende) mit hellem Augit, primärer Hornblende, Titaneisen und bisweilen Diallag. Äußerlich ähnelt es dem Serpentin. Auf den Klüften ist es bisweilen mit gelbgrünem Epidot und Eisenglanz belegt. Es findet sich zum Beispiel in den Pyrenäen, wo es einzelne Kuppen bildet, oder auch in Spanien und Portugal, meist begleitet von grauem und ziegelrotem Gips, eisenschüssigen, bunten Tonen und violetten, roten, grünen oder grauen Mergeln. Ebenfalls von der Ähnlichkeit mit der Rückenzeichnung mancher Schlangen abgeleitet ist das ophitische Gefüge, in dem platten- oder leistenförmige Plagioklaskristalle in unregelmäßiger, oft wirrer Anordnung in einer Grundmasse anderer Mineralien liegen[35].

Plagioklas ist ein Synonym für die Anorthit- Albit -Serie. Darunter gibt es Mischkristalle aus dem Calcium- Feldspalt Anorthit und dem Natrium-Feldspalt Albit. Je nach Zusammensetzung bekommen die Mischkristalle eigene Namen [34]:

- Oligoklas = 10-30 % Anorthit
- Andesin = 30-50 % Anorthit
- Labradorit = 50-70 % Anorthit
- Bytownit = 70-90 % Anorthit

Die Amphibolgruppe (kurz: Amphibole) umfasst Silikate, die sich strukturell durch Doppelketten aus eckenverknüpften SiO_4 -Tetraedern auszeichnen und deren Zusammensetzung der folgenden verallgemeinerten Summenformel genügt:



Amphibole sind die Mineralgruppe mit der wohl größten chemischen Variabilität. Nicht zuletzt deshalb treten Amphibole weltweit in sehr vielen verschiedenen Paragenesen und geologischen Milieus auf. Sie sind ein wichtiger Bestandteil sowohl magmatischer, wie auch metamorpher Gesteine unterschiedlichster Zusammensetzung und Bildungsbedingungen [34] [35].

Llorente [41] bei der Verbrennung von Gerstenstroh, Mandelschalen, Rückständen von Olivenölgewinnung zeigte Diestel Ophit als Additiv sehr gute Ergebnisse und erwies sich als geeignet, um die Biomassesintern in allen betrachteten Fällen zu reduzieren.

5.2.13 Elementare Schwefel

Schwefel kann in verschiedenen Formen hinzugefügt werden als elementarer Schwefel, auch als Sulfat, z.B. Ammoniumsulfat, Eisensulfat.

Pettersson [39] untersuchte elementarern Schwefel bei der Verbrennung eines Gemisches aus 80% Holz – und 20 % Strohpellets. Der Zusatz von Schwefel reduziert die Belastung KCl im Abgas und kann die Alkalien in Sulfate und Aluminosilikate bilden, also der KCL-Gehalt in der Flugasche wird verringert um Kalium in stabile Verbindung überführen. Es wurde jedoch am Rauchgasaustritt eine erhöhte SO₂–Konzentration festgestellt.

5.2.14 Zeolit

Meist in Haushaltsreinigern verwendet ist Doucil 24 A, [(Na₂O) (Al₂O₃)(SiO₂) 2·2,8 H₂O]. Zeolit ist eine wichtige Komponente in den neuen Phosphat-Detergenzien als Wasserenthärter und Träger von Tensiden. Die wichtigste Aufgabe der Zeolite in den Waschmitteln ist die Erfassung von Ca und Mg- Ionen in dem Waschwasser. Der zunehmende Einsatz von phosphatfreien Waschmitteln bedeutet, dass eine erhöhte Menge von Zeolit in den Kläranlagen in der Zukunft festgehalten wird. Die Zeolite landen im Klärschlamm, die ihrerseits am Ende als Brennstoff für die Mitverbrennung in Kessel kommen können.

Pettersson [39] untersuchte Zeolit bei der Verbrennung eines Gemisches aus 80% Holz – und 20 % Strohpellets in einer 12 MW_{th} zirkulierenden Wirbelschicht. Quarzsand ist als Bettmaterial verwendet worden. Ergebnisse zeigten eine niedrige Alkalibelastung. Darüber hinaus wurde weniger Alkali- und Chlorbelastung in der Flugasche gefunden. Zeolite mit Aluminium-Silikate erfassen 80% des Alkalis in der Flugasche als unlösliches Alkali – Aluminium- Silikat.

5.2.15 Ammoniumsulfat

Ammoniumsulfat ist ein Salz aus Ammoniak und Schwefelsäure. Ammoniumsulfat wird durch das Einleiten von Ammoniak in 80%-iger Schwefelsäure oder durch Umsetzung von Ammoniak, Kohlendioxid und Wasser mit Gips hergestellt.

Chemische Formel: $H_2SO_4 + 2 NH_3 \rightarrow (NH_4)_2SO_4$

Forsberg [38] untersuchte Ammoniumsulfat und hat gute Erfolge erzielt. Er hat eine Idee zu den weiteren Untersuchungen gegeben. So hat sich auch Aho [36] auf sein Ergebniss gestützt um das Konzept reaktiveres SO₃ anstatt dem üblichen SO₂ mit den Alkalichloriden zur Reaktion zu bringen (siehe 6.2.5).

Davidsson [37] verwendet Amomiumsulfat als Additiv zur Minderung des Foulings und zur Verhinderung von Agglomeration. Es hat sich gezeigt, dass die Eindüsung von Ammoniumsulfat in Rauchgas die wirtschaftlichste der untersuchten Varianten ist.

5.2.16 Andere wenig benutzte oder nur vorgeschlagene Additive

D. Vamvuka [33] schlägt alternative, verschiedene Arten von mineralischen Additiven vor: Calcit, Emalithite, Mullit und Oxide von Calcium, Magnesium, Aluminium, Clinochlore und Eisen.

Coda [40] studierte den Einfluss von Flugasche aus Kohlenkraftwerken auf die Aschebildung bei Feuerung von Holz und Reststoffe, die auch gute Ergebnisse erzielt haben.

Aus der Literaturstudie gehen folgende Materialien als gute Kandidaten für Additive hervor:

- Kaolin
- Dolomit
- Aluminiumsulfat
- Aluminiumoxid
- Mullit
- Eisensulfat

5.3 Wirkung von verwendeten Additiven

Beispiel 1:

Verbrennung von Holzpellets [52]

Die gesammelten Schlackeproben und die Flugasche wurden weiter mit XRD für Kennzeichnung der kristallinen Phasen analysiert. Die Phasen, die in den Schlacken und in den Flugaschen gefunden wurden, werden in der Tabelle 5-10 verzeichnet. Röntgenbeugung (international *X-Ray Diffraction*, XRD) ist die Beugung von Röntgenstrahlung an geordneten Strukturen wie Kristallen oder Quasikristallen [52].

Zusammen- setzung der Schlacke	Brennstoff		Additive				Tschmelz [°C]
	Holzpellets		Kalkstein		Kaolin		
	Schlacke	Flugasche	Schlacke	Flugasche	Schlacke	Flugasche	
Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	++	+			+++		1454
Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂	++	++	++	++	+		
Ca ₂ SiO ₄	++	++		++			1544
KAlSi ₄ O ₄	++		+		+++	++	
CaAlSi ₂ O ₈		++			+++		
Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	+				++	+++	1590
SiO ₂	+	+		+	+	+++	1200
CaO	++	+++	+++	+++			2580
CaCO ₃	+++	+	+++	++			850
Ca(OH) ₂		+	+	++			550
MgO	++	++	++	+			2800
CaFeO ₂		+++		+++			
Al ₂ O ₃		++		++		++	
Ca ₂ P ₂ O ₃						+	
K ₃ P ₃ O ₉						+	

+++ : hohe Intensität: ++ : mittlere Intensität: + : niedrige Intensität

Tabelle 5-10: Schlacke- und Flugaschezusammensetzung [52]

Die XRD Analysen zeigten, dass die Schlacke während der Holzpelletsverbrennung hauptsächlich aus Kristallphasen: CaO, Ca₃Mg(SiO₄)₂, CaCO₃, Ca₂SiO₄ bestehen.

Wenn Kalkstein hinzugefügt wird, wird mit der XRD Analyse, keine Akermanite Ca₂MgSi₂O₇ in den Flugasche und Schlacke gefunden. Es werden neue Mineralphasen, wie Ca₂P₂O₃ und K₃P₃O₉ entstehen. So kann man durch die geänderten schmelzenden Verhaltensweisen der Asche, die Schlackebildung verringern.

Bei der Kalkstein-Zugabe wurde auch Ca₂SiO₄ und CaAlSi₂O₈ in der Schlacke nicht gefunden. Ebenso kann man sehen, dass bei der Kaolin-Zugabe Ca₂SiO₄ in der Schlacke und Flugasche verschwunden ist.

Bei Zugabe von Kaolin werden Ca-K-Al-Siliziumverbindungen gebildet. Diese Verbindungen haben niedrigere schmelzende Temperaturen als die Ca-Magnesium-Oxide [52].

Beispiel 2 :*Olivenkern- und Olivenholzverbrennung [33]*

Die Olivenkerne und Olivenholz sind die wichtigsten landwirtschaftlichen Rückstände von Kreta, die durch niedrigen Asche- und Schwefelinhalt gekennzeichnet sind. Das thermische Verhalten der Asche wurde untersucht.

Mineralphase	Chemische Formel	Olivenkerne	Olivenholz
Quartz	SiO ₂	+++	+++
Kalzit	CaCO ₃	++	+++
Portlandit	Ca(OH) ₂		++
Alabit	NaAlSi ₃ O ₈	+++	++
Muskovit	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂		++
Anhydrit	CaSO ₄	++	++
Kalk	CaO		+++
Hydroxylapatit	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	+++	
Dolomit	CaMg(CO ₃) ₂		+++
Eisenoxid	Fe ₂ O ₃	++	++
Aphthitalit	(K,Na) ₃ Na(SO ₄) ₂	++	+
Arkanit	K ₂ SO ₄	++	
Magnesit (Periklas)	MgO	+	++
Gehlenit	Ca ₂ Al(AlSi)O ₇		

+++ : hohe Intensität; ++ : mittlere Intensität; + : niedrige Intensität

Tabelle 5-11: Mineralogische Analyse der Flugasche [33]

Man kann merken, dass der Hauptbestandteil von Flugasche aus folgenden Mineralphasen besteht: SiO₂, CaCO₃, NaAlSi₃O₈, Fe₂O₃

Mineralphase	Olivenkernen	Olivenkerne + 5 % Kaolin	Olivenkerne + 5%Klinochlor	Olivenkerne + 5 % Ankerite
Quartz	+++	+++	+++	+++
Kalzit	++	+++	+++	+++
Portlandit				
Alabit	+++		+++	++
Muskovit				
Anhydrit	++		+++	+
Kalk				+++
Hydroxylapatit	+++	++	+	
Dolomit				
Eisenoxid	++	++	+++	+
Aphthitalit	++			
Arkanit	++		++	
Magnesit (Periklas)	+	++	+++	+++
Fairchiklite				+
Talkum				+
Kaolin		++	+++	
Klinochlor				
Ankerit			+	+

+++ : Hohe Intensität; ++ : mittlere Intensität; + : niedrige Intensität.

Tabelle 5-12: Zusammensetzung der Flugaschen von Olivenkernen mit Additivbenutzung [33]

Mit der Zugabe von Klinochloren in Olivenkernen wurde kein Aphthitalit in der Flugasche gefunden, sondern es wurde ein neues Mineral- Talkum ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$) gefunden. Bei der Klinochlorzugabe ist charakteristisch, dass Kalziumverbindungen, wie Dolomit und Kalk, nicht in der Flugasche ermittelt wurden. Diese wurden vermutlich in der Bettasche konzentriert.

Wenn Kaolin oder Klinochlore als Additive benutzt wurden, wurden die Konzentrationen des Alkalis (K, Na), Chlor, Kalzium und Eisenminerale in den Flugaschen verringert.

Bei der Zugabe von Ankerit, wurden die Konzentrationen der Minerale des Alkalis (K, Na), des Chlors und des Eisens in der Flugasche verringert und die Magnesium-Mineralien waren erheblich höher. Es werden neue Mineralphasen, wie Talkum und Fairchildite entstehen. In der Tabelle 5-13 sind die Wirkungen von zugegebenen Additiven dargestellt. Man kann zusammenfassen, dass alle Additive den Chlorgehalt deutlich verringern können.

Brennstoff	Additiv	Cl [%]
Olivenkerne		0.085
Olivenkerne	+ 5 % Kaolin	0.002
	+ 5 % Klinochlor	0.004
	+ 5 % Ankerit	0.012
Olivenholz		-
Olivenholz	+ 5 % Kaolin	0.001
	+ 5 % Klinochlor	-
	+ 5 % Ankerit	0.003

Tabelle 5-13: Clorgehalt in Flugasche von biogenen Brennstoffen [33]

Beispiel 3

Wirkung von Dolomit als Additiv

Zugabe von entsprechenden Additiven führen nicht in allen Fällen zur Erhöhung des Sinterbeginns. So hat sich gezeigt, dass Kalkstein und Dolomit Sinterbeginnstemperatur erniedrigen können. Am Beispiel in der Abbildung 5-1 ist es ersichtlich. Da haben wir bei 10 % Dolomitzugabe eine Erniedrigung des Sinterbeginns bei Gras- Strohasche [9].

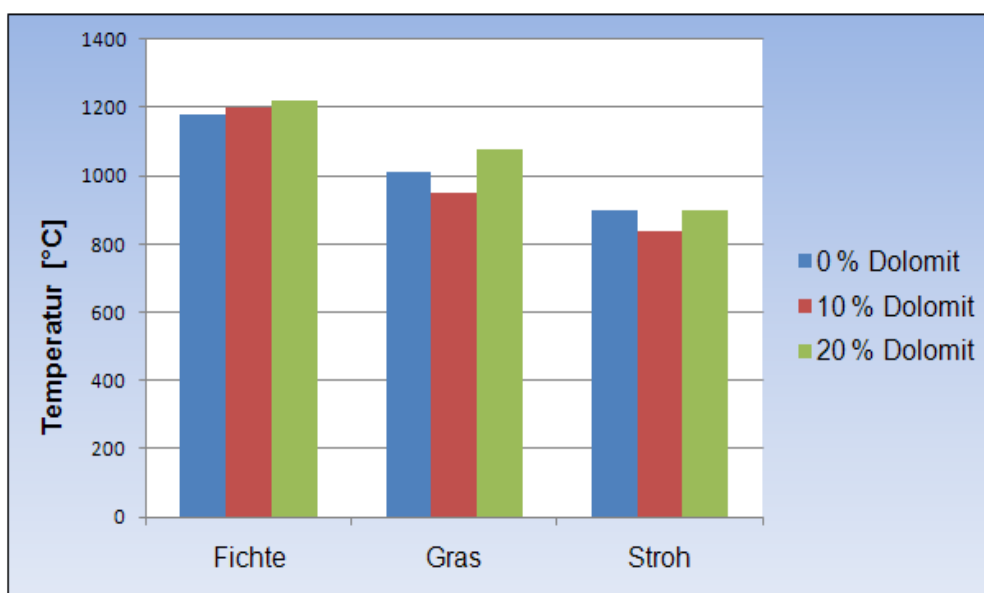


Abbildung 5-1: Sinterbeginn für Fichten-, Gras- und Strohasche [9]

Dies widerspricht in gewisser Weise der einfachen Abschätzung, wonach bei Zugabe von Dolomit = $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$, d.h. bei Erhöhung des Erdalkaligehalts der Sinterbeginn steigen sollte.

In Tabelle 5-14 sind zusammengefasste Wirkungen von verwendeten Additiven auf meistens untersuchte Biomasse gezeigt:

Additiv	Holz, Holzpellets	Olivenholz und Olivenkerne	Weizenstroh, Gerstenstroh	Klärschlamm	Weide	Mandel- Shell
Kaolin	+++	+++	+++	+++	+++	
Dolomit		++	++ (-)	++ (-)	++	+
Aluminiumoxid		-	-			-
Mullit						
Aluminiumsulfat	++					
Eisensulfat						
Kalkstein	- +	+	- +			+
Bauxit	+++					
Ankerit	++	+++				
Gibbsit						
Magnesit		++	++	++	++	
Zeolit	+++					
Ophit		+++	++			+++
Elementare Schwefel	++					
Emalthite						
Kalkstein	+++					
Flugasche aus Kohlenkraftwerke	++					

+++ : die beste Wirkung; ++ : sehr gute Wirkung ; + : gute Wirkung: - schlechte Wirkung: + - gute und negative Wirkung

Tabelle 5-14: Wirkungen von verwendeten Additiven

6 Simulation

6.1 Thermodynamische Rechnungen mit Fact Sage

Das FactSage Paket läuft auf dem MicrosoftWindows Betriebssystem eines PCs und besteht aus einer Reihe von Informations-, Datenbank- und Berechnungsmodulen. Diese ermöglichen auf reine Substanzen und Lösungsdatenbanken zurückzugreifen und damit zu manipulieren. Mit den verschiedenen Modulen kann man eine große Vielfalt thermochemischer Berechnungen und Tabellen, Diagramme und Abbildungen durchführen.

FactSage wurde im Jahr 2001 als der Verbund von zwei weithin bekannten Softwarepaketen, im Feld von Computer Thermochemie: F*A*C*T/FACT-Win und ChemSage, eingeführt. Es wird weltweit ungefähr 400 Installationen in den Universitäten, nichtstaatlichen Forschungslabors und in der Industrie verwendet [42].

Um das Agglomerationsverhalten ausgehend von den Ascheanalysen, bzw. den EDX Daten vorherzusagen, wurden thermodynamische Simulationsrechnungen mit der Software "FACTSage" durchgeführt. Dieses Programm basiert auf einem quasischemischen Modell, bei dem Stoffdaten aus einer großen Datenbank von Einzelstoffen, sowie binären und ternären Lösungen zur Bildung der Gibb'schen Enthalpie im Gleichgewicht herangezogen werden. In einem weiteren Modul können gezielte Phasendiagramme erstellt werden [42].



Abbildung 6-1: FactSage Main Menu

FactSage besteht aus mehreren Modulen, die thermodynamische Rechnungen für verschiedenartige chemische Systeme und Fragestellungen ermöglichen. Die für diese Arbeit wichtigsten Module sollen hier kurz erläutert werden.

Das Equilib Modul berechnet die Konzentrationen, chemische Zustandsformen, wenn spezifizierte Elemente teilweise reagieren, um einen Zustand des chemischen Gleichgewichts zu erreichen.

Phasen von Verbindungs- (compound) und Lösungsdatenbanken werden im Menü-Fenster als mögliche Produkte in die Berechnung mitaufgenommen. Die Produkte können reine Substanzen miteinschließen (flüssig, fest), ideale Lösungen (Gas, Flüssigkeit) und nonideal Lösungen (reale Gase, Schlacken, flüssige Salze, Leche, Keramik, Legierungen, verdünnte Lösungen, wässrige Lösungen, etc.), wie in den abgerufenen Datenbanken bereits beschrieben [42].

Das „Equilib“ ermöglicht die Berechnung des chemischen Gleichgewichts eines komplexen chemischen Systems mit bis zu 48 verschiedenen Ausgangsspezies. Ein großer Vorteil des Moduls von FactSage ist seine Flexibilität hinsichtlich der Auswahl:

- von Einheiten: K, °C, F, bar, atm, psi, J, cal, BTU, kWh, Gew.%,...
- der Stabilität bestimmter Spezies: stabil, metastabil („dormant“), instabil
- der Randbedingungen, nach denen das Gleichgewicht ausgerichtet werden soll: T, P, V, H, S, G, U, A oder jeweils deren Änderungen [42]

Das „Phasendiagramm“ ermöglicht die Erstellung von einfachen, binären, ternären und multikomponenten Phasendiagrammen. Dabei existiert wiederum eine große Auswahl an Möglichkeiten der Achsenauftragung: T, P, V, C, A, μ , ...

Als thermodynamische Datengrundlage wurde für diese Arbeit die Datenbank von FactSage gewählt. Sie enthält zwei wichtige Arten von thermodynamischen Daten, die von reinen Komponenten (Substanzen) und von realen Lösungen bestimmt ist, und sie weist besonders umfangreiche Daten für komplexe Oxidsysteme auf [42].

6.2 Verwendete Datengrundlage

Vereinfachte Modellrechnungen, die mit der Software FactSage durchgeführt wurden, dienten der ersten Charakterisierung der thermodynamisch-chemischen Zusammenhänge zwischen dem Brennstoff, dem Verbrennungs-/Rauchgas und den sich bildenden Aschen. Für die thermodynamischen Rechenmodelle wurden als Eingangsdaten für die Berechnung einer Verbrennung drei Brennstoffe verwendet. Die Stabilitätsdiagramme wurden mit Hilfe des Moduls „Equilib“ der Software FactSage berechnet.

In der Tabelle 6-1 sind die chemischen Aschezusammensetzungen der verwendeten Brennstoffe gezeigt.

Biomasse	Na	K	Ca	Mg	Si	Fe	S	Al	P	Cl	Ti	Cr	Mn
Hackschnitzel	1,1	2,2	45	18,2	15,1	2,5	4,1	4,3	3	0,2	0,3	<0,1	1,8
Weizenstroh	1,1	33,7	22,6	4,2	27		4,5		4,5	3,5			
Weide gehäckselt	0,5	9,4	49,1	8,6	9	0,8	3,9	2	15,2	0,1	0,2		

Tabelle 6-1: Aschezusammensetzungen von Biomassebrennstoffen (wt %) [29]

Zur Minimierung des Rechenaufwandes der thermodynamischen Rechnungen wurden die Analysen der Elemente Mangan, Chrom und Titan gekürzt. Diese drei Elemente sind nur in sehr geringen Mengen in der Biomasse enthalten und ihnen kommt keine bedeutende Rolle, hinsichtlich der Aschebildung, zu. In FactSage, wurden die Zusammensetzungen aus den Analysen auf 100 % normiert und in Massen als Eingangsdaten eingegeben.

6.2.1 Hackschnitzel

Zur Berechnung von festen und flüssigen Schlacken (die eine ist Oxid-betonte Schlacke (Slag-A) und zweite ist eine salzreiche Schlacke (Salt-A)) wird das Modul „Equilib“ verwendet. Die oben gegebene chemische Aschezusammensetzung von Hackschnitzel ist im Modul Equilib eingetragen. Die Rechnung war zuerst ohne Additive, mit dem Zweck die Solidus- und Liquidustemperaturen der Brennstoffasche zu berechnen, um anschließend Phasendiagramme zu erstellen.

Flüssige Schlacken bilden sich, den Berechnungen zufolge, bei einer Temperatur von 1049 °C (Aslag). Die Ergebnisse der Rechnung zeigen auch, dass sich flüssige Schlacken bei einer Temperatur von 300 °C bilden. Aus praktischen Erfahrungen kann man zusammenfassen: Bei 300 °C ist es nicht möglich, dass sich flüssige Schlacke bilden und die Phaselinien in dem betrachteten Temperaturbereich (von 300 °C bis 370 °C) kann man vernachlässigen.

Es entstehen bis zu zwei Schlackentypen: Eine rein oxydische Schlacke (Datensatz Slag-A) und eine gemischte sulfatisch –chloridische Schlacke, in der untergeordnete Karbonate und Hydroxide auftreten können (Datensatz Salt-A). Für höhere Temperaturen ist die Bildung schmelzflüssiger Schlacken dadurch realistisch und daher als thermodynamisch richtig anzusehen.

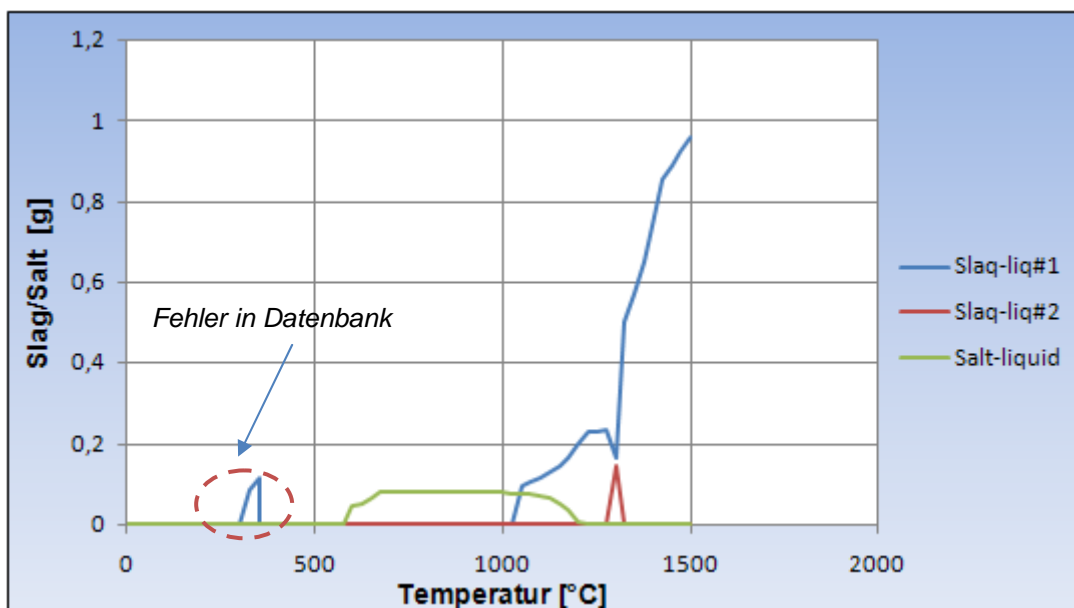


Abbildung 6-2: Simulationsrechnung für Slag/Salt im Temperaturbereich von 0 bis 1500 im Schritt von 25 °C

Weitere Versuche sind mit Additiven durchgeführt. Die Additive sind im Massenbereich von 0 bis 10 % in einem Schritt von 0,1 zugegeben.

Verwendete Additive sind:

- Aluminiumoxid Al_2O_3
- Aluminiumsulfat $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
- Kaolin $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
- Dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

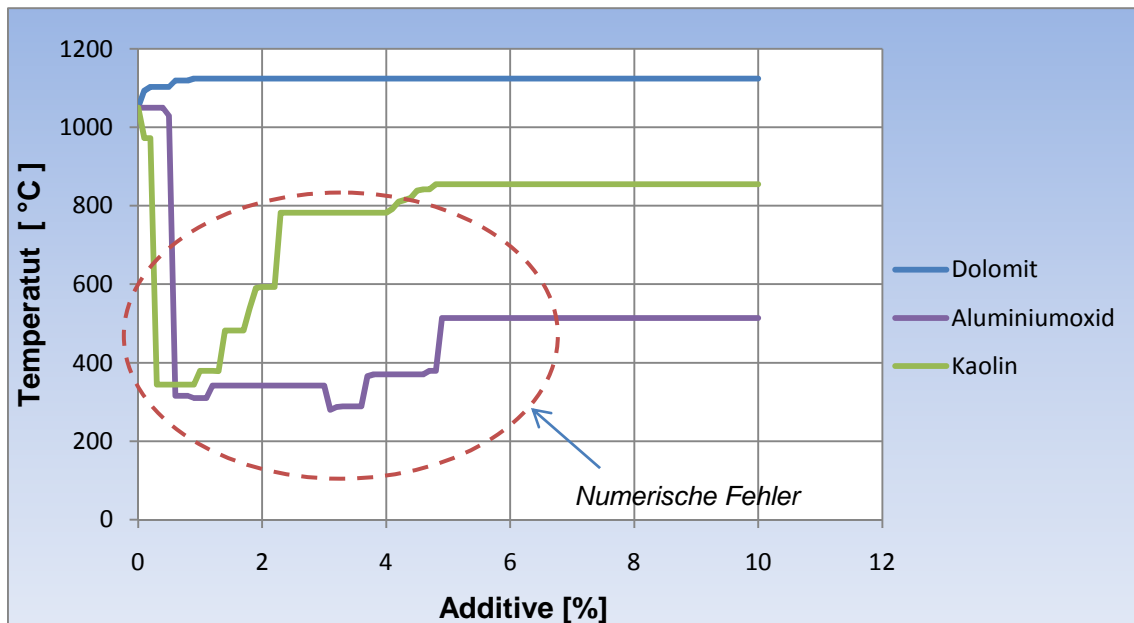


Abbildung 6-3: Simulationsergebnisse mit Additiven, Massenbereich von 0 bis 10 % im Schritt von 0,1 %

In der Abbildung 7-2 kann man erkennen, dass nur Dolomit eine positive Wirkung hat und schon bei ab 1% Additivzugabe wirkt. Temperatur Aslag wird um 70 ° C höher. Aluminiumoxid und Kaolin haben eine negative Wirkung, damit kann man ihre Wirksamkeit vernachlässigen, und dass kann man als einen Simulationsfehler betrachten. Für meine Diplomarbeit sind nur sehr kleine Massenbereiche (0 0.5 0.5) interessant und die nächsten Berechnungen basieren nur auf diesem Bereich. Abbildung 6-4 zeigt, dass die Ergebnisse sehr schlecht sind, da sie eine negative Wirkung zeigen. Die vorher beschriebenen experimentellen Ergebnisse (Kapitel 6.2) zeigen, dass die genannten Additive gute Wirkungen geleistet haben, und man kann zusammenfassen, dass die hier genannten Simulationsergebnisse unzuverlässig sind.

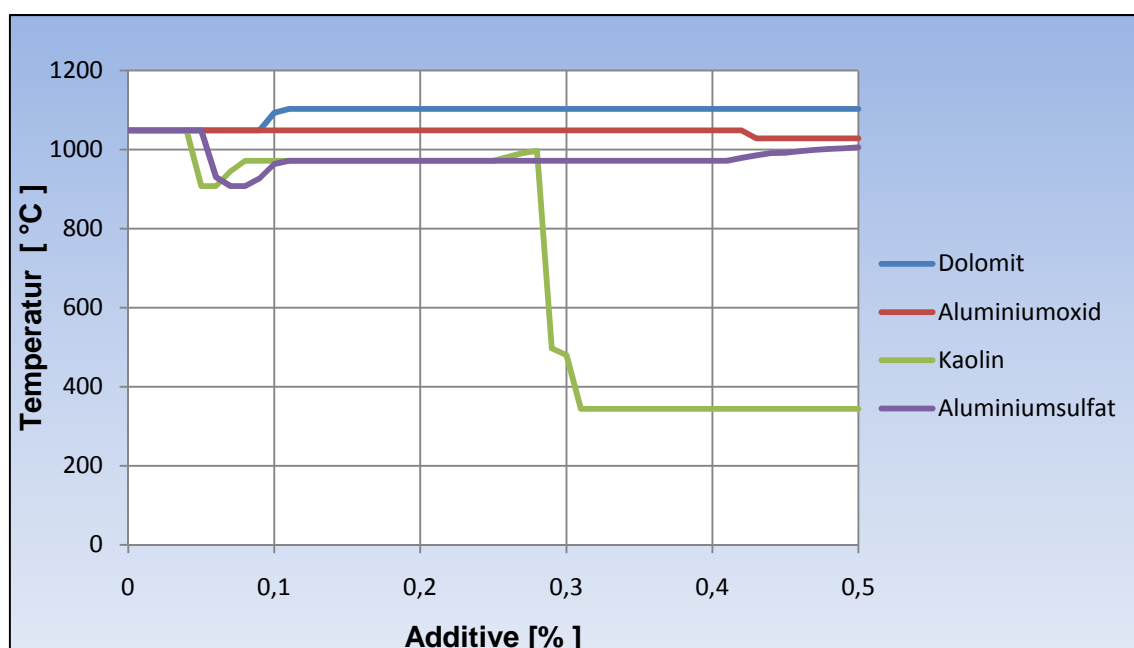


Abbildung 6-4: Simulationsergebnisse mit Additiv, Massenbereich von 0 bis 0,5 % im Schritt von 0,01 %

6.2.2 Weizenstroh

Flüssige Schlacken bilden sich bei einer Temperatur von 1007 °C (Aslag). Es entstehen wieder zwei Schlackentypen. Die Ergebnisse der Rechnung zeigen auch, dass sich flüssige salzreiche Schlacke im gesamten betrachteten Temperaturbereich von 690 °C bis 1050 °C bildet.

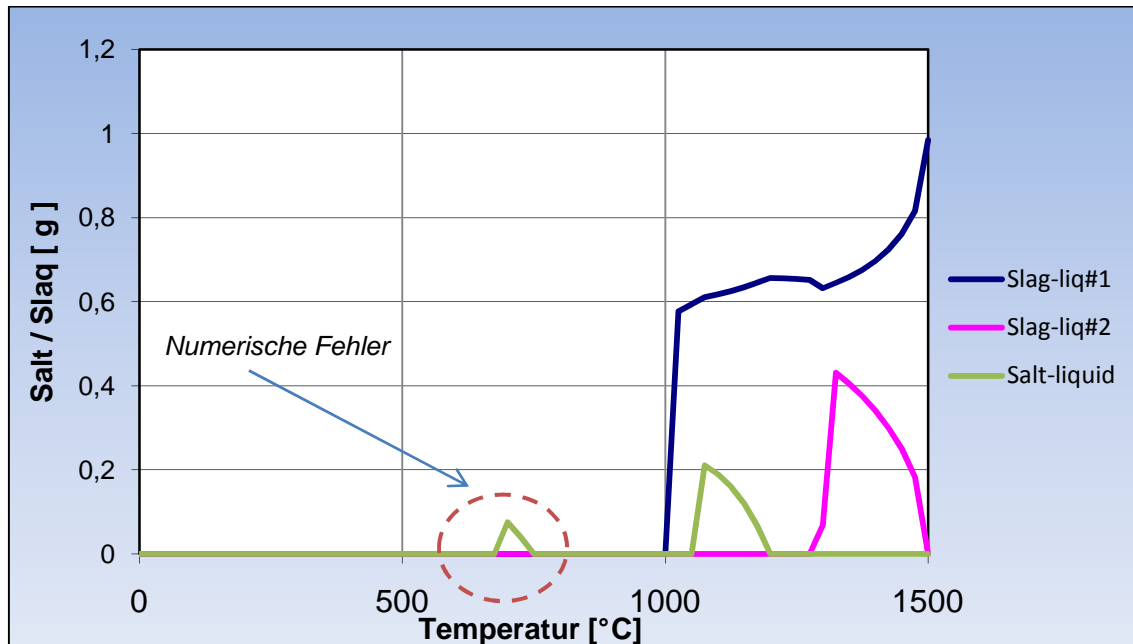


Abbildung 6-5: Simulationsrechnung für Slag/Salt im Temperaturbereich von 0 bis 1500 °C im Schritt von 25 °C

Die zweite untersuchte Biomasse zeigt bessere Ergebnisse, die davon zeugten, dass manche verwendete Additive zu erst negativ und dann positiv wirken können.

Verwendete Additive:

- Korund Al_2O_3
- Dolomit $\text{MgCa}(\text{CO}_3)$
- Aluminiumsulfat $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
- Kaolin $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
- Gibbsit $\text{Al}(\text{OH})_3$
- Mullit $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$
- Magnesit $\text{Mg}(\text{CO}_3)$

Die verwendeten Additive haben nächste Wirkung gegeben:

	Schlechte Wirkung	Gute Wirkung	Sehr gute Wirkung
	Dolomit	Kaolin	Korund
Additive	Magnesit		Aluminiumsulfat
			Mullit
			Gibbsit

Tabelle 6-2: Wirkung der Additive

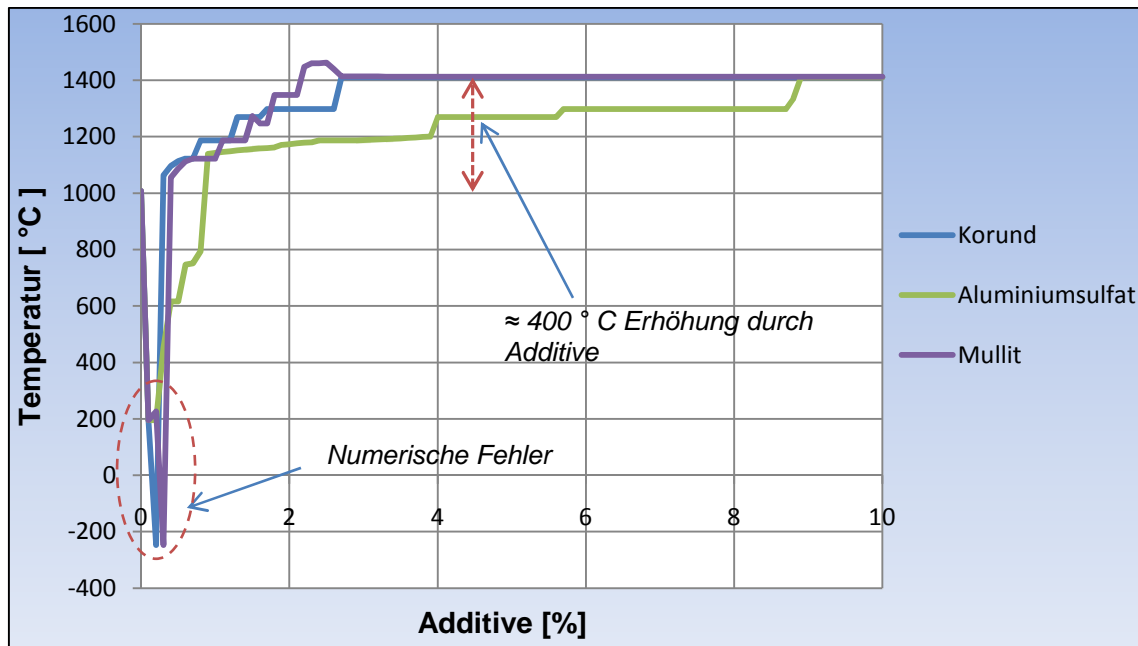


Abbildung 6-6: Simulationsrechnungen mit Additiven, Massenbereich von 0 bis 10 % im Schritt von 0,1 %

In allen Fällen sind eine deutliche Absenkung und dann eine Steigung der Aktivitäten in den Schlacken zu beachten. Diese Absenkung ist aber nur geringfügig, und sie ist wieder als ein Simulationsfehler zu betrachten.

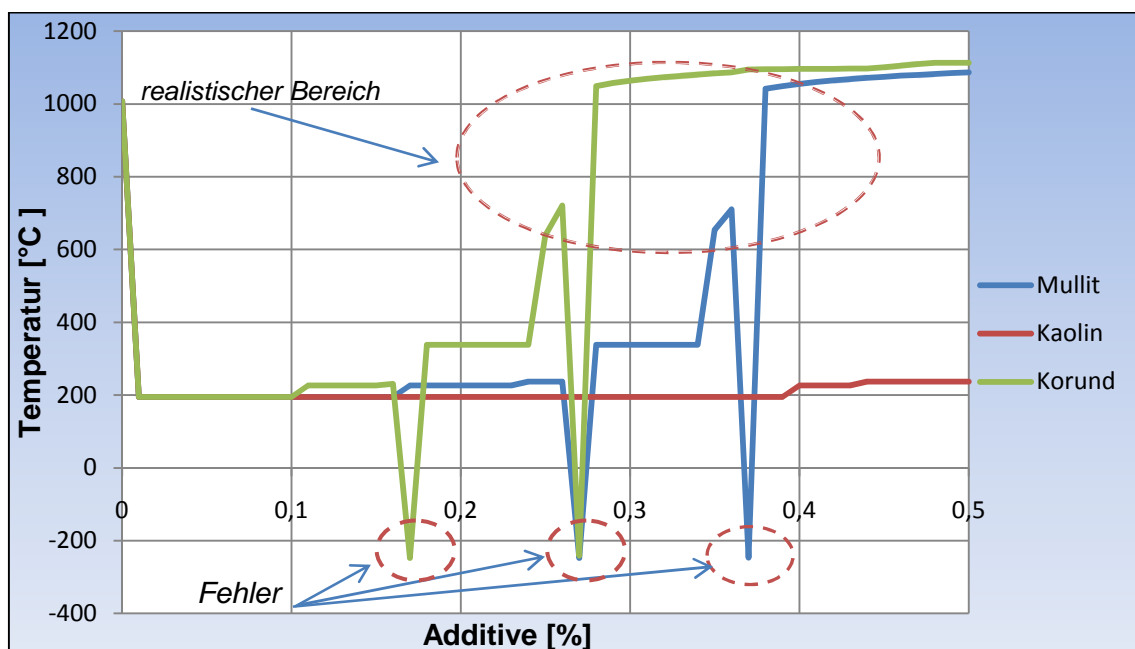


Abbildung 6-7: Simulationsrechnungen mit Additiven, Massenbereich von 0 bis 0,5 % im Schritt von 0,01 %

Die Wirkung von Additiven Mullit und Korund haben einen etwa größeren Einfluss, wie in der Absenkung so auch in der Steigung der Temperatur. Die Kaolin-Zugabe hat kaum Wirkung.

6.2.3 Weide gehäckselst Daubenspeck Brox

Man kann wieder erkennen, dass zwei Schlackentypen entstehen, und zwar im gesamten betrachteten Temperaturbereich von 400 °C bis 1400 °C.

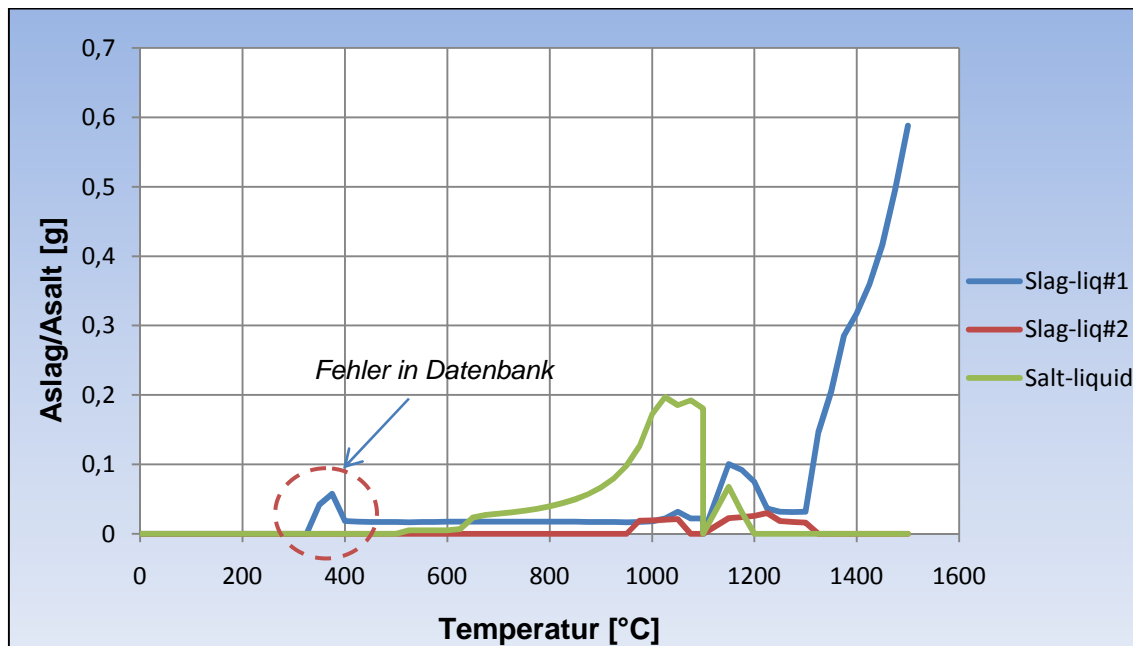


Abbildung 6-8: Simulationsrechnung für Slag/Salt im Temperaturbereich von 0 bis 1500 °C im Schritt von 25 °C

Man merkt auch, dass sich flüssige salzreiche Schlacke im gesamten betrachteten Temperaturbereich von 500 °C bis 1100 °C bildet.

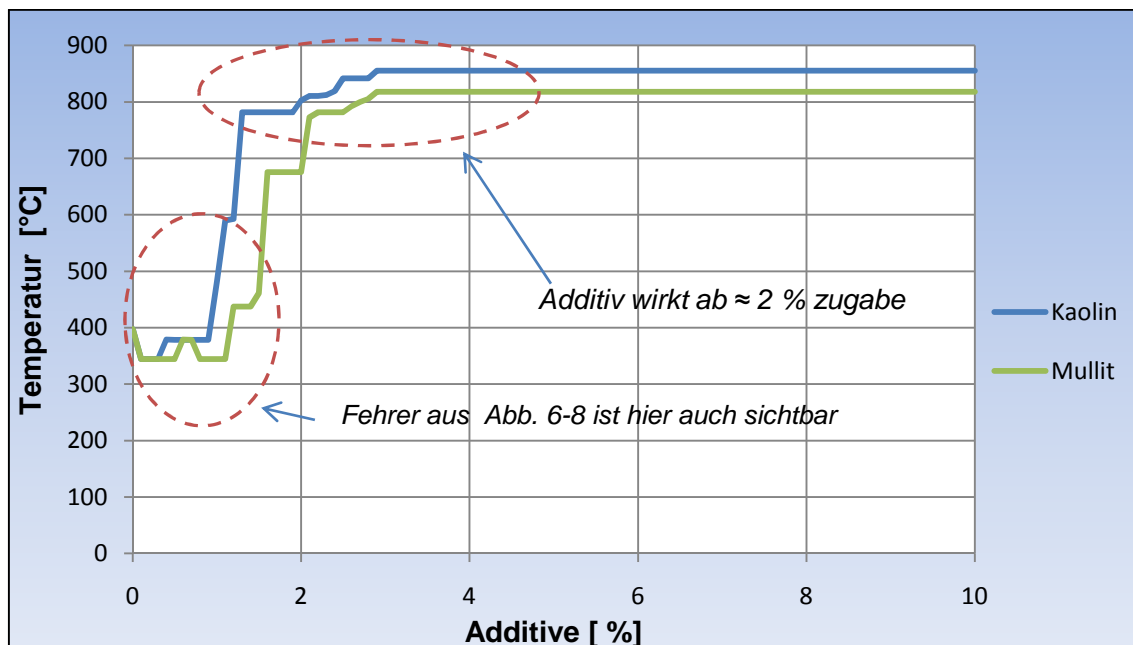


Abbildung 6-9: Simulationsrechnungen mit Additiven, Massenbereich von 0 bis 10 % im Schritt von 0,1 %

Bei der Additivzugabe lässt sich erstmals auch eine Absenkung der Aktivitäten erkennen. Diese ist wieder nur geringfügig. Kaolin und Mullit erzielen die besten Resultate. Dolomit, Magnesit, Korund haben sehr schlechte Wirkung und sie liegen in einem negativen Bereich.

Verwendete Additive:

- Kaolin $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
- Dolomit $\text{MgCa}(\text{CO}_3)$
- Magnesit $\text{Mg}(\text{CO}_3)$
- Korund Al_2O_3
- Mullit $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$
- Aluminiumsulfat $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Kaolin und Mullit erzielen die besten Resultate. Dolomit, Magnesit, Korund haben sehr schlechte Wirkung und sie liegen in einem negativen Bereich. Weitere Berechnungen haben sehr schlechte Ergebnisse gezeigt. Diese liegen in einem negativen Bereich.

Noch einmal hat sich gezeigt, dass die Simulationsergebnisse unrealistisch und unzuverlässig sind, und das kann man mit schon genannten experimentellen Versuchen (Kapitel 6.2) bestätigen. Zusammengefasst kann gesagt werden, dass das Simulationsprogramm Factsage in meinen Berechnungen nicht gute und genaue Ergebnisse gegeben hat. Über mögliche Erklärungen wird im weiteren Abschnitt (Kapitel 6.3) diskutiert.

6.3 Kritische Bewertung der thermodynamischen Oxid-Systeme

Komplexe silikatische Oxid-Systeme sind in Wissenschaft und Industrie von großer Bedeutung. Bei der Stromerzeugung aus Kohle und Biomasse sind alkalihaltige Systeme von Interesse, da während der Verbrennung korrosive Alkaliverbindungen freigesetzt werden. Daher sind die thermodynamischen Eigenschaften von komplexen, oxidischen Systemen mit hohen Mengen an Siliziumdioxid und Aluminiumoxid, sowie Alkali-, Erdalkali- und Eisenoxide sehr wichtig [50].

Thermodynamische Modellrechnungen erlauben die Beschreibung der Systeme und die Voraussage thermodynamischer Eigenschaften auch in Bereichen, in denen experimentelle Untersuchungen nicht oder nur sehr schwer möglich sind [50].

Yazhenskikh [50] hat verfügbare Phasendiagramme und die verfügbare Datenaktivität gesammelt und ausgewertet zum Zwecke der Verbesserung der Lösung der Datenbank. Die neu erhaltene Datenbank ist mit der FACT Datenbank, aus der die Daten für die reinen, festen, flüssigen und gasförmigen Phasen stammen, voll kompatibel. Dies ermöglicht die gleichzeitige Verwendung beider Datenbanken in einer Modellrechnung.

Die Gleichgewichtsrechnungen wurden für die binären Systeme $\text{Me}_2\text{O}-\text{SiO}_2$, $\text{Me}_2\text{OAl}_2\text{O}_3$ (mit $\text{Me} = \text{Na}, \text{K}$) und $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ und die ternären Systeme $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ und $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ durchgeführt. Mit den verfügbaren experimentellen Daten zeigen die berechneten Phasendiagramme jeweils eine sehr gute Übereinstimmung [64].

Im Gegensatz zu den bisher verfügbaren Datenbanken, die vor allem in Bereichen hoher Alkalikonzentrationen Lücken aufweisen, erlaubt die neue Datenbank die Beschreibung der Systeme im gesamten Konzentrationsbereich [50].

Die Untersuchungen zeigen, dass das Assoziat-Modell nicht nur für flüssige sondern auch für feste Lösungen zu geeigneten Ergebnissen führt. Dampfdrücke der Alkalien über der quaternären Schmelze und Aktivitäten der Alkalioxide in dieser Schmelze, werden deutlich besser berechnet als mit den alten Datenbanken. Die Abweichungen zwischen den experimentellen und den mit der alten Datenbank berechneten Werten von teilweise über zwei Größenordnungen, konnten durch die neue Datenbank auf unter eine Größenordnung gesenkt werden [64].

Die Untersuchungen zeigen deutlich, dass die neue Datenbank mit dem verwendeten erweiterten Assoziat-Modell für die Beschreibung komplexer Oxid-Systeme geeignet ist. Durch Einbeziehung komplexer Wechselwirkungen kann die Datenbank für die Berechnung technisch relevanter Multikomponentensysteme erweitert werden [50] [64].

6.3.1 System K₂O-SiO₂

In der Abbildung 6-10 ist ein Phasendiagramm des Stoffgemischs von SiO₂ und K₂O erkenntlich. SiO₂ ist ein Bestandteil von Bettmaterialien und K₂O ist ein Bestandteil von Biomasseasche, und diese Mengen laufen gegeneinander.

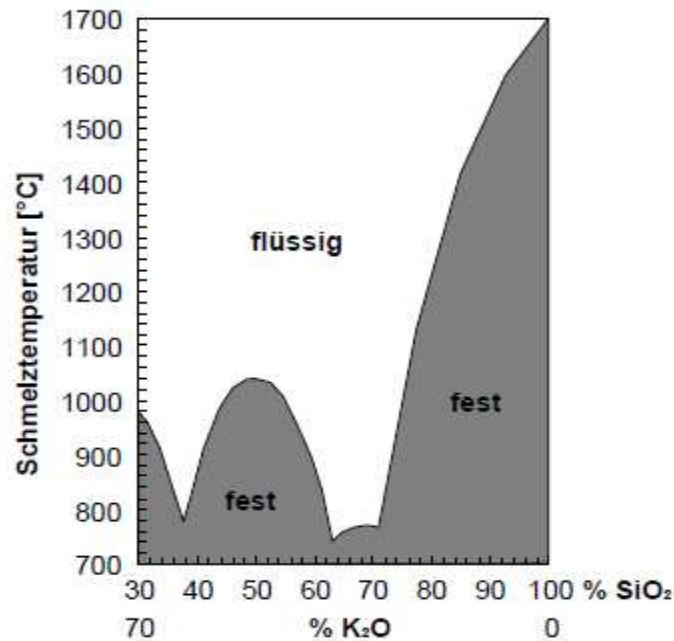


Abbildung 6-10: Phasendiagramm für das Stoffgemisch K₂O - SiO₂ [9]

Liegt die Erweichungstemperatur nahe oder sogar unter der Reaktionstemperatur, entsteht eine Verklebung der Asche mit dem Intermaterial (Coating und Agglomeration).

Die Phasenrelationen vom System K₂O-SiO₂ wurden von Kracek durch die löschende Methode studiert. Keine festen Lösungen wurden innen gefunden. Die festen Kalium-Silizium-Verbindungen wurden als stöchiometrische Mittel behandelt.

Es gibt drei Kalium-Silizium-Verbindungen:

- Metasilikat K₂SiO₃ (Schmelztemperatur bei 976 °C)
- Disilikate : K₂Si₂O₅ und K₂Si₄O₉ (Schmelztemperaturen bei 1045 °C und 770 °C)

Die Umstellungstemperaturen wurden von den thermischen Maßen des Gleichgewichts ermittelt, und diese sind 594 °C für K₂Si₂O₅ und 592 °C für K₂Si₄O₉.

Abbildung 6-11 zeigt den Vergleich der experimentellen Punkte mit berechneten Zustandsdiagrammen der verschiedenen Datenbanken. Die FACT- Datenbank verwendet die quasi chemische Annäherung und sie ist nicht in der Lage, die Phasenrelationen in dem Bereich unter dem 50 mol% Silikon darzustellen. Die Berechnungen ergeben die unrealistische Phasengrenzlinie. Die Optimierung der Gibbs- Energiedaten für Flüssigphasen basiert auf geänderten Komponenten und sie führen zu guten Ergebnissen in dem Zustandsdiagramm [50].

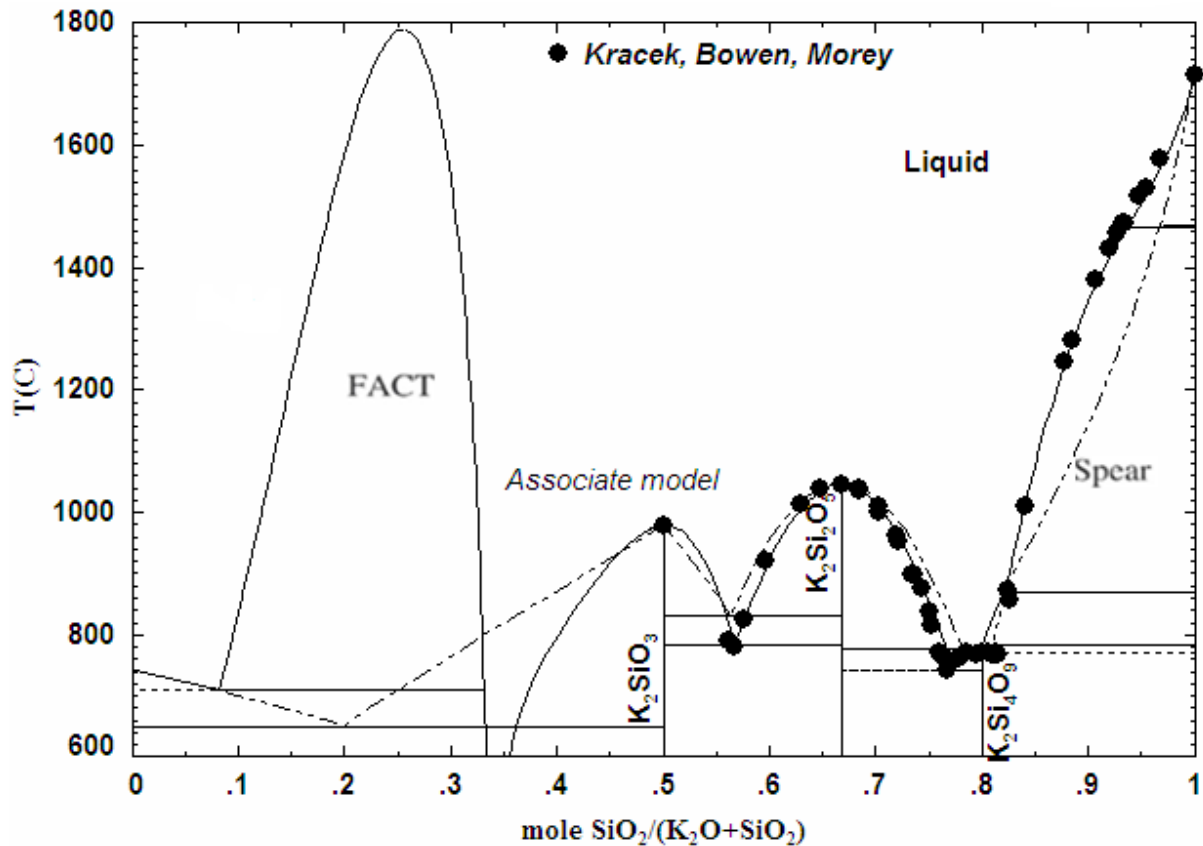


Abbildung 6-11: Phasendiagramm des K₂O-SiO₂-Systems - Neue erhaltene Daten, - FACT- Datenbank, - Spear-Datenbank [50] [64]

Weiter wurden drei eutektische Gleichgewichte betrachtet, die lokalisiert werden, wie folgt [50]:

- die Eutektika zwischen K₂SiO₃ und K₂Si₂O₅ bei dem 56.6 mol % Silizium und 781 °C
- zwischen K₂Si₂O₅ und K₄Si₂O₉ bei dem 77.3 mol% Silizium und 743 °C und das letzte Eutektika zwischen K₄Si₂O₉ und Quarz bei dem 81 mol % Silizium und 770°C

Alle diese gemessenen Punkte sowie experimentelle K₂O Aktivitäten in der Schmelze wurden benutzt, um die Gibbs- Energiedaten in diesem System zu optimieren [50].

Die verwendeten Lösungsdaten (Enthalpie und Entropie der Komponenten und der Interaktionsparameter) sind in den vorhandenen Zustandsdiagramm- und Aktivitätsdaten berücksichtigend optimiert worden. Die erhaltene Lösungsdatenbank, die mit der FACT Datenbank kompatibel ist, stellt die Phasenrelationen in den betrachteten Systemen im Einverständnis mit experimentellen Daten für die gesamten Konzentrationsbereiche dar [50].

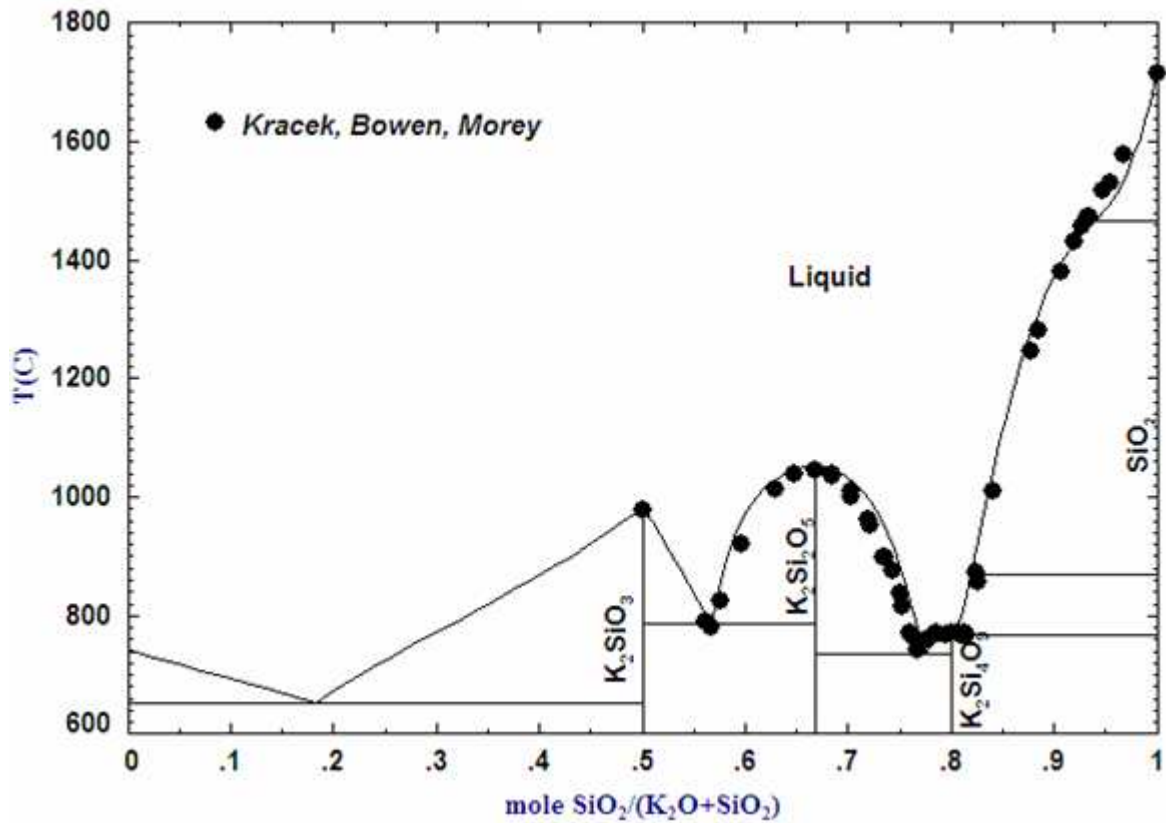


Abbildung 6-12: Phasendiagramm des K_2O-SiO_2 -Systems auf Basis der neuen optimierten Datenbank [64]

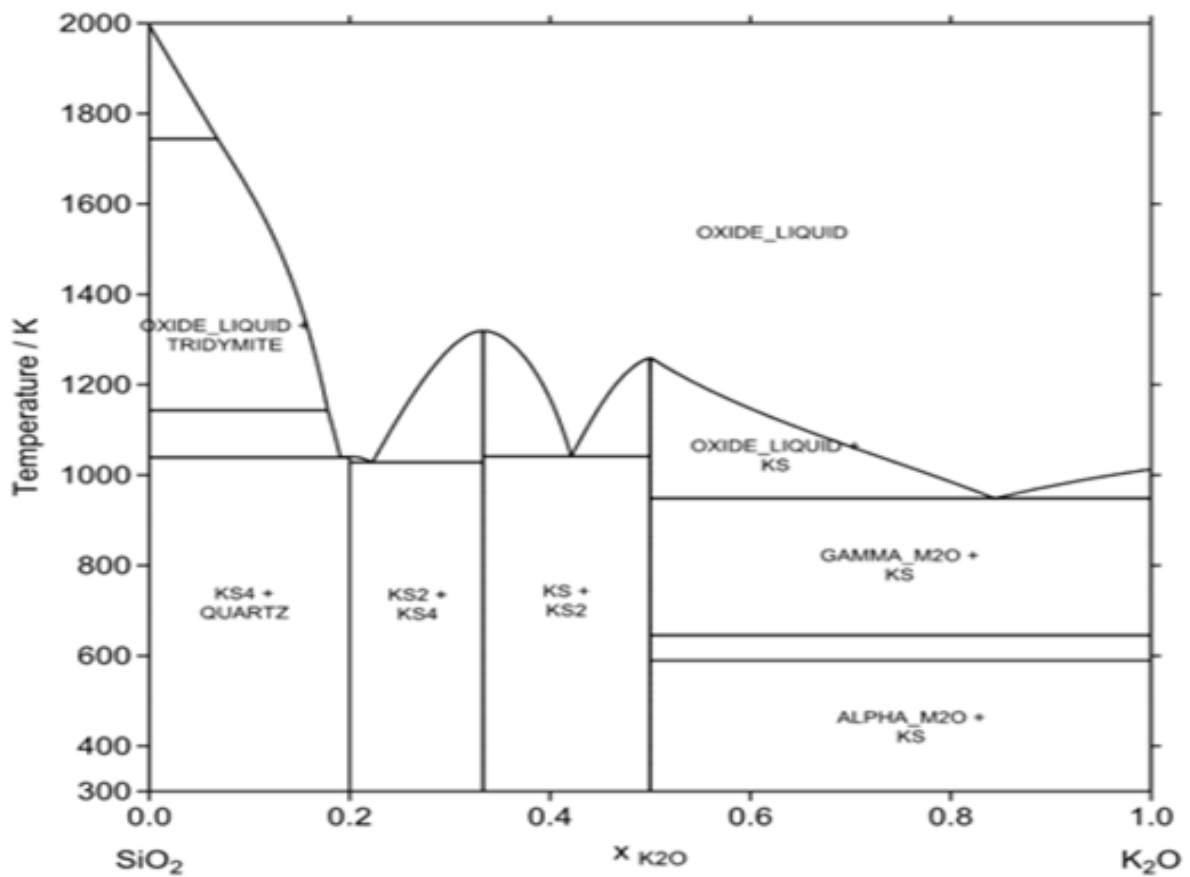


Abbildung 6-13: Phasendiagramm des $SiO_2 - K_2O$ - Systems (MT DATA)

Die neue Datenbank reproduziert das komplette Zustandsdiagramm im Gegensatz zu der FACT Lösungsdatenbank. Außerdem produziert FACT Datenbank eine flüssige Linien bei Raumtemperatur, in der K₂O-reichen Region, was unmöglich ist (z. B. Flüssigkeit bei Zimmertemperatur).

Zusammenfassend kann man sagen, dass:

- Ergebnisse unserer Simulation mit Vorsicht zu genießen sind
- Vergleichsrechnungen mit andern Datenbanken nötig sind
- Experimentelle Untersuchung der Additive ist unumgänglich

7 Versuchsanlage

Die bestehende Anlage ist als stationäre Wirbelschichtfeuerung im Labormaßstab ausgeführt. Die Versuchsanlage am Institut für Wärmetechnik ist im Zuge des Projektes „Oxifluid“ entstanden. Zweck der Anlage ist die Untersuchung von Agglomeration und Verschmutzung von neuer Biomasse. Abbildung 7-1 zeigt ein 3-D Modell der bestehenden Versuchsanlage [43].

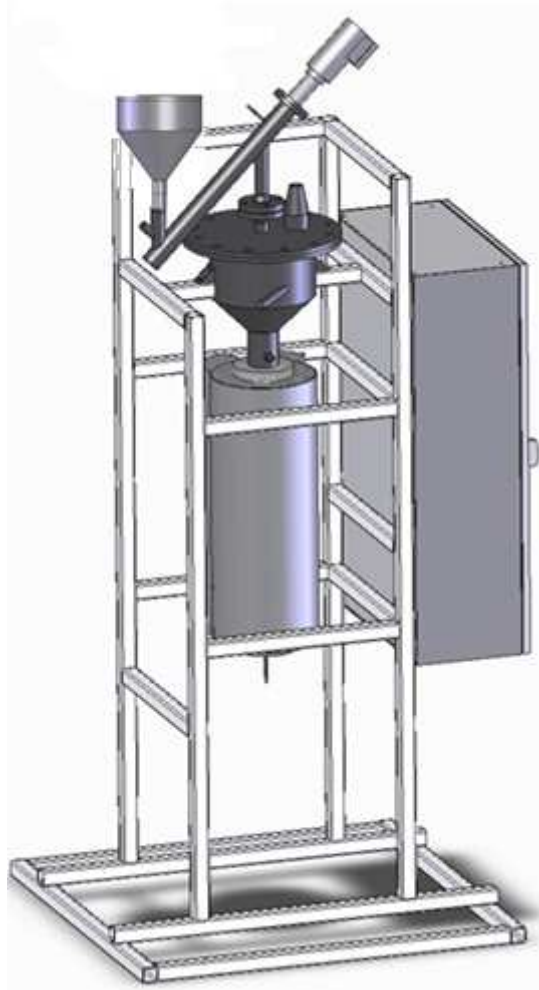


Abbildung 7-1: 3-D Modell der bestehenden Anlage [43]

Abbildung 7-2 zeigt eine Anlageschnittdarstellung mit Beschreibung der Komponenten.

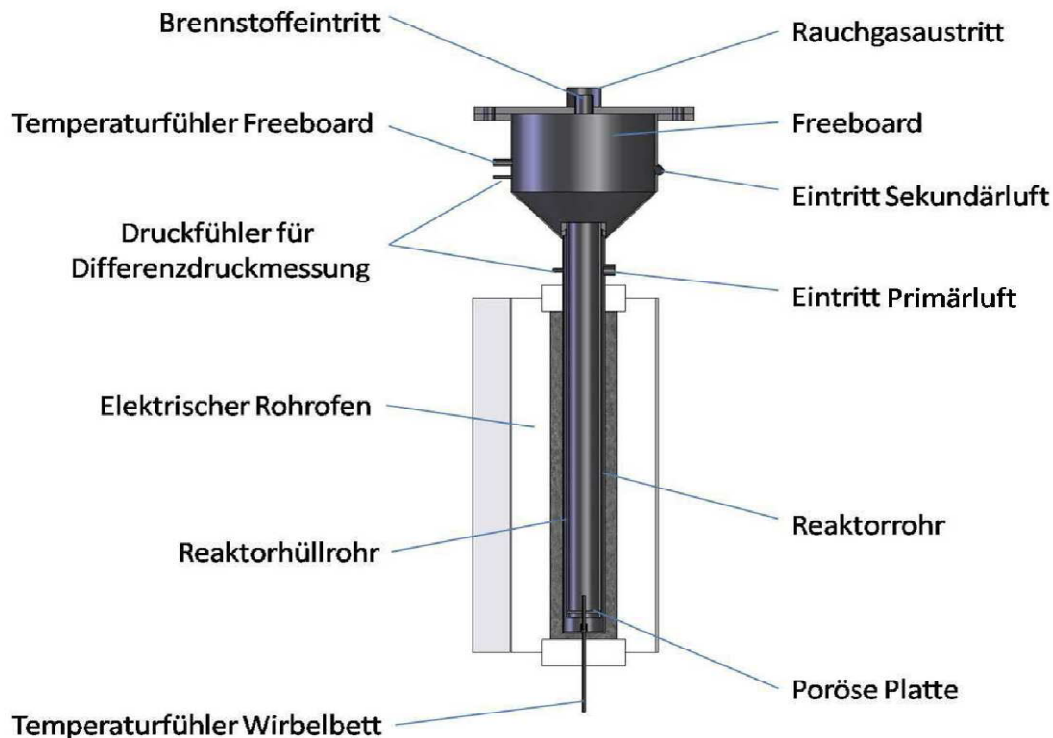


Abbildung 7-2: Schematischer Aufbau der Versuchsanlage [43]

Als Anfahrhilfe für die Brennkammer wurde ein elektrischer Rohrofen mit einer Leistung von 3 kW installiert. Eine weitere Aufgabe des Rohrofens ist die Einstellung und Stabilisierung der gewünschten Betttemperatur, da die Feuerungsleistung des Brennstoffes alleine nicht ausreicht, um die Temperatur zu halten. Die Primärluft wird über einen Ringspalt, der sich zwischen Reaktorhüllrohr und Reaktorrohr ergibt, dem Wirbelbett zugeführt, damit wird das strömende Gas vorgeheizt, wodurch sich eine annähernd konstante Temperaturverteilung über die Betthöhe ergibt. Als Düsenboden dient dabei eine poröse Platte aus Sintermetall [43].

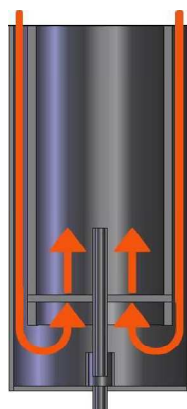


Abbildung 7-3: Strömungsführung durch Ringspalt [43]

Sekundärluft bietet die Möglichkeit einer Luftstufung in der Brennkammer und die Luft wird über das Freeboard zugeführt, dadurch lassen sich im Wirbelbett bei Bedarf unterstöchiometrische Bedingungen realisieren. Als Schnittstelle zwischen Mensch und Anlage dient dabei ein Touch-Panel, welches im Schaltschrank für die Steuerungsmodule integriert ist [43].

7.1 Bestehender Brennstoffförderer

Der Brennstoffförderer ist mit einem Schneckenförderer (Schnecke) ausgeführt. Das Fördergut wird also durch die Schnecke in einem Rohr vorwärts bewegt. Nachteilig wirken sich vor allem die Verstopfungsgefahr, sowie ein fördergutabhängiger Verschleiß von Schnecke und Rohr aus. Förderschnecken werden in der Regel von Getriebemotoren angetrieben. Der Brennstoffspeicher wurde so ausgelegt, dass bei einem Brennstoffbedarf von 0,3 kg/h eine Betriebsdauer der Anlage von ca. 12 Stunden möglich ist [43].

Mittels der Schüttversuche (Kohlenstaub, Zuckerrüben) wurde der Böschungswinkel des Brennstoffes ermittelt und dementsprechend wurde die Geometrie des Einlauftrichters so gewählt, dass keine Brückenbildung im Speicher auftritt. Der Brennstoffspeicher ist nur für feine Brennstoffe geeignet. Im gegensatz dazu, kommt es bei Holzpellets und Hackschnitzel zur Brückenbildung im Speicher [43].

Um einen Rückbrand in der Förderschnecke zu verhindern, wird das Förderrohr mit Stickstoff durchspült. In Abbildung 4-6 ist die Konstruktion des Brennstoffförders als Schnittmodell mit Beschreibung der Komponenten dargestellt [43].

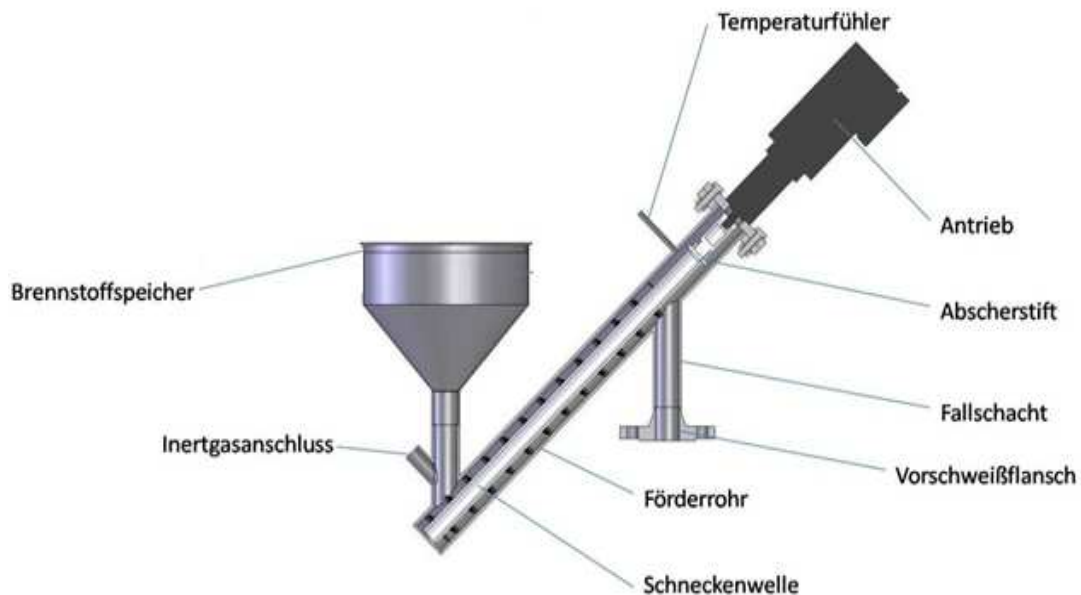


Abbildung 7-4: Brennstoffförderer [43]

Nachteile des bestehenden Brennstoffförders:

- Nur für feine Brennstoffe geeignet (Kohlenstaub)
- Ständig kommt es zur Verpressung und Verstopfung von Brennstoff
- Brückenbildung in dem Brennstoffspeicher
- Während des Betriebs wurde Rauchgas durch das Fördersystem entlassen (kein gasdichter Abschluss)
- Das Fördersystem war nicht in der Lage Holzpellets und Hackschnitzel zu transportieren

7.2 Erweiterung der Anlage

Für die geplanten Versuche musste die Anlage erweitert und modifiziert werden. Die Haupterweiterung wurde am Brennstoffförder durchgeführt. In den folgenden Abschnitten wird die Erweiterung genauer beschrieben und erläutert.

7.2.1 Adaptierter Brennstoffförder

Eine wichtige Anforderung an den Brennstoffförder ist eine gute Dosierbarkeit des Brennstoffes, um eine vollständige Verbrennung des Brennstoffes zu ermöglichen. Weitere wesentliche Anforderungen sind kostengünstiger und einfacher Aufbau des Fördersystems. Der Brennstoffförder soll für verschiedene Brennstoffe (feine und stückige Schüttgüter) geeignet sein und muss den gasdichten Abschluss heben. Deshalb fiel die Wahl auf eine Kombination von Zentralschleuse und Schneckenförder, die den Brennstoff von oben durch einen Fallschacht in die Brennkammer einbringt.

7.2.1.1 Schneckenförder

Schneckenförder werden besonders für feine und staubförmige Schüttgüter eingesetzt (z.B. Holzmehl, Mais, Kohlenstaub). Heiße Schüttgüter (bis 800 °C) sind mit Hilfe einer hohlen, von innen gekühlten Schneckenwelle förderbar. Bei klebrigen und anbackenden Schüttgütern besteht die Gefahr, dass sich die Schneckenwendel mit dem Schüttgut zusetzen und diese zusammen mit der Schnecke rotieren, ohne gefördert zu werden. Um die Verstopfungsgefahr sowie einen fördergutabhängigen Verschleiss von Schnecke und Rohr zu verhindern, werden die Schnecken ohne Wellen eingesetzt [60].

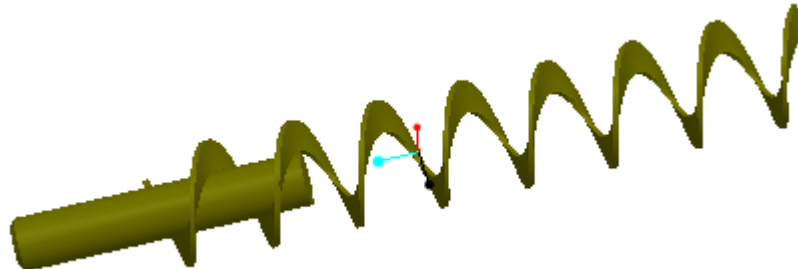


Abbildung 7-5: Schnecke

In der Norm DIN 15201 sind Schneckenförderer als „Stetigförderer“ definiert. Grundsätzlich erfolgte die Auslegung der Förderschnecke nach DIN 15261. Bei bestehender Anlage liegen der Schneckendurchmesser und die Schneckensteigung bei 39 mm bzw. 32 mm. Bei der adaptierten Anlage ist die Schnecke ohne Welle eingesetzt und sie verläuft waagrecht. Das Fördergut wird also durch die Schnecke in einem Förderrohr vorwärts bewegt. Der Förderweg ist damit verkürzt und der Brennstoff wird nicht mehr schräg transportiert sondern gerade. Die Förderschnecke wird von dem Getriebemotor angetrieben. Als Antriebseinheit wurde ein bereits am Institut für Wärmetechnik vorhandener Asynchronmotor mit Planetengetriebe der Firma Lenze eingebaut. Dieser Motor weist eine Leistung von 75 Watt auf. Die Motordrehzahl von 1350 1/min bei 50 Hz wird durch das Planetengetriebe auf 8 1/min herabgesetzt. Weiters ist bei der Antriebseinheit ein Frequenzumrichter installiert, der es ermöglicht, die Drehzahl stufenlos zu regeln [43] [60].

Der tatsächliche Brennstoffmassenstromes wird durch Ausliterungsversuche ermittelt. Um eine bestimmte Schneckendrehzahl zu bestimmen, musste zuerst die entsprechende Frequenz am Frequenzumrichter berechnet werden. Bei einer Frequenz von 50 Hz beträgt die Drehzahl des Schneckenantriebes 8 Umdrehungen pro Minute. Nach der Gleichung (7-1) kann die Drehzahl mit der Frequenz beliebig gesteuert werden.

$$f = \frac{50}{8} \cdot n = 6,25 \cdot n \quad (7-1)$$

Der Schneckenförder kann bei einer Frequenz von 3,5 Hz, $1,58 \cdot 10^{-4}$ kg/s Brennstoff aufnehmen und bis zum Reaktorrohr transportieren. Bei dieser Menge von Brennstoff (Holzpellets) kann es bei maximaler Primärluftzufuhr noch zu einer vollständigen Verbrennung kommen und damit werden ideale Verbrennungsbedingungen ermöglicht. Das ist die Randbedingung für weitere Berechnungen bei der Entwicklung der Zellradschleuse.

7.2.1.2 Zellradschleuse

Die Zellradschleuse soll bei der Versuchsanlage das Ausströmen von Rauchgas durch den Brennstoffförderer verhindern. Sie wird meistens als Silo-Austragegerät für verschiedene Schüttgüter eingesetzt. Das Schüttgut „fließt“ von oben aufgrund der Schwerkraft in die Zellen des Zellenrades und fällt unten wieder heraus. Standard-Zellradschleusen werden für relativ gut fließende, fein und stückige Schüttgüter eingesetzt. Das Zellrad dreht sich und transportiert den in die Kammern gefallenen Brennstoff nach unten. Im nächsten Schritt rotiert die entleerte Kammer wieder nach oben und wird erneut mit Brennstoff gefüllt. Die Zellradschleuse ist für einen Temperaturbereich bis 600°C geeignet [60].

Für die Zellradschleuse wurden zwei unterschiedliche Varianten des Zellrads untersucht. Die eine Variante hatte eine runde Kammer und die andere hatte eine dreieckige Kammer. Vorteile und Nachteile der zwei Varianten werden begründet um sich so für die bessere Variante entscheiden zu können, die unsere Anforderungen erfüllen kann.



Abbildung 7-6: Zellrad mit runder Kammer (links) und mit dreieckiger Kammer (rechts)

Einige Vorteile der dreieckigen Kammer sind:

- einfach zu fertigen
- eignet sich für ein kleines Fördervolumen
- die Zähne haben eine scharfe Kante (→ Scherwirkung)
- sicherer Austrag aus dem Brennstoffspeicher für alle Biomassen
- leichter Ausfall des Brennstoffes aus der Kammer

Vorteile und Nachteile der runden Kammer:

Vorteile:

- einfach zu fertigen
- symmetrisch (d.h. es ist egal in welcher Orientierung das Holzstück reinfällt)
- keine Verpressung des Förderguts in der Kammer (keine Ecken)

Nachteile:

- größeres Fördervolumen
- beschränkt in der Öffnungsbreite (Breite =Tiefe)
- keine scharfe Kante (größere Schneidekraft)

Nach den oben genannten Vorteilen und Nachteilen der beiden Varianten, fällt die Entscheidung auf das Zellrad mit den dreieckigen Kammern.

Die Gründe für eine solche Entscheidung sind folgende:

- das gewählte Zellrad besitzt ein kleines Fördervolumen was nötig ist, um den Brennstoff mit gewünschter Fördermenge transportieren zu können
- die Zähne haben eine scharfe Kante (Schneidekraft ist kleiner)

Festlegung und Berechnung der konstruktiven Ausführung der Zellradschleuse

Der Grundkörper der Zellradschleuse soll aus Edelstahl gefertigt werden und somit kann die Korrosion im Normalbetrieb ausgeschlossen werden. Für die Schleusedichtungen wurden zwei Teflondichtungen gewählt, die mit zwei Zellradzähnen befestigt sind. Die Zähne sind mit zwei Schrauben gesichert, was sich vorteilhaft auf die Montage und Demontage auswirkt. Dadurch wird die Formstabilität von dem Zellrad erheblich verbessert und die Dichtungen garantieren eine hohe Dichtheit gegenüber den Schleifflächen und eine hohe Lebensdauer.

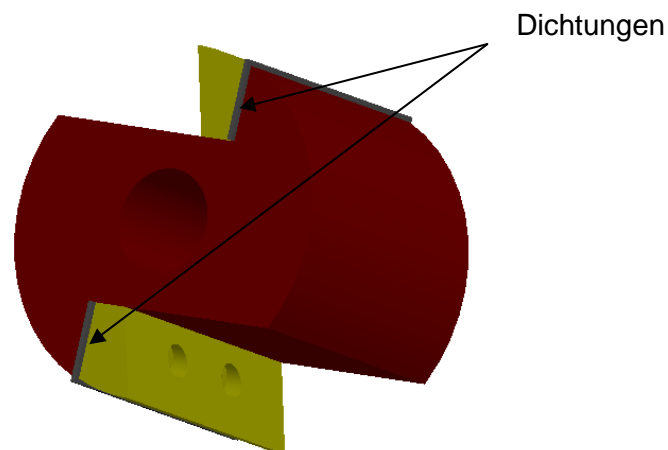


Abbildung 7-7: Zellrad mit Dichtungen

Hauptabmessungen der Zellradschleuse:

Der Fördermassenstrom der Schnecke beträgt $1,58 \cdot 10^{-4}$ [kg/s] Brennstoff (Holzpellets) und das ist die Hauptbedingung für weitere Berechnungen und Entwicklung der Zellradschleuse. Um diese Randbedingung zu erfüllen, sollte der Fördermassenstrom der Zellradschleuse gleich wie der Fördermassenstrom der Schnecke sein.

$$\dot{m}_{\text{Schnecke}} = \dot{m}_{\text{Zellradschleuse}} \quad (7-2)$$

Um genau $1,58 \cdot 10^{-4}$ [kg/s] Brennstoff zu fördern, hat die entwickelte Zellradschleuse folgende bekannte Größen:

Bekannt:			
$\dot{m}_{sch.}$	=	$1,581 \cdot 10^{-4}$	[kg/s] Fördermassenstrom der Schnecke
d	=	0.1	[m] Zellraddurchmesser
b	=	0.075	[m] Zellradbreite
k	=	2	Kammerzahl
ρ	=	650	[kg / m ³] Holzpelletsdichte (Schüttdichte) [61]
h	=	0.025	[m] Zahnhöhe
V_k	=	$6,59 \cdot 10^{-5}$	[m ³] Volumen eines Ausschnitts (Kammervolumen)

Die geförderte Masse der entwickelten Zellradschleuse berechnet man nach der Gleichung (7-3):

$$m_{zell} = 2 \cdot V_k \left[m^3 \right] \cdot \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] = 0,085 \text{ [kg]} \quad (7-3)$$

Das entspricht einer Holzpelletsmasse von $8,5 \cdot 10^{-2}$ [kg] oder 85 [g] bei einer Umdrehung des Zellrads. Um Verstopfungen im Zwischenspeicher zu verhindern, muss der Fördermassenstrom der Zellradschleuse gleich wie der Fördermassenstrom der Schnecke sein.

$$\dot{m}_{sch} \left[\frac{kg}{s} \right] = \dot{m}_{zell} \left[\frac{kg}{s} \right] = m_{zell} \text{ [kg]} \cdot n \left[\frac{1}{s} \right] \quad (7-4)$$

Die Drehzahl der Zellradschleuse wird mit der Gleichung (7-5) berechnet. Die Gleichung gilt nur unter der Bedingung, dass die Zellradkammern vollständig gefüllt sind.

$$n = \frac{\dot{m}_{sch.}}{\dot{m}_{zell.}} = \frac{1,581 \cdot 10^{-4} \left[\frac{kg}{s} \right]}{0,082 \text{ [kg]}} = 0,0018436 \left[\frac{1}{s} \right] \quad (7-5)$$

$$n = 0,1106174 \text{ [1/min]}$$

$$n = 6,6370458 \text{ [1/h]}$$

Das Zellrad muss sich 0,11-mal pro Minute drehen um $1,58 \cdot 10^{-4}$ [kg/s] oder 9,5 [g/min] Brennstoff fördern zu können. Die Zellradkammern werden in Realität nie vollständig gefüllt sein, deswegen muss der Füllgrad für die Zellradschleuse verwendet werden. Nach folgender Gleichung (7-6) ergibt sich der Füllgrad für die Zellradschleuse $\alpha = 0.56$ [58]. Der Füllungsgrad α ist das Verhältnis aus tatsächlichen Transportvolumen zum theoretischen Transportvolumen.

$$\alpha = \frac{\dot{m}_{zell}}{V_k \cdot k \cdot n \cdot \rho} \rightarrow n = \frac{\dot{m}_{zell}}{\alpha \cdot V_k \cdot k \cdot \rho} \quad (7-6)$$

Aus der Gleichung (7-6) wird die Drehzahl der Zellradschleuse berechnet.

Bekannt:			
m_{zell}	=	$1,581 \cdot 10^{-4}$	[kg/s] Fördermassenstrom der Zellradschleuse
V_k	=	$6,5947 \cdot 10^{-5}$	[m ³] Kammervolumen
k	=	2	[-] Kammerzahl
n	=	0,0018436	[1/s] Drehzahl der Zellradschleuse
α	=	0,56	[-] Füllgrad [58]
ρ	=	650	[kg/m ³] Pelletsdichte [61]

$$n = \frac{1,581 \cdot 10^{-4} \left[\frac{kg}{s} \right]}{0,56 \cdot 6,5947 \cdot 10^{-5} \left[m^3 \right] \cdot 2 \cdot 650 \left[\frac{kg}{m^3} \right]} = 3,29 \cdot 10^{-3} \left[\frac{1}{s} \right]$$

Um den benötigten Fördervolumen zu fördern, soll sich die Zellradschleuse, bei einem Füllgrad von 0,56, 11,8-mal in einer Stunde umdrehen.

$$n = 11,8518676 \text{ [1/h]} = 0,19753113 \text{ [1/min]} = 0,0039 \text{ [1/sek]}$$

Die Antriebsleistung

Die maximale Schneidekraft auf der Zellradkante wird mit einer auf dem Institut bestehenden hydraulischen Presse gemessen. Das ist jene Kraft welche das Zellrad benötigt um verschiedene Brennstoffe (z.B. Holzpellets, Hackschnitzel) durchzubrechen. Mit der Schneidekraft und dem Radius des Zellrads kann man den Moment mit folgender Gleichung (7-7) bestimmen.

Bekannt:			
F_y	=	3500	[N] Schneidekraft (experimentell bestimmt)
r	=	0,05	[m] Zellradius

$$M_t = F_y \cdot r = 3500 \text{ [N]} \cdot 0,05 \text{ [m]} = 175 \text{ [Nm]} \quad (7-7)$$

Die Antriebsleistung wird mit der Gleichung (7-8) berechnet:

Bekannt:			
M_t	=	175	[Nm] Torsionsmoment
n	=	$3,14 \cdot 10^{-3}$	[1/s] Drehzahl

$$P = 2 \cdot \pi \cdot n \left[\frac{1}{s} \right] \cdot M_t \text{ [Nm]} = 3,617 \text{ [W]} \quad (7-8)$$

Durch Auswertung der Gleichung (7-8) erhält man eine Antriebsleistung von $P = 3,6 \text{ [W]}$. Die Schleuse wird von einem Motor (Type:BN56A4B5) mit einer Leistung von 60 W über ein Doppelschneckengetriebe (Type:VF30/W63) angetrieben.

Wellendurchmesser Berechnung

Kräfte auf dem Zellrad und der Welle

Die Welle wird durch das Torsionsmoment und durch die Streckenlast in Y- und Z- Richtung beansprucht. Das Gewicht vom transportierten Brennstoff und des Zellrads sind sehr klein und haben damit kaum einen Einfluß auf das Biegemoment.

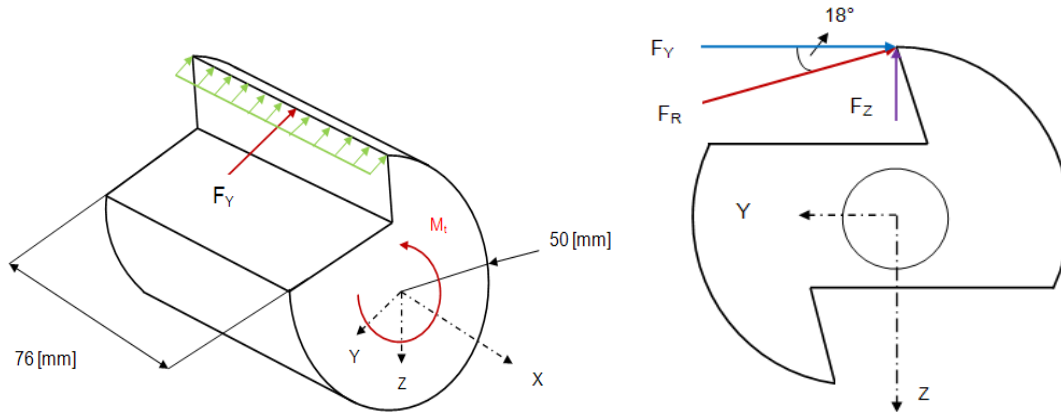


Abbildung 7-8: Kräfte auf dem Zellrad und der Welle

$$\cos 18^\circ = \frac{F_Y}{F_R} \rightarrow F_R = \frac{3500[N]}{\cos 18^\circ} = 3680[N] \quad \sin 18^\circ = \frac{F_Z}{F_R} \rightarrow F_Z = 3680[N] \cdot \sin 18^\circ = 1137[N]$$

F_Y	=	3500	[N]	Schneidekraft in Richtung Y-Achse (gemessen)
F_R	=	3680	[N]	Resultierende Schneidekraft
F_Z	=	1137	[N]	Schneidekraft in Richtung Z- Achse

Dimensionierungsformel für Torsion [56]

Die erforderlichen minimalen Wellendurchmesser berechnet man nach folgender Gleichung:

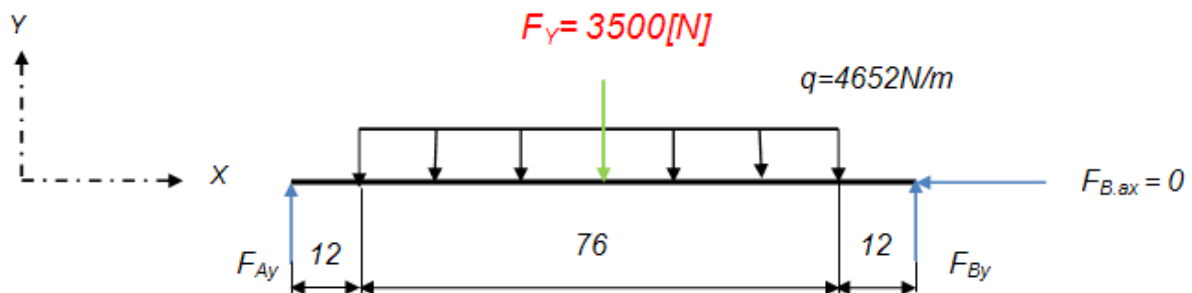
$$d \geq 3 \sqrt{\frac{16 \cdot M_t}{\pi \cdot \tau_{zul}}} \rightarrow d \geq 3 \sqrt{\frac{16 \cdot 175000 \left[\frac{N}{mm} \right]}{\pi \cdot 46 \left[\frac{N}{mm^2} \right]}} \geq 26,7 [mm] \quad (7-9)$$

Die zulässige Torsionsfestigkeit wird nach der Gleichung (7-10) berechnet [56]:

$$\tau_{zul} = \frac{\tau_{sch.}}{S} = 46 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (7-10)$$

Bekannt:					
Werkstoff	=	St 60-2			
M_t	=	175	[Nm]	Drehmoment	175000 [Nmm]
s	=	5		Sicherheit [56]	
τ_{sch}	=	230	[N/mm ²]	Torsionsfestigkeit (schwellend) [55]	

Nach dem Einsetzen schon bekannter Größen in der Gleichung (7-9) erhält man ein minimales Wellendurchmesser von 26,7 [mm].

Dimensionierungsformel für die Biegung [56]Biegung wird durch die Streckenlast in Richtung Y- Achse verursacht

Die Lagerkräfte betragen 1750 [N] und der Abstand zwischen den Lagern beträgt 0.1 [m]. Das maximale Biegemoment wirkt im Kraftangriffspunkt und beträgt: $M_{b,max,z} = 68,2$ [Nm]

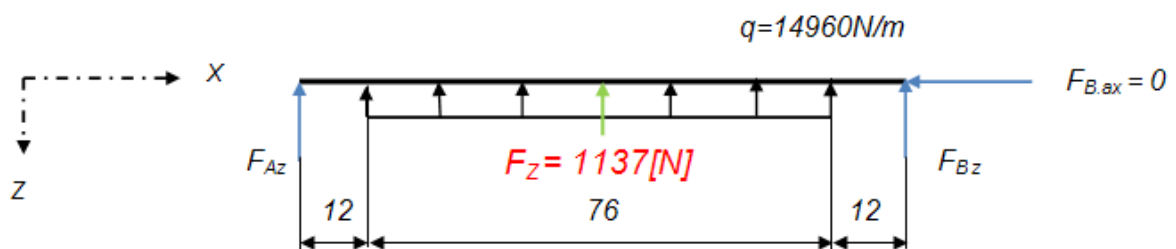
Bekannt:		
Lagerkräfte	1750	[N]
Wellenwerkstoff	St 60-2	
Biegefestigkeit (schwellend) [55]	400	[N/mm ²]
Sicherheitsbeiwert [56]	4	
Zulässige Biegefestigkeit	100	[N/mm ²]

Zulässige Biegefestigkeit wird aus der Gleichung (7-11) berechnet [56]:

$$\sigma_{b,zul} = \frac{\sigma_{b,sch}}{S} = 100 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (7-11)$$

Mit der Gleichung (7-12) berechnet man die Streckenlast in Y- Achse:

$$q = \frac{3500[N]}{76[mm]} = 46 \left[\frac{N}{mm} \right] = \frac{1137[N]}{0,076[m]} = 46052 \left[\frac{N}{m} \right] \quad (7-12)$$

Biegung verursacht durch eine Streckenlast in Z -Achse

Die Lagerkräfte betragen: $F_{Az} = F_{Bz} = - 552,6$ [N] und das maximale Biegemoment wirkt im Kraftangriffspunkt und beträgt: $M_{b,max,y} = - 22$ [Nm].

Aus der Gleichung (7-13) rechnet man die Streckenlast aus:

$$q = \frac{1137[N]}{76[mm]} = 14,9 \left[\frac{N}{mm} \right] = \frac{1137[N]}{0,076[m]} = 14960 \left[\frac{N}{m} \right] \quad (7-13)$$

Das resultierende Biegemoment wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$M_b = \sqrt{(M_{b,max,y})^2 + (M_{b,max,z})^2} = 71,4 [Nm] \quad (7-14)$$

Die minimalen Wellendurchmesser bei der Biegungbelastung berechnet man nach folgender Gleichung (7-15) [56]:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{M_b \cdot 32}{\pi \cdot \sigma_{b,zul}}} \rightarrow d \geq \sqrt[3]{\frac{71400[Nmm] \cdot 32}{\pi \cdot 100 \left[\frac{N}{mm^2} \right]}} \geq 19.3[mm] \quad (7-15)$$

Durch Auswertung der Gleichung (7-15) erhält man einen minimalen Wellendurchmesser von **$d \approx 19[mm]$** . Der minimale Wellendurchmesser bei Biegebeanspruchung (19 mm) ist kleiner als bei der Torsionsbelastung (28 mm) und deswegen erfolgen weitere Berechnungen für den Wellendurchmesser von $d = 30 [mm]$.

Lagerung

Jedes Lager wird durch die Radialkräfte $F_y = 1750 [N]$ und $F_z = 568 [N]$ belastet, daraus ergibt sich eine resultierende Radialkraft $F_{rez.} = 1840 [N]$.

$$F_{rez.} = \sqrt{(F_y)^2 + (F_z)^2} = 1840[N] \quad (7-16)$$

Das Radiallager wird allein durch eine resultierende radiale Kraft belastet. Somit ist die dynamische äquivalente Lagerbelastung gleich, wie die resultierende Kraft ($P = F_{rez.}$). So ist jedes Lager nur mit einer Kraft von 1840 [N] belastet.

Für Wellendurchmesser von 30 mm wurde ein Rillenkugellager 6206 gewählt, mit folgenden Werten (SKF – Katalog):

Bekannt:				
Rillenkugellager 6206				
d	=	30	[mm]	Wellendurchmesser
D	=	62	[mm]	Lageraußendurchmesser
C	=	19,3	[kN]	dynamische Tragzahl
C_0	=	9,8	[kN]	statische Tragzahl
$F_{rez.}$	=	1,840	[kN]	resultierende Kraft

Dimensionierung bei dynamischer Belastung

Die Lebensdauer in Millionen Umdrehungen ergibt sich nach der Gleichung (7-17):

$$L = \left(\frac{C}{P} \right)^p = \left(\frac{19,3}{1,840} \right)^3 = 1154,6 \quad (7-17)$$

Bekannt				
P	=	1,840	[kN]	Dynamische äquivalente Lagerbelastung
p	=	3		Lebensdauerexponent [56]
n	=	0,110617	[min ⁻¹]	Drehzahl des Lagers [aus der Gleichung (7-8)]

Bei konstanter Drehzahl errechnet sich die Ermüdungslaufzeit mit der Gleichung (7-18)

$$L_h = \frac{L \cdot 10^6}{n \cdot 60} = 175397727 [h] \quad (7-18)$$

L_h Nominale Lebensdauer = 175397727 Stunde

Dimensionierung bei statischer Belastung:

Der Nachweis für ein ausreichend tragfähiges Lager ist die statische Kennzahl f_s [56]:

$$f_s = \frac{C_0}{P_0} \quad (7-19)$$

Die statisch äquivalente Belastung P_0 ist eine rechnerische, rein radiale Belastung bei Radiallagern bzw. eine reine axiale und zentrische Belastung bei Axiallagern. Sie ergibt sich allgemein aus der Gleichung (7-20) [56].

$$P_0 = x \cdot F_R + y \cdot F_a \quad (7-20)$$

Bei nur radial belasteten Lagern ($F_a = 0$), sieht die Gleichung (7-20) folgendermaßen aus:

$$P_0 = F_R$$

F_a ... Statische axiale Lagerkraft
 F_r ... Statische radiale Lagerkraft
 Y ... der Axialfaktor des Lagers
 X ... der Radialfaktor des Lagers ($X = 1$) [56]

C_0 statische Tragzahl
 P_0 statisch äquivalente Belastung des Lagers = 1,840[kN]
 f_s statische Kennzahl (bei normalen Ansprüchen $f_s = 1$) [56]

Mit der Gleichung (7-19) erhalten wir die statische Tragzahl:

$$C_0 = P_0 \cdot f_s = 1,8[kN]$$

Nach der Auswertung der Gleichung (7-19) kann man C_0 bestimmen und dann aus dem SKF- Lagerkatalog die passenden Werte für die statische Tragzahl entnehmen. Für den berechneten Wert $C_0 = 1.8 [kN]$ wurde die statische Tragzahl von 2,45 [kN] gewählt. Das entspricht dem Lager 61805 und hat folgende Werte (SKF – Katalog):

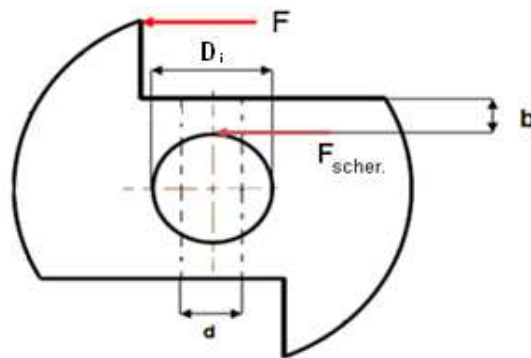
Gewählt:			
Lager 61805			
d	= 25	[mm]	Wellendurchmesser
D	= 37	[mm]	Lageraußendurchmesser
C	= 3,8	[kN]	dynamische Tragzahl
C_0	= 2,45	[kN]	statische Tragzahl
B	= 7	[kN]	Lagerbreite

Für das ausgewählte Lager berechnet man wieder die dynamisch äquivalente Lagerbelastung (Lebensdauer) aus der Gleichung (7-17) und (7-18).

$$L = 8880605 \quad \text{Millionen Umdrehungen}$$

$$L_h = 1338035 \quad \text{Stunden}$$

Die Lager werden durch Sicherungsringe gesichert und in Ringnuten eingesetzt. Folgende Sicherungsringe wurden ausgewählt [55]: **DIN 471-25x1.2**

Bolzenverbindung**Abbildung 7-9: Zellrad-Wellenverbindung mit Bolzen**

Bekannt:			
d	=	14	[mm]
F	=	3500	[N]
D_i	=	30	[mm]
b	=	10	[mm]
M	=	175000	[Nmm]

Werkstoff	=	St 50	
p_{zul}	=	76	[N/mm ²]
τ_{zul}	=	60	[N/mm ²]

Die Verbindung zwischen Zellrad und Welle erfolgt durch zwei Bolzen. Die Bolzenverbindungen werden auf Abscherung und Flächenpressung berechnet. Aus dem schon bekannten Torsionsmoment kann man die Scherkraft ausrechnen:

$$M_t = F_{scher.} \cdot \frac{a}{2} \Rightarrow F_{scher.} = \frac{2M_t}{a} = 11666,6[N] \quad (7-21)$$

Die Bolzenfläche rechnet man nach folgender Gleichung (7-22):

$$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = \frac{(14\text{mm})^2 \cdot \pi}{4} = 153,9[\text{mm}^2] \quad (7-22)$$

Die vorhandene Flächenpressung und Abscherung dürfen nicht ihre zulässigen Werte überschreiten. Für den gewählten Werkstoff St 50 sind zulässige Spannungen für jeden Belastungsfall bekannt. Die Verbindung zwischen der Welle und dem Zellrad erfolgt durch zwei Bolzen, wodurch vorhandene Beanspruchungen (Flächenpressung und Abscherung) auf diese verteilt werden, also durch 2 dividiert werden.

Abscherung [56]:

$$\tau = \frac{F_{scher.}}{4 \cdot A} \leq \tau_{zul} = \frac{11666,66[N]}{4 \cdot 154[\text{mm}^2]} \quad (7-23)$$

$$\tau = 19 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right] \leq 60 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

Flächenpressung am Innenteil [56]:

$$P_i = \frac{6 \cdot M_t}{2 \cdot (D_i^2 \cdot d)} \leq p_{zul} = \frac{6 \cdot 175000[Nmm]}{2 \cdot (30^2[\text{mm}^2] \cdot 14[\text{mm}])} \leq 76 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right] \quad (7-24)$$

$$p_i = 42 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right] \leq 76 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

Flächenpressung am Aussenteil [56]:

$$p_a = \frac{4 \cdot M_t}{2 \cdot d \cdot (D_a^2 - D_i^2)} \leq p_{zul} = \frac{4 \cdot 175000 [N]}{2 \cdot 14 [mm] \cdot (1600 [mm^2])} \leq 76 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (7-25)$$

$$p_F = 15,6 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \leq 76 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

Die Berechnung zeigt, dass vorhandene Beanspruchungen (Flächenpressung, Abscherung) kleiner als die zulässigen Werte sind. Es werden die Bolzen ohne Köpfe nach DIN EN 22340, 14h11 x 50 x St 50 ausgewählt [55].

Berechnung der Paßfeder

Die vorhandene Flächenpressung darf nicht die zulässige überschreiten. Weiteres wird die Flächenpressung in der Wellennut überprüft [56].

$$M_d = F \cdot a = p \cdot \overset{\cdot}{l} \cdot \frac{h}{2} \cdot \frac{d}{2} \quad (7-26)$$

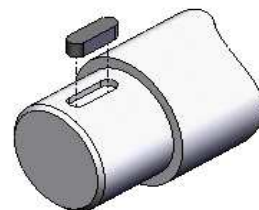
$$\overset{\cdot}{l} = l - b = 28 [mm] - 8 [mm] = 20 [mm] \quad (7-27)$$

$$p = \frac{4 \cdot M_d}{\overset{\cdot}{l} \cdot h \cdot d} \leq p_{zul} = \frac{4 \cdot 175000 [Nmm]}{20 [mm] \cdot 7 [mm] \cdot 25 [mm]} \leq 240 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (7-28)$$

Für den gewählten Werkstoff (St 60-2) ist die zulässige Pressung $p_{zul} = 240 [N/mm^2]$ [59]:

Bekannt:			
M_d	=	175 000	[Nmm] Moment
Werkstoff	=	St 60-2	
h	=	7	[mm] Höhe
b	=	8	[mm] Breite
l	=	28	[mm] Länge
d	=	25	[mm] Wellendurchmesser
$\overset{\cdot}{l}$	=	20	[mm] Tragende Länge

$$p = 200 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \leq 240 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$



Die vorhandene Flächenpressung ist kleiner als die zulässige Flächenpressung. Damit wurde folgende Paßfeder ausgewählt [55:]: **DIN6885 A 8 x 7 x 28**

Brennstoffspeicher und Zwischenspeicher

Die verfahrenstechnische Brennstoffspeicherauslegung liefert die grundlegende Trichterform, die maximalen Trichterneigungswinkel für Massenfluss und die minimale Auslaufgrößen zur Vermeidung von Brücken- und Schachtbildung. Der Brennstoffspeicher ist mit einem konischen Ausgang gekennzeichnet und hat einen Neigungswinkel von 20° und somit wird die Brückenbildung vermieden. Der Brennstoffspeicher hat ein Volumen von 6,5 l. Bei einer Brennstoffdichte von 650 kg/m^3 (Holzpellets) enthält der Speicher 4,5 kg Brennstoff.

Der Zwischenspeicher hat einen keilförmigen Auslauf. Dadurch kann der Schneckenförder Brennstoff besser aufnehmen und weiter transportieren, ohne Brückenbildung und Verstopfung zu verursachen.

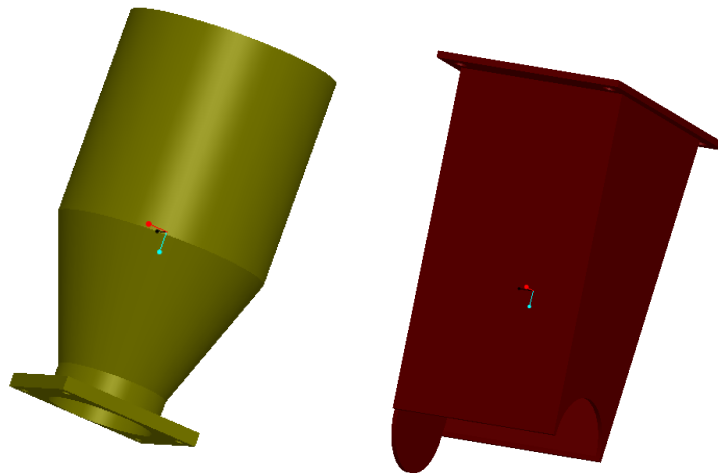


Abbildung 7-10: Brennstoffspeicher (rechts) und Zwischenspeicher (links)

Es wäre von Vorteil, dass im Zwischenspeicher ein Füllstandsmessgerät eingebaut wird, damit der Füllstand (Standhöhe) von Schüttgütern gemessen wird. Beim ausgelegten Zwischenspeicher kommen drei verschiedene Methoden in Frage:

- Elektromechanische Lotsysteme
- Messung mit Mikrowellen
- Lichtschranke

Beim elektromechanischen Lotsystem wird ein Messband in dem Speicher runter gelassen. Beim Auftreffen des Gewichtes auf der Füllgutoberfläche lässt die Zugkraft am Messband nach, wodurch der Motor umgeschaltet wird. So lässt sich der Füllstand berechnen [63].

Diese Methode ist bei der adaptierten Anlage technisch schwer zu realisieren aus folgenden Gründen:

- sehr kleiner Speicher
- keine Möglichkeit zur Befestigung des Systems
- Speicher hat kein Deckel, also Füllgewicht muss im Gehäuse befestigt werden
- Befestigung des Füllgeräts von den Seiten des Speichers ist sehr schwer auszuführen
- die Methode ist nur für hohe Speicher geeignet

Die Messung mit Mikrowellen beruht auf einem Sender-Empfängerprinzip. Von einem Sender ausgesandte Mikrowellenimpulse werden durch einen leeren Brennstoffspeicher vom Empfänger registriert, durch einen vollen Brennstoffspeicher jedoch vom Medium gedämpft. Mikrowellenschranken melden Verstopfungen, signalisieren Grenzstände, lösen Positionierungs- und Zählaufgaben auf, messen berührungslos von außen und sind damit verschleiß- und wartungsfrei. Die Messung mit diesen Methoden ist technisch möglich aber der Einbau des Systems bei unserer Adaptierungsanlage wäre sehr kompliziert und teuer [63].

Eine weitere Methode ist der Einbau von einer Lichtschranke und die eignet sich zur Innen- und Aussenraumüberwachung. Das ist ein elektronisch-optisches System, das die Unterbrechung eines Lichtstrahls erkennt. Das Funktionsprinzip einer Lichtschranke ist gleich dem Funktionsprinzip der Mikrowellenschranke. Der Einbau dieser Methode ist billiger und kann bei unserer Anlage verwendet werden.



Abbildung 7-11: Messung mit elektromechanischen Lotsystemen (links) und Messung mit Mikrowellen (rechts) [63]

Um die eventuellen Verstopfungen im Zwischenspeicher zu vermeiden, wird folgendes vorgeschlagen:

- Für jeden Brennstoff muss zunächst gesondert die Förderungsbedingungen neu eingestellt werden. Die Ermittlung des tatsächlichen Brennstoffmassenstromes von der Zellradschleuse kann durch Ausliterungsversuche (Massendurchsatz pro Zeit) bestimmt werden. In nächsten Schritt wird bei entsprechender Frequenz der geförderte Massenstrom abgewogen. Aus den daraus gewonnenen Daten kann der lineare Zusammenhang zwischen dem Brennstoffmassenstrom und der Frequenz festgestellt werden. Mit dem Frequenzumrichter kann man die Drehzahl regulieren und damit auch den geförderten Massenstrom. Nach der Berechnung ist bekannt, wieviel Brennstoff die Zellradschleuse fördern und der Schneckenförder aufnehmen kann. Somit kann man die Verstopfung vermeiden.

Abbildung 7-12 zeigt die ausgelegte Zellradschleuse, wie sie für die Versuche verwendet werden kann.

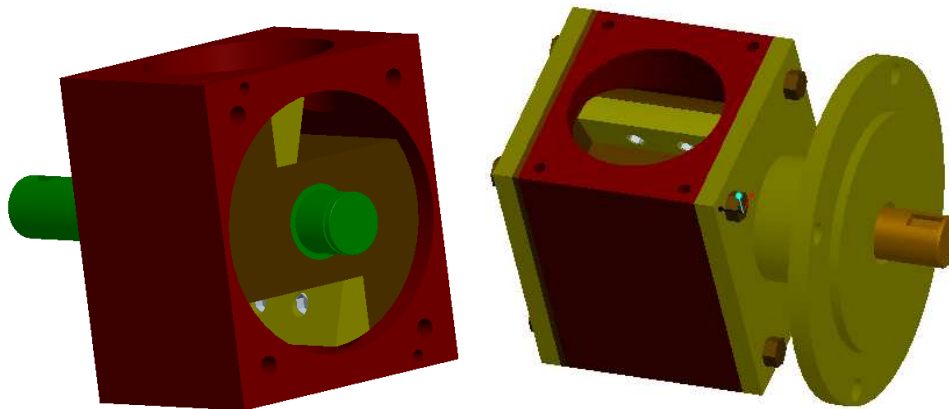


Abbildung 7-12: Zellradschleuse

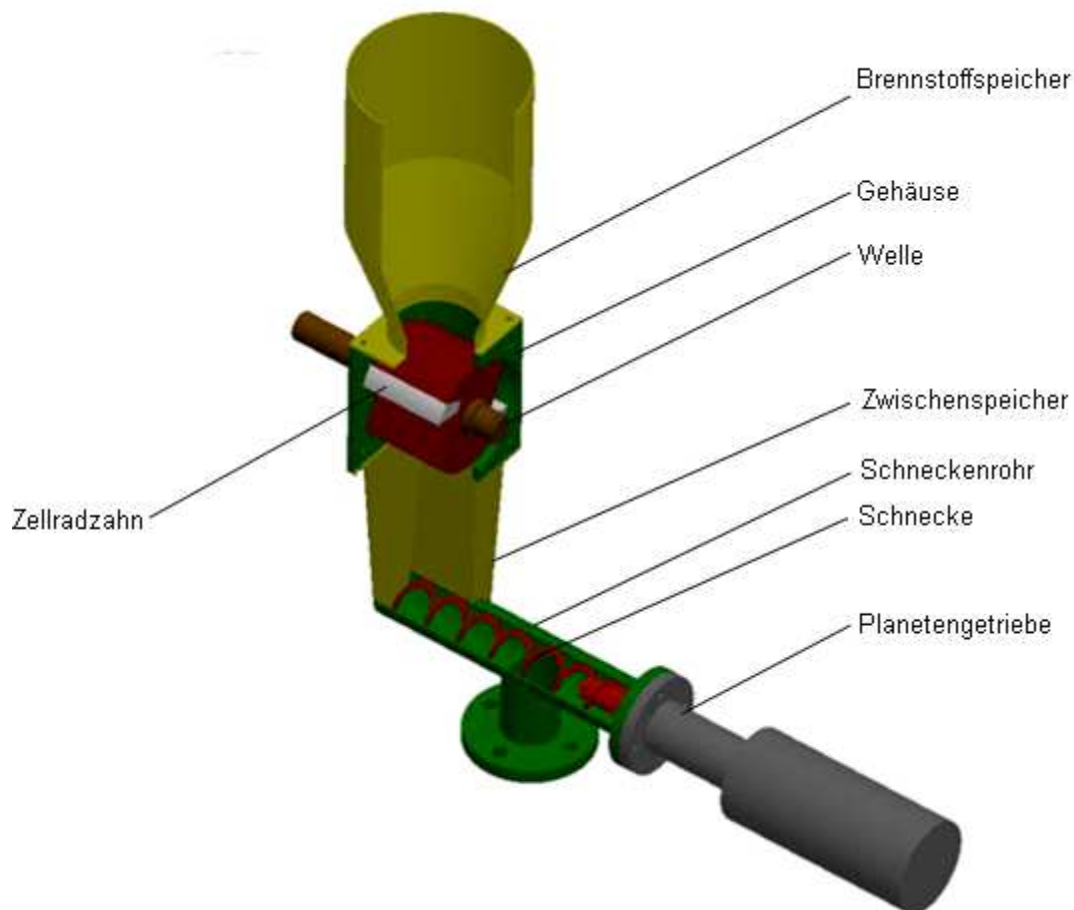


Abbildung 7-13: Fördersystem

Der Brennstoff „fließt“ von oben aufgrund der Schwerkraft in die Zellen des Zellenrades und fällt unten wieder heraus. Das Zellrad dreht sich und transportiert den in den Kammern gefallenen Brennstoff nach unten. Im nächsten Schritt rotiert die entleerte Kammer wieder nach oben und wird erneut mit dem Brennstoff gefüllt. Danach fällt das Fördergut in den Zwischenbehälter, welche einen keilförmigen Auslauf hat. Dadurch kann der Schneckenförder das Fördergut besser aufnehmen und weiter transportieren. Das Fördergut wird in das Schneckenrohr mit einer Schnecke bis zum Reaktorrohr gefördert.

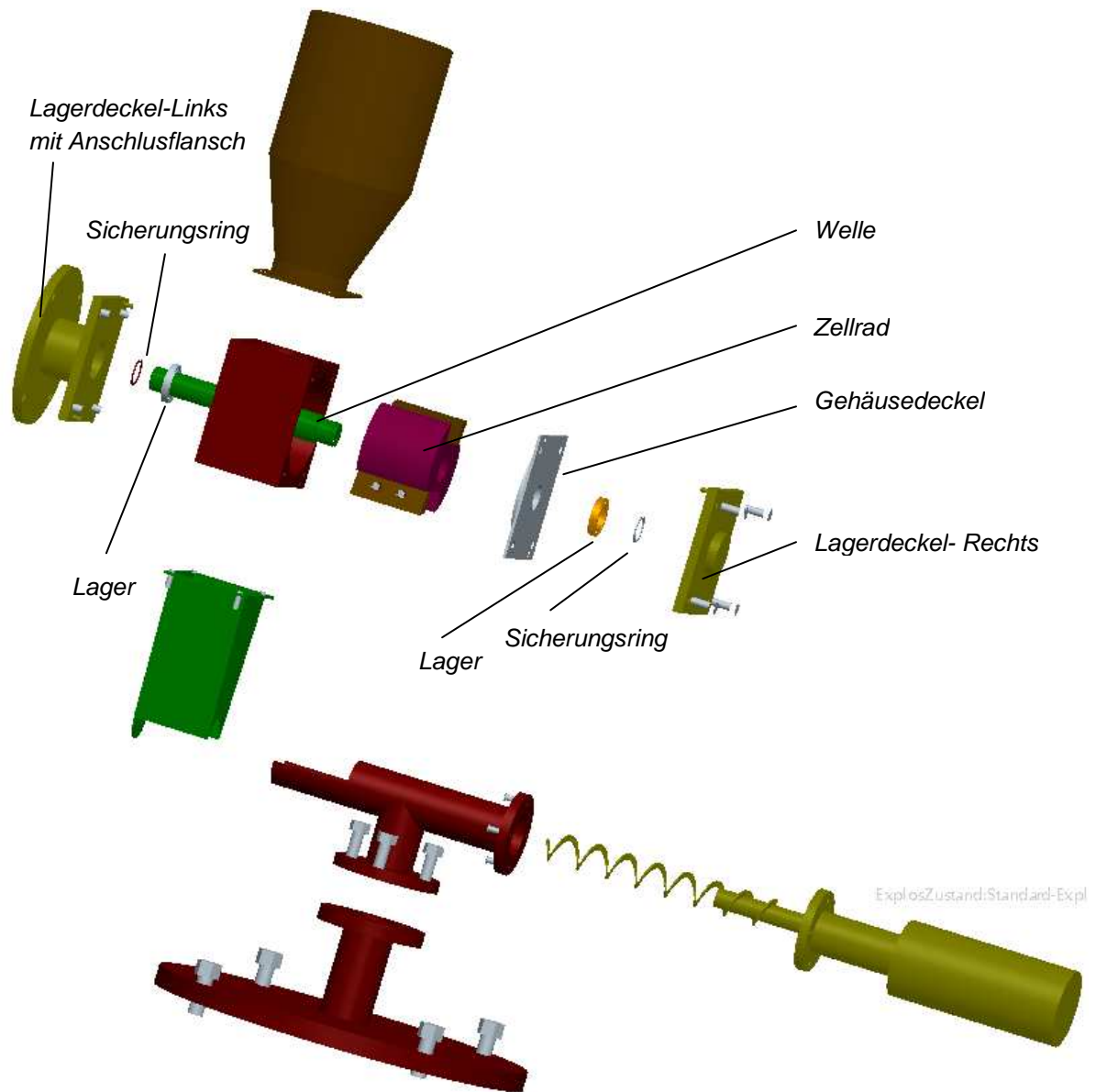


Abbildung 7-14: Explosionsdarstellung des Fördersystems

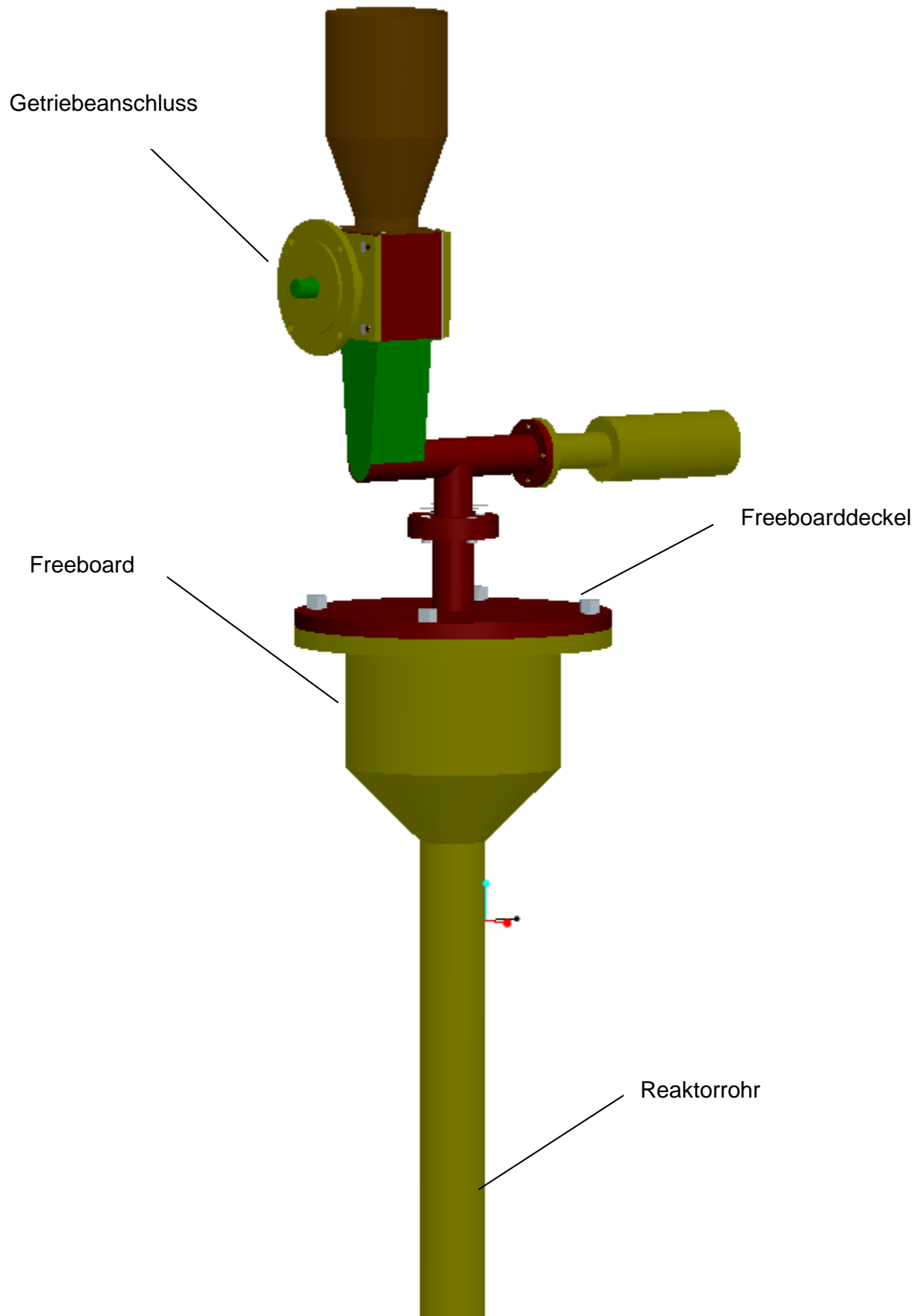


Abbildung 7-15: 3-D Modell der Versuchsanlage

8 Zusammenfassung

Der weltweit ständige steigende Energiebedarf und die Umweltbelastung, die durch seine Deckung entstehen, erfordern neue Konzepte und Lösungen um die vorhandenen Ressourcen einsetzen zu können. Die Nutzung biogener Brennstoffe hat momentan das größte Potential für einen wirtschaftlichen Einsatz an regenerativer Energie [47]. Der Hauptteil der energetischen Biomassenutzung wird aus Holz abgedeckt. Die in den moderneren Biomassefeuerungsanlagen meistens eingesetzten Brennstoffe sind: Altholz, Pellets, Stroh, Sägespänen, Rinde, Industriehackgut, Reste aus der landwirtschaftlichen Industrien, wie Kerne und Schalen.

Die biogenen Brennstoffe haben sehr unterschiedliche physikalische und chemische Eigenschaften, daher erfordern sie ein flexibles Verbrennungssystem. Die Energiegewinnung aus diesen Stoffen führt jedoch zu zahlreichen technologischen Herausforderungen. Die Verbrennung und Vergasung sind die wichtigsten Formen der Energiewandlung. Für die elektrische Energieerzeugung haben sich die Wirbelschichtfeuerungen als sehr geeignet erwiesen. Sie bieten Eigenschaften, wie z.B. hohen Feuerraum-Wirkungsgrad, guten Wärmetransport bei geringen Emissionen und gleichmäßige Temperaturverteilung im Bettbereich. Ein weiterer Vorteil der Wirbelschichttechnologie ist die Möglichkeit „schwierige“ Brennstoffe, wie Biomasse mit geringerem Heizwert, hohen Aschegehalt oder hoher Feuchtigkeit zu verbrennen. Es gibt stationäre und zirkulierende Wirbelschichtfeuerungen. Beide können atmosphärisch oder unter Druck betrieben werden.

Bei der Verbrennung von biogenen Brennstoffen kommt es zu Problemen, die wegen der Aschezusammensetzung von Brennstoffen entstehen, wie zum Beispiel hohe Anteile an Alkalien und Chlor. Diese bilden die Hauptprobleme, wie niedrige Ascheschmelzpunkte und Korrosion. Bei holzartiger Biomasseasche ist der Anteil an kalziumreichen Substanzen sehr hoch und bei den halmgutartigen Biomasseaschen sind hohe Gehälter an Alkalien und Silizium vorhanden. Bei den Wirbelschichtfeuerungen sind der Rauchgaszug mit den Heizflächen und das Wirbelbett betroffen. Bei den Heizflächen kommt es zu „Fouling“, dem Anbacken von Ascheablagerung an inneren Oberflächen und damit wird der Wärmeübergang an den Heizflächen verschlechtert. Bei dem Wirbelbett kommt es zur Agglomeration, dem Zusammenwachsen der Bettmaterialpartikel und deswegen kann das Bett nicht mehr fluidisiert werden. Der Hauptgrund für die Agglomeration ist die Bildung niedrigschmelzender Eutektika aus Kalium mit dem Bettmaterial. Die Interaktion von Asche und Bettmaterial kann auf verschiedene Arten erfolgen. Die zwei wichtigsten sind: coatinginduzierte und schmelzinduzierte Agglomeration. Der erste Effekt ist üblicherweise bei holzartigen Biomassen anzutreffen und die schmelzinduzierte Agglomeration überwiegt bei halmgutartiger Biomasse.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten um die Ascheproblematik zu minimieren. Die einfachste und effektivste Maßnahme um die Agglomerationsbildungsgefahr zu vermeiden ist die Verwendung von alternativen Bettmaterialien. Das häufigst eingesetzte Bettmaterial in Wirbelschichtbrennkammern ist Quarzsand. Die Verwendung von Quarzsand ist preisgünstig, aber führt oft zur Bettagglomeration durch Bildung von Alkali-Silikate mit niedrigem Schmelzpunkt. Weitere thermisch beständige Bettmaterialien sind Olivinsand, Mullit, Korund und Molohit. Die Bettmaterialien haben einen hohen Schmelzpunkt und sind sehr hart und deswegen können sie abrasive Eigenschaften für die Kesselwerkstoffe haben. Der Wechsel auf ein anderes Bettmaterial ist sehr vielversprechend. Es muss noch der Einfluss der Bettmaterialien auf die Ascheprobleme im Rauchgaskanal (Korrosion, Fouling) und das mechanische Verhalten (Abrasion, Kornbeständigkeit) geprüft werden.

Die zweite Möglichkeit für die Bekämpfung von Agglomeration ist die Zugabe von Additiven in den Brennraum. Gemeinsamer Ansatzpunkt für alle ist die Bildung von Alkalien (Alkalichloriden) in neuen, für den Prozess unschädlichen Produkten.

Die meistens verwendeten Additive sind: Kaolin, Dolomit, Aluminiumoxid, Mullit, Aluminiumsulfat, Eisensulfat, Kalkstein. Kaolin ist das am meisten untersuchte Additiv und seine Zugabe bei verschiedenen Brennstoffen hat immer sehr gute Ergebnisse erzielt. Die Zugabe von Additiven zeigt nicht immer die erwünschte Wirkung einer Erhöhung des Sinterbeginns. So z.B. kann Kalkstein auch negative Auswirkung haben und damit die Asche-verformungstemperatur verringern. Die experimentellen Untersuchungen anderer Autoren haben gezeigt, dass mit Additiven die Ascheprobleme sehr gut bekämpft werden können. Die optimale Kombination und Dosierung muss für jeden Brennstoff speziell ermittelt werden.

Mit Hilfe des thermodynamischen Simulationsprogrammes FactSage wurde für drei verschiedene Brennstoffaschen (Hackschnitzel, Weizenstroh, Weide gehäcksel) die Wirkung von verschiedenen Additiven geprüft. Die berechneten Werte zeigen meistens zuerst eine negative Wirkung und dann steigen diese in einen positiven Bereich. Die Simulationsergebnisse bei meinen Berechnungen sind teilweise unrealistisch und unzuverlässig. Die mögliche Erklärung ist im Kraceks Phasendiagramm vorgestellt. Er hat verschiedene Datenbanken mit experimentellen Untersuchungen verglichen und ausgewertet zum Zweck der Verbesserung der Lösung der Datenbank. Die FACT-Datenbank verwendet die quasi chemische Annäherung und sie ist nicht in der Lage, die Phasenrelationen in dem Bereich unter dem 50 mol% Silizium darzustellen. Die Berechnungen ergeben die unrealistische Phasengrenzlinie in der K₂O-reichen Region, was unmöglich ist (z. B. Flüssigkeit bei Zimmertemperatur). Damit kann man die negative Wirkung von Additiven erklären (im Bereich unter 50% Silizium) und die Simulationsergebnisse in dem Bereich über 50 mol% Silizium zeigen auch realistische Wirkungen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass:

- Ergebnisse unserer Simulation mit Vorsicht zu genießen sind
- Vergleichsrechnungen mit andern Datenbanken nötig sind
- Experimentelle Untersuchung der Additive ist unumgänglich

Die bestehende Anlage ist als stationäre Wirbelschichtfeuerung im Labormaßstab ausgeführt. Zweck der Anlage ist die Untersuchung von Agglomeration und Verschmutzung von neuer Biomasse. Für die geplanten Versuche musste die bestehende Anlage adaptiert und modifiziert werden. Ein wichtiger Punkt dieser Umbauten war die Konstruktion eines Brennstoffförderers.

Nachteile des bestehenden Brennstoffförderers:

- Nur für feine Brennstoffe geeignet (Kohlenstaub)
- Verpressung und Verstopfung vom Brennstoff
- Brückenbildung in dem Brennstoffspeicher
- Während des Betriebs wurde Rauchgas durch das Fördersystem entlassen (kein gasdichter Abschluß)
- Das Fördersystem war nicht in der Lage Holzpellets und Hackschnitzel zu transportieren

Eine wichtige Anforderung an den Brennstoffförderer ist eine gute Dosierbarkeit des Brennstoffes, um eine vollständige Verbrennung des Brennstoffes zu ermöglichen. Weitere wesentliche Anforderungen sind kostengünstiger und einfacher Aufbau des Fördersystems. Brennstoffförderer soll für verschiedene Brennstoffe (feine und stückige Schüttgüter) geeignet sein und muss einen gasdichten Abschluß haben. Deshalb fiel die Wahl auf eine Kombination von Zellradschleuse und Schneckenförderer, die den Brennstoff von oben durch einen Fallschacht in die Brennkammer einbringt. Für diese Konstruktion wurden wichtige Auslegungsparameter über die Berechnung der stationären Wirbelschichtfeuerung bestimmt. Mit Hilfe der berechneten Werte wurde der Brennstoffförderer von der Wirbelschicht-Versuchsanlage ausgelegt und konstruiert.

9 Ausblick

Nach der Berechnung wurde der Brennstoffförderer von der Wirbelschicht-Versuchsanlage ausgelegt und konstruiert. Die Fertigung der Anlagenteile wird in der Werkstatt des Institutes für Wärmetechnik erfolgen. Die geplanten experimentellen Versuche sollten mit adaptierter und modifizierter Anlage durchgeführt werden. Die Agglomerationsversuche sollten bei drei verschiedenen Brennstoffen durchgeführt werden.

Die Brennstoffe, die zur Verfügung stehen sind.

- Holzpellets
- Hackschnitzel
- Maispellets

Dazu werden definierte Aschegehalte im Bett produziert und diese werden dann zur Agglomeration gebracht.

Weiteres sollen die Wirkungen von verschiedenen Additiven auf Agglomeration geprüft werden.

Für die geplanten Versuche stehen folgende Additive zur Verfügung:

- Dolomit
- Korund
- Siolan
- Aluminiumsulfat
- Magnesit

In den ersten Versuchsreihen wurde Quarzsand als Bettmaterial verwendet und zu dem Bettmaterial werden die Additive zugegeben. In weiteren Versuchsreihen sollte dem Brennstoff Additiv beigemischt und über den Brennstoffförderer der Brennkammer zugeführt werden.

Die vorliegende Arbeit soll die Probleme bei der thermischen Nutzung von biogenen Brennstoffen darstellen und beurteilen. Mit der ausgelegten Anlage wird die experimentelle Untersuchung von Additiven möglich und damit kann die optimale Kombination und Dosierung für jeden Brennstoff speziell ermittelt werden. Die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zur energetischen Nutzung von Biomassen können auf Anlagen zur Stromerzeugung übertragen werden. Nach der Auswahl optimaler Additive für geeignete Brennstoffe, wird in der Zukunft der Anteil der Biomassen an Energiebereitstellung erhöht. Weitere Forschung und Entwicklung sind erforderlich um Biomassen ökonomisch konkurrierend zu nutzen

10 Literaturverzeichnis

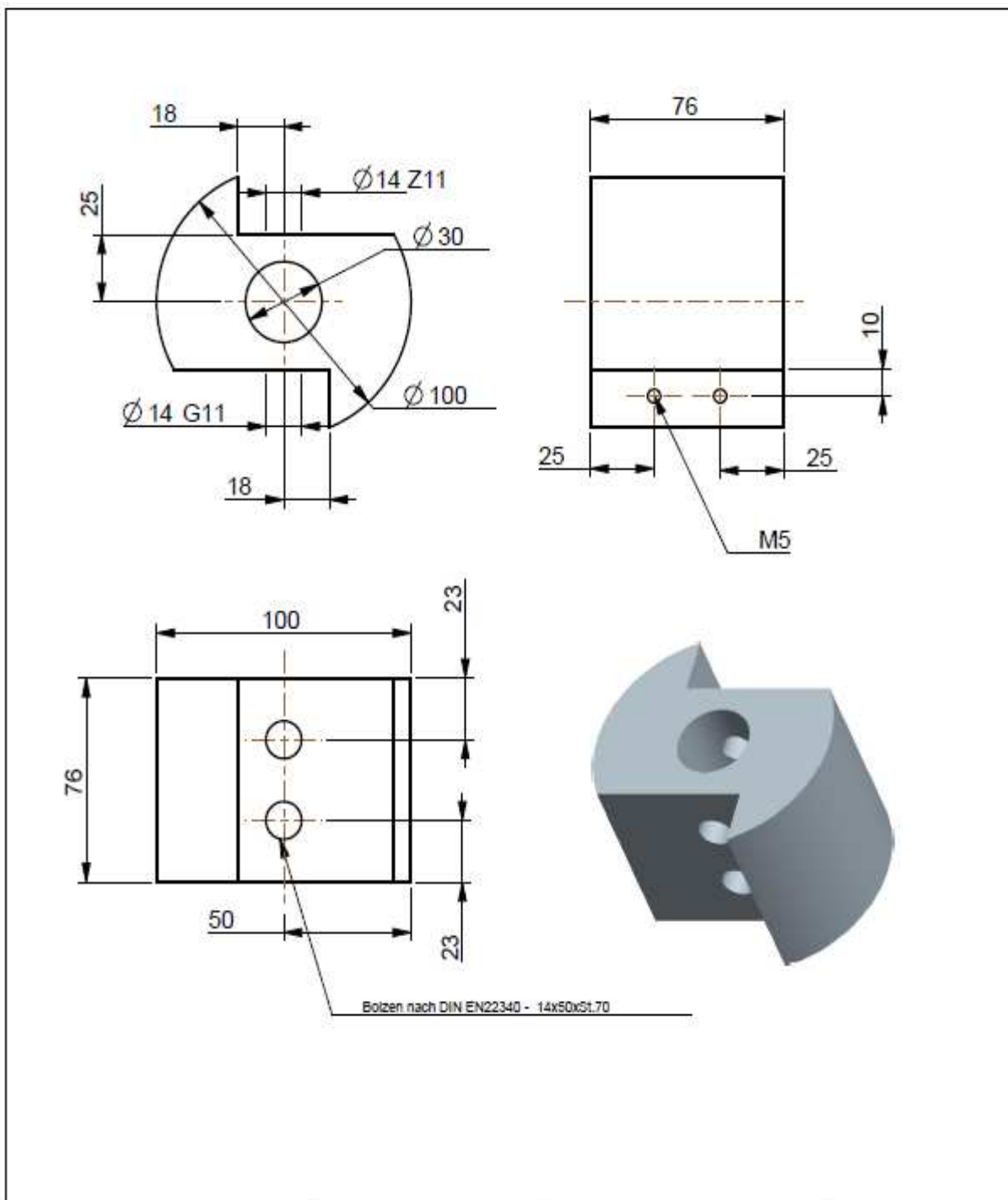
- [1] Strauß, K., 2009, Kraftwerkstechnik zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativer Energiequellen, Springer
- [2] Kaltschmit, M., 2001 Energie aus Biomasse , Springer
- [3] Yin, C. Lasse A. Rosendahl, Soren K. Kær, 2007, Grate-firing of biomass for heat and power production, Progress in Energy and Combustion Science 34 (2008) 725– 754
- [4] Nutek, 1995, Energy in Sweden, NUTEK, Stockholm
- [5] Nakicenovic, N., Swart, R., 2000, Intergovernmental panel on climate change, Special Report on Emission Scenarios, A Special Report of IPCC Working Group III, Cambridge University Press, Cambridge, UK, p.612
- [6] Winter, F., Szentannai, P., 2009, Brennstoffmix in Wirbelschichtfeuerungen Status und Entwicklungstendenzen Technische Universität Wien, Institut für Verfahrenstechnik
- [7] Beu, J., 2008, Emissionsminderungskonzepte für eine stationäre Wirbelschichtfeuerung kleiner Leistung, Universität Rostock
- [8] Khan, A.A., De Jong, W., 2008, Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies
- [9] Ottmann, M., 2007, Verbrennung biogener Brennstoffe in stationären Wirbelschichtfeuerungen, Dissertation , Lehrstuhl für ökologische Chemie und Umweltanalytik der Technischen Universität München
- [10] Simon, R., 2008: Untersuchung von Biomasse- und Altholz(heiz)Kraftwerken im Leistungsbereich 5 bis 20 W zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit
- [11] Karl, J., 2008, Vorlesungsfolie , Energetische Nutzung von Biomasse und Reststoffe Technische Universität Graz , Institut für Wärmetechnik
- [12] Effenberger, H., 1999, Dampferzeugung , Dresden , Springer
- [13] Hohenwarter, U., 2006/2007 , Skriptum zur Vorlesung Wärmetechnik ||. Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik
- [14] VDI- Wärmeatlas, 2006: Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC), Springer
- [15] Penthor, S., 2009, Untersuchung zur Erweiterung des Betriebsbereiches einer stationären Wirbelschichtfeuerung für niedrigkalorische Brennstoffe, Diplomarbeit, Technische Universität Wien , Institut für Verfahrenstechnik
- [16] Wesselak, V., Schabbach, T., 2009 : Regenerative Energietechnik, Springer
- [17] Karl, J., 2007. Skriptum zur Vorlesung Wärmetechnik ||, Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik
- [18] Öhmann, M., Nordin, A., 2000, Bed Agglomeration Characteristics during Fluidized Bed Combustion of Biomass Fuels, Energy & Fuels

-
- [19] Gatternig, B., Hohenwartter, U., Karl, J., 2010, Ascheproblematik in biomassengefeuerten Wirbelschichtanlagen“, Symposium Energieinnovation, Graz
- [20] Karl, K., Skriptum zur Vorlesung Wärmetechnik I, Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik
- [21] Obernberger, I., 1997, Stand und Entwicklung der Verbrennungstechnik, Technische Universität Graz, Institut für Verfahrenstechnik, Ingenieurbüro BIOS, Graz
- [22] Karl, J., Ottmann, M., Fischer, T., 2003, Agglomerations- und Korrosionsverhalten von Wirbelschichtfeuerungen beim Betrieb mit biogenen Brennstoffen, Lehrstuhl Thermische Kraftanlagen TU München
- [23] Karl, J., Dezentral Energie-systeme, 2006, Oldenbourg Wissenschaftsverlag MnbH
- [24] Pietsche, W., 2002, Systematische Entwicklung von Verfahren zu Kornvergrößerung durch Agglomerieren Chemie Ingenieur Technik, WILEY-VCH Verlag, Weinheim
- [25] Galindo, D. G., The Reduction of the agglomeration in FBC based on novel bed materials: Improvement of combustion efficiency and proposal of new materials
- [26] Visser, H.J.M., 2004, The Influence of fuel composition on agglomeration behavior in fluidized – bed combustion
- [27] Ommen, van J.R., 2006, A method for agglomeration detection and control in full-scale biomass fired fluidized beds
- [28] A. van der Drift, 1999, Conversions of biomass, prediction and solution methods for ash agglomeration and related problems, ECN Fuels Conversion und Environment
- [29] Gatternig, B., Gesammelte Aschedatenbank_Berechnungen_diag. von Bernhard Gatternig, Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik
- [30] Pettersson, A., Åmand, L.E., Steenari, B.M., 2009, Chemical fractionation for the characterisation of fly ashes from co-combustion of biofuels using different methods for alkali reduction, Fuel, 88 (2009), pp.1758–1772
- [31] Sun, Z., Jin, B., Zhang, M., Liu, R., Zhang, Y., 2008, Experimental studies on cotton stalk combustion in a fluidized bed, Energy, 33 (2008), 1224–1232
- [32] Werther, J., Saengera, M., Hartge, E.U., Ogadab, T., Siagi, Z., 2000, Combustion of agricultural residues, Progress in Energy and Combustion Science, 26 (2000), 1–27
- [33] Vamvuka, D., Zografos, D., Alevizos, G., 2007, Control methods for mitigating biomass ash-related problems in fluidized beds, Bioresource Technology, 99 (2007), pp.3534–3544
- [34] Mineralienatlas und Fossilienatlas. <http://www.mineralienatlas.de>
- [35] <http://de.wikipedia.org>
- [36] Aho M., Vainikka, P., Taipale, R., Yrjas, P., 2008, Effective new chemicals to prevent corrosion due to chlorine in power plant superheaters, Fuel, 87 (2008), pp.647–654
- [37] Davidsson, K.O., Åmand, L.E., Steenari, B.M., Elled, A.L., Eskilsson, D., Leckner, B., 2008, Countermeasures against alkali-related problems during combustion of biomass in a circulating fluidized bed boiler, Chemical Engineering Science, 63 (2008), pp.5314 - 5329
-

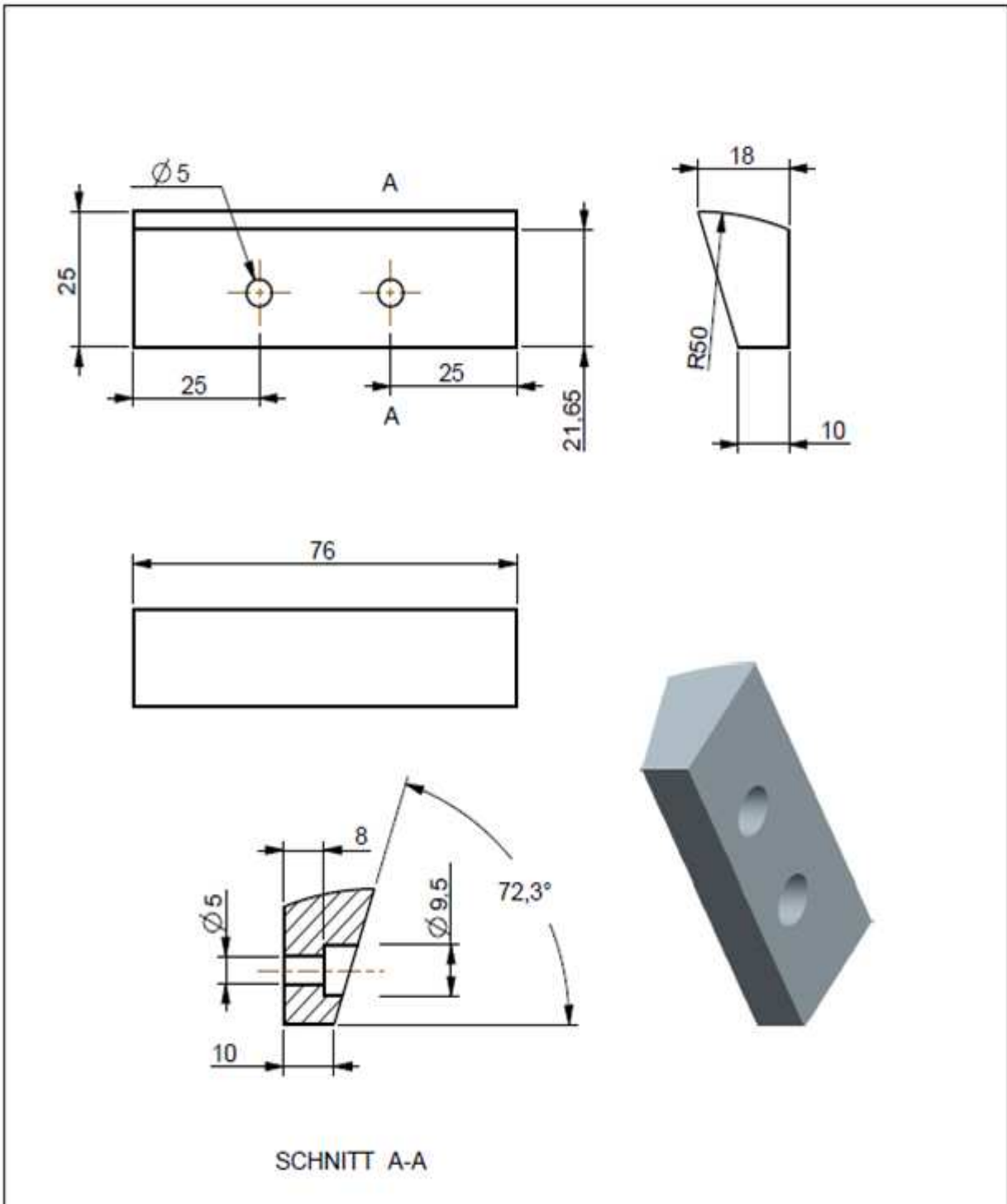
-
- [38] Forsberg, C., Broström, M., Backman, R., Edvardsson, E., Badiei, S., Berg, M., Kassman, H., 2009, Principle, calibration, and application of the in situ alkali chloride monitor, *Review of Scientific Instruments*, 80 (2009)
- [39] Pettersson, A., Åmand, L.E., Steenari, B.M., 2009, Chemical fractionation for the characterisation of fly ashes from co-combustion of biofuels using different methods for alkali reduction, *Fuel*, 88 (2009), pp.1758–1772
- [40] Coda, B., Aho, M., Berger, R., Hein, K.R.G., 2001, Behavior of Chlorine and Enrichment of Risky Elements in Bubbling Fluidized Bed Combustion of Biomass and Waste Assisted by Additives, *Energy & Fuels*, 15 (2001), pp.680-690
- [41] Llorente, M.J., Murillo Laplaza, J.M., Escalada Cuadrado, R., Carrasco Garcia, J.E., 2006, Ash behaviour of lignocellulosic biomass in bubbling fluidised bed combustion, *Fuel*, 85 (2006), pp.1157–1165
- [42] Bale, C.W., Bélisle B., Chartrand, P., Decterov, S.A., Eriksson, G., Hack, G., Jung, J., Petersen, S., 2008, FactSage thermochemical software and databases _ recent developmentsb GTT-Technologies, Germany
- [43] Netzer, M., 2009, Nutzung schwefelreicher Brennstoffe in reinsauerstoffbetriebenen Wirbelschichtfeuerungen, Diplomarbeit, Technischen Universität Graz, Institut für Wärmetechnik
- [44] Heinrich, M., Römisch, P., und Weidlich, A. 2007. *Materialflusstechnik*. Hamburg, Dresden, Edemissen : Vieweg Verlag, 2007
- [45] Watter, H., 2009, *Nachhaltige Energiesystemen*, Vieweg und Teubner
- [46] Klemm, M., 1998, *Verbrennung und Dampferzeugung*, Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik
- [47] *Globale Marktpotenziale für Erneuerbare Energien*, Schell 1999
- [48] Austrian Energy Agency, Wien, Juli 2006
- [49] Gallegos López, S., *Wirbelschichttechnik, Mechanische Verfahrenstechnik*, Ruhr-Universität Bochum
- [50] Yazhenskikh, E. 2006, Critical thermodynamic evaluation of oxide systems relevant to fuel ashes and slags. Part 1: Alkali oxide–silica systems 30 (2006) 270–276
- [51] Bartels, M., Lin, L., Nijenhuis, J., and Kapteijn, F., Ommen, J. 2008, Agglomeration in fluidized beds at high temperatures: Mechanisms, detection and prevention
- [52] Öhman, M., Boström D., Nordin, N., 2004, Effect of Kaolin and Limestone Addition on Slag Formation during Combustion of Wood Fuels
- [53] Konsomboon, S., Pipatmaanomai, S., Madhiyanon, T., Tia, S., 2010, Effect of kaolin addition on ash characteristics of palm empty fruit bunch (EFB) upon combustion
- [54] Roloff/ Matek, W., 2001, *Maschinenelemente (Normung, Berechnung , Gestaltung)*, Viewegs Fachbücher der Technik
- [55] Roloff/ Matek, W., 2001, *Maschinenelemente (Tabellen)*, Viewegs Fachbücher der Technik
- [56] Riml, Wilfried., 1998, *Skriptum zur Vorlesung Maschinenelemente I*, Technische Universität Graz, Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik
-

- [57] SKF – Kataloge, <http://www.skf.com>
- [58] X –Floc Dämmtechnik GmbH, 2005, Abschlussbericht: Lose Dämmstoffe aus Holz
- [59] Böge, A., 2007, Maschinenelemente I, Vieweg Handbuch Maschinenbau
- [60] Schulze, D., 2006, Pulver und Schüttgüter, Springer-Vorlag
- [61] Fröling, 2006, Heizen mit Hackgut, Turbomatic- Planungsunterlage
- [62] Janisch, W., Verbrennung von Biomasse , Stand der Technik und zukünftige Entwicklungen, BIOS Bioenergiesysteme GmbH , Graz
- [63] Endress, Hauser., 2007, Füllstandmesstechnik, Produktübersicht für Anwendungen in Flüssigkeiten und Schüttgütern
- [64] Yazhenskikh, E., 2005, Development of a new database for thermodynamic modeling of the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, Dissertation, Technischen Hochschule Aachen
- [65] Vodegel, S., 2006, Anforderungen an Biomasse zur Kraftstoffherstellung aus der Sicht von Anlagenbetreibern, Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH, Clausthal-Zellerfeld

11 Anhang A

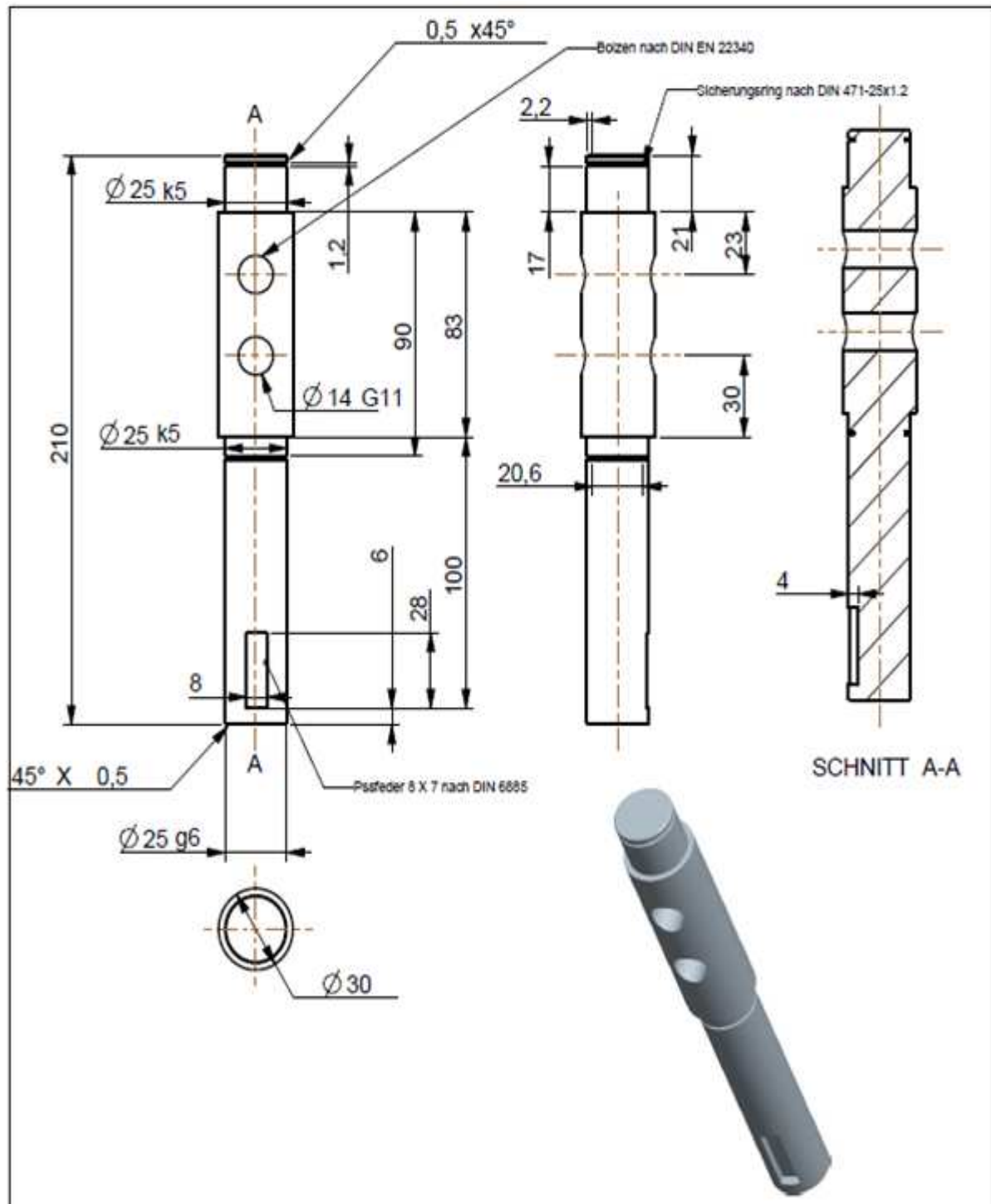


Verwendungsbereich				Oberfläche		Maßstab 1:5		Gewicht			
				Allgemeintoleranz ISO 2768-mK		Wellen/Halbzug					
				Datum		Benennung					
				Name		ZELLRAD					
				Bearb. 15.11.2010						Adzaga	
				Gepr.						Gattermig	
				Norm							
				Kont.-Nr.:		Zeichnung/Sach-Nr.:					
				TU GRAZ							
										Institut für Wärmetechnik		Blatt 1
								St.			
Zust.		Änderung		Datum		Name		Erl.			

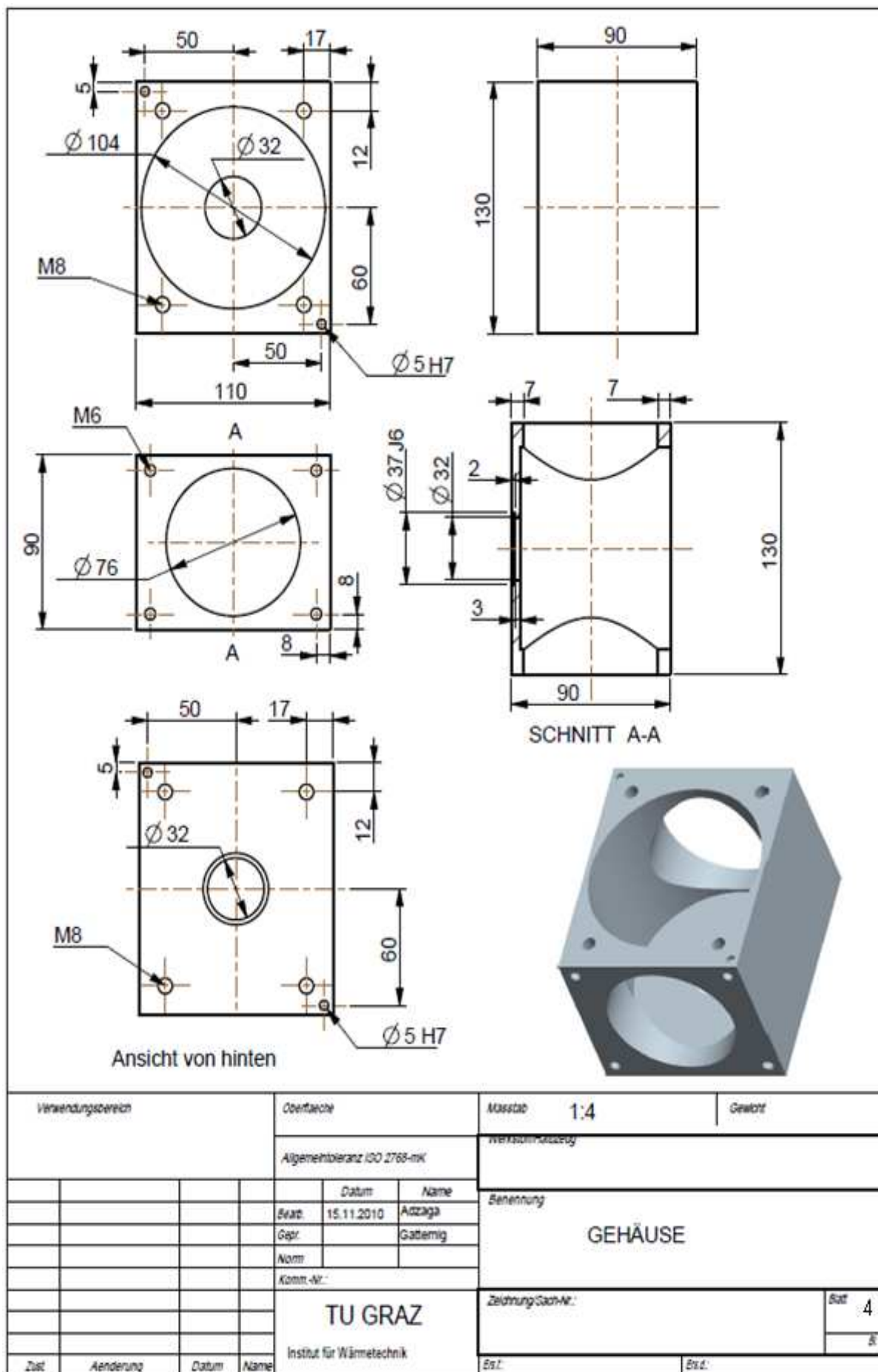


SCHNITT A-A

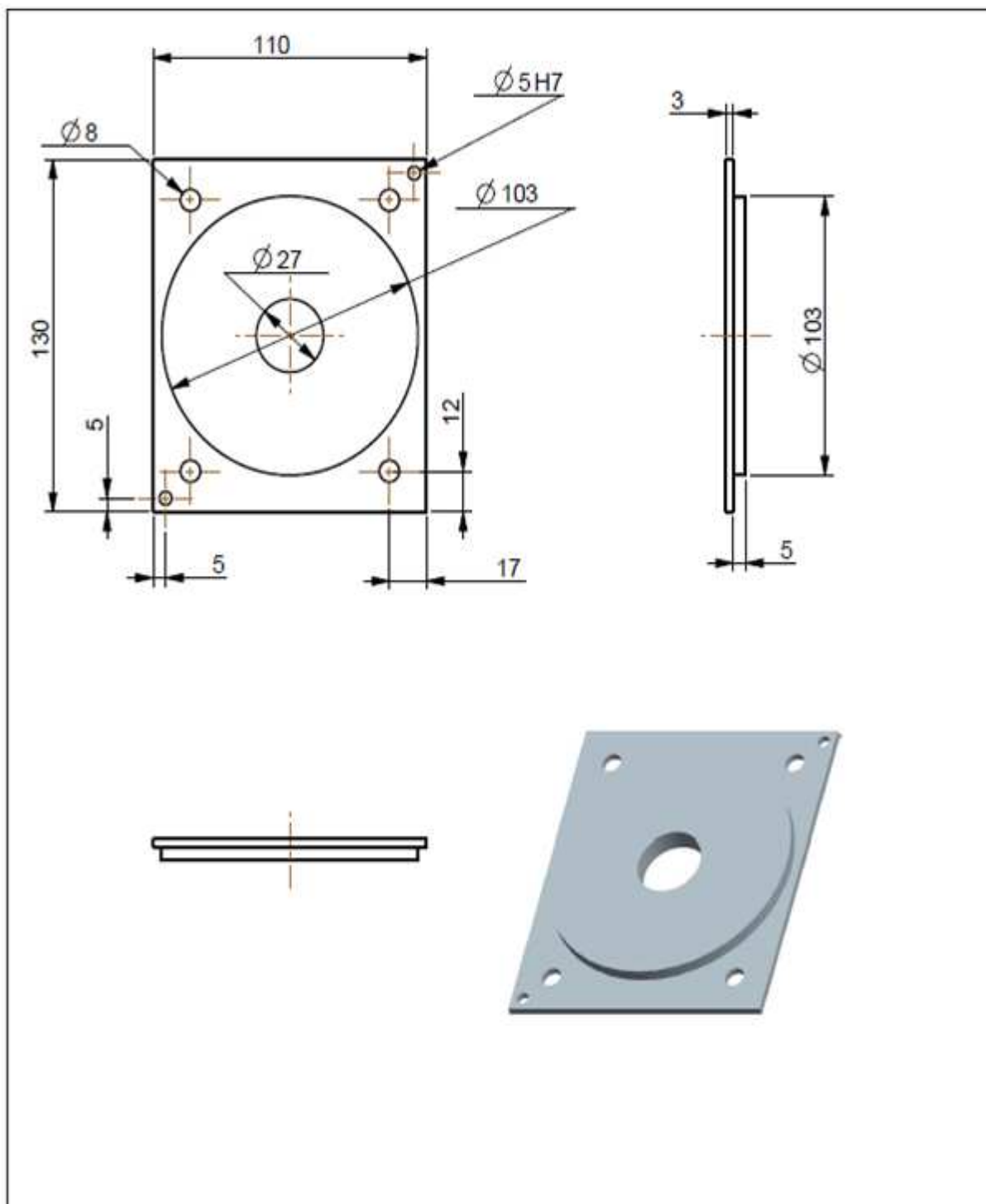
Verwendungsbereich				Oberfläche		Maßstab: 1:1	Gewicht	
				Allgemeintoleranz ISO 2768-mK		Verkaufsinformation		
				Datum	Name	Benennung ZELLRAD ZAHN		
				Bezt:	15.11.2010			Adzaga
				Gepr:				Gattermig
				Norm:				
				Kont.-Nr.:		Zeichnung/Sach-Nr.:		
				TU GRAZ Institut für Wärmetechnik				Blatt 2
Zust.	Änderung	Datum	Name			Erst.		Erst.



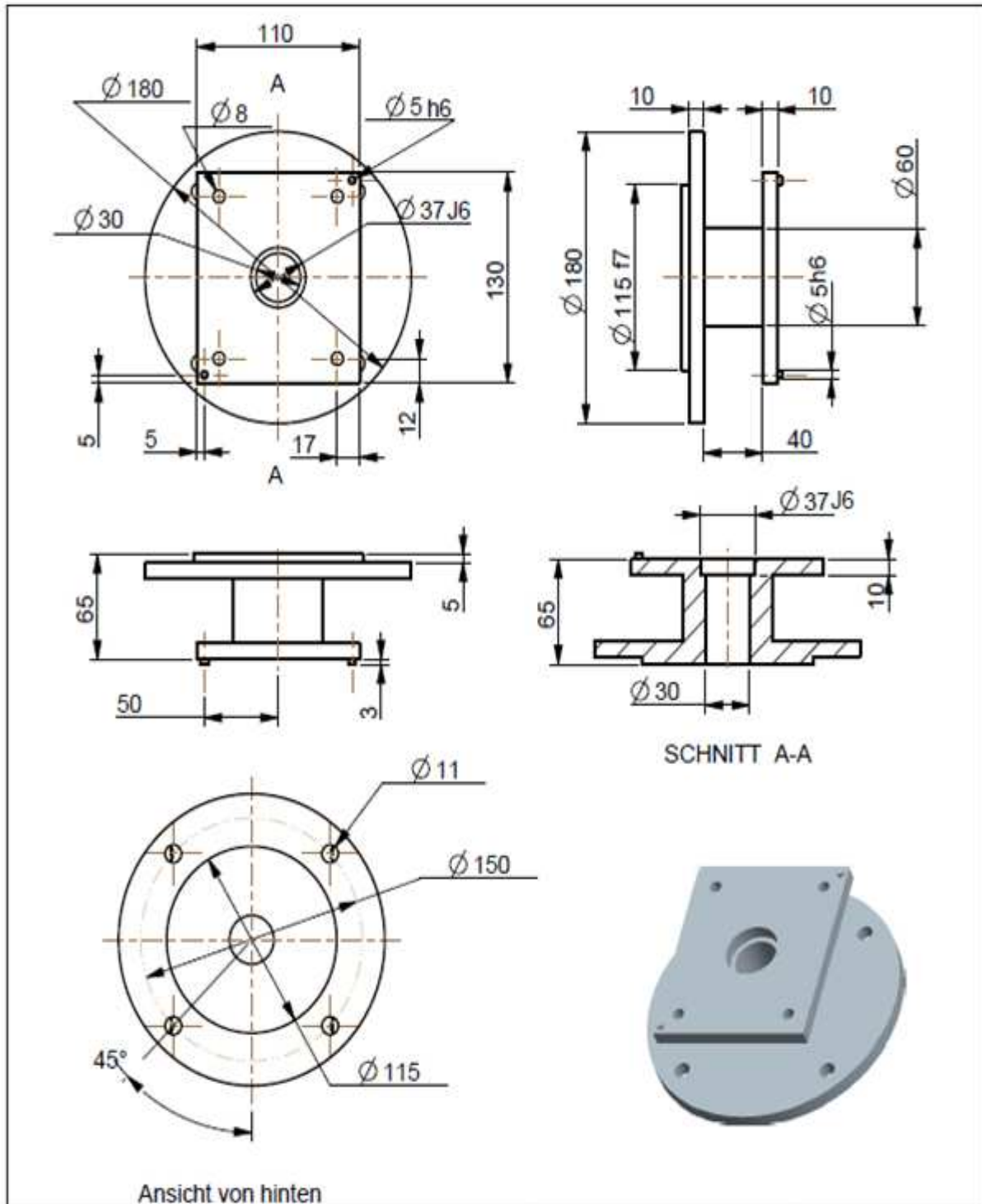
Verwendungsbereich				Oberfläche		Maßstab 1:5		Gezeichnet	
				Allgemeinbezugs ISO 2768-mK		Verfahrenszug			
				Datum		Name		Benennung	
				Bearb. 15.11.2010		Adzaga		WELLE	
				Gepr.		Gäberrig			
				Norm					
				Kont.-Nr.:				Zeichnung/Sach-Nr.:	
				TU GRAZ		Institut für Wärmetechnik		Blatt 3	
								Zust.		Änderung
				Datum		Name		Ersf.	
								Ersf.	



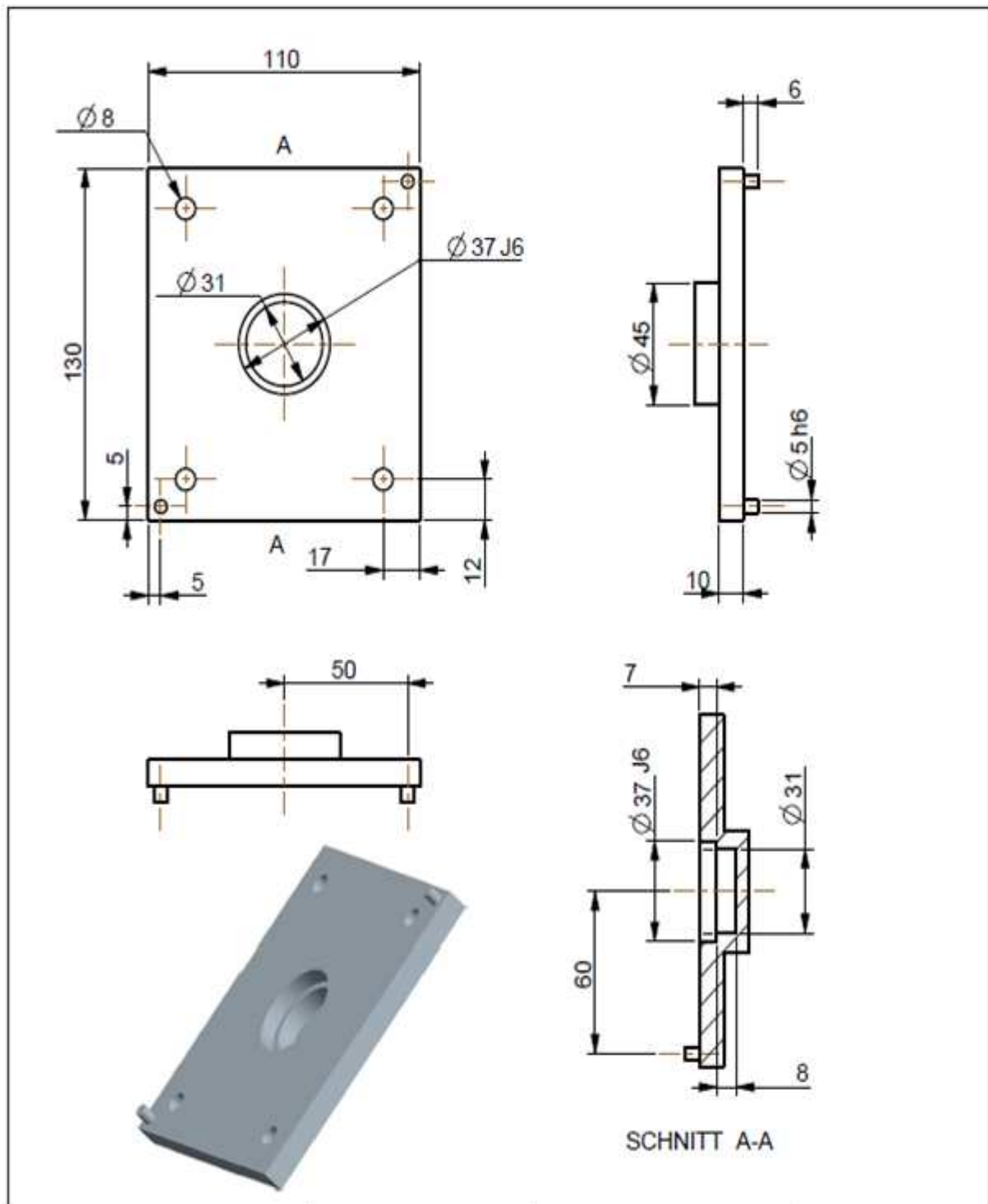
Verwendungsbereich				Oberfläche		Maßstab 1:4		Gewicht	
				Allgemeinblanz ISO 2768-mK		Werkzeugherstellung			
				Datum		Name		Benennung	
				Bearb. 15.11.2010		Adzaga		GEHÄUSE	
				Gepr.		Gaternig			
				Norm				Zeichnung/Sach-Nr.:	
				Komm.-Nr.:				Blatt 4	
				TU GRAZ				Blatt 5	
						Institut für Wärmetechnik			
Zust.	Aenderung	Datum	Name	Est.		Est.			



Verwendungsbereich				Oberfläche		Maßstab 1:5		Gewicht	
				Allgemeintoleranz ISO 2768-mK		Werkstoff			
				Datum		Name		Benennung	
				Bearb. 15.11.2010		Adzaga		GEHÄUSEDECKEL	
				Gepr.		Gattermig			
				Norm					
				Komm.-Nr.					
				TU GRAZ		Zeichnung/Sach-Nr.:		Blatt 5	
				Institut für Wärmetechnik				Bl.	
Zust.		Änderung		Datum		Name		Ess.	

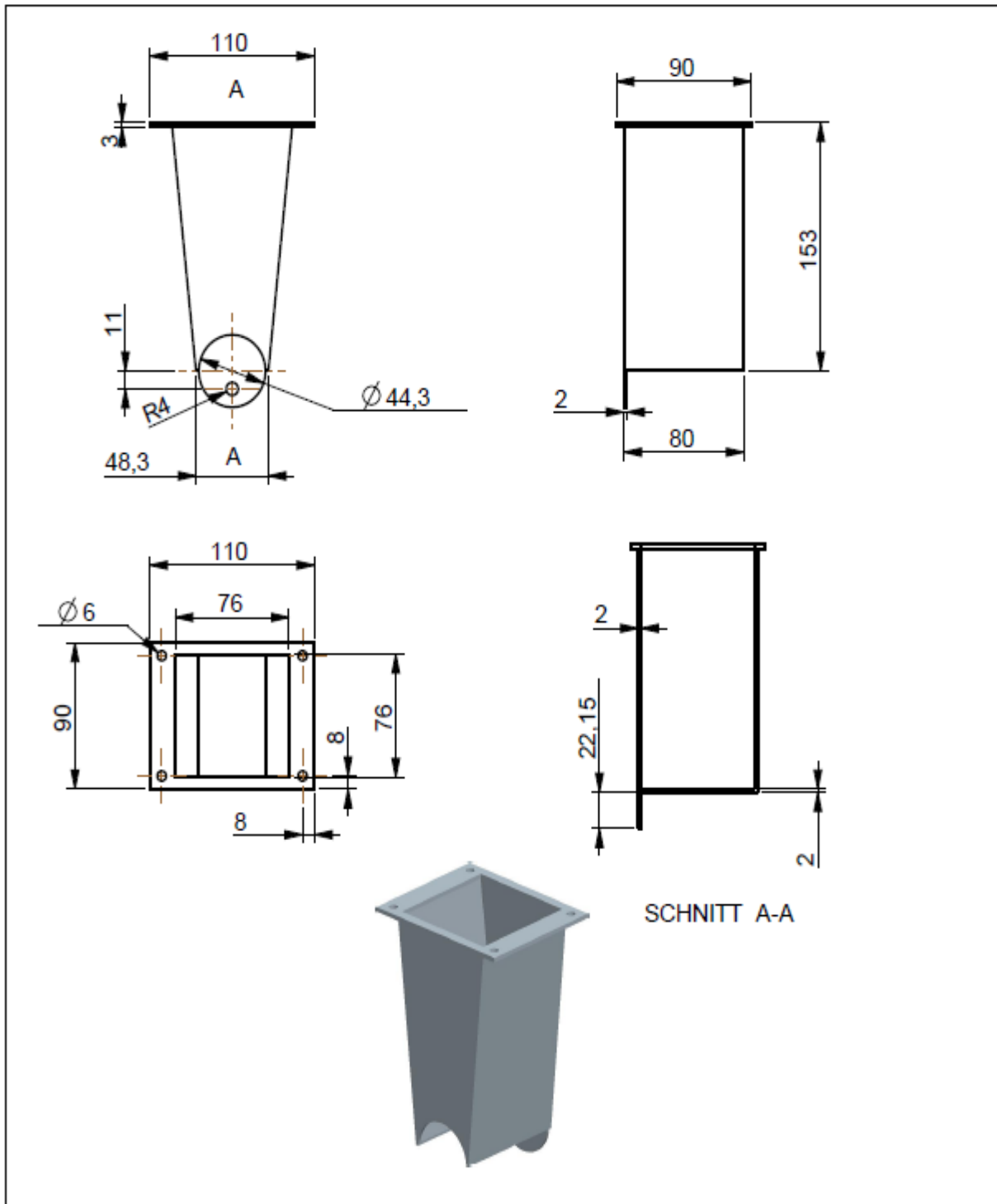


Verwendungsbereich		Oberfläche		Maßstab	1:3	Gewicht	
		Allgemeintoleranz ISO 2768-mK		Werkstoff/Anlage			
		Datum	Name	Benennung			
		Bez.	15.11.2010	LAGERDECKEL_LINKS			
		Gepr.					
		Norm					
		Komm.-Nr.:		Zeichnung/Sach-Nr.:		Blatt	
		TU GRAZ Institut für Wärmetechnik				6	
						3	
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ers.		Ers.	

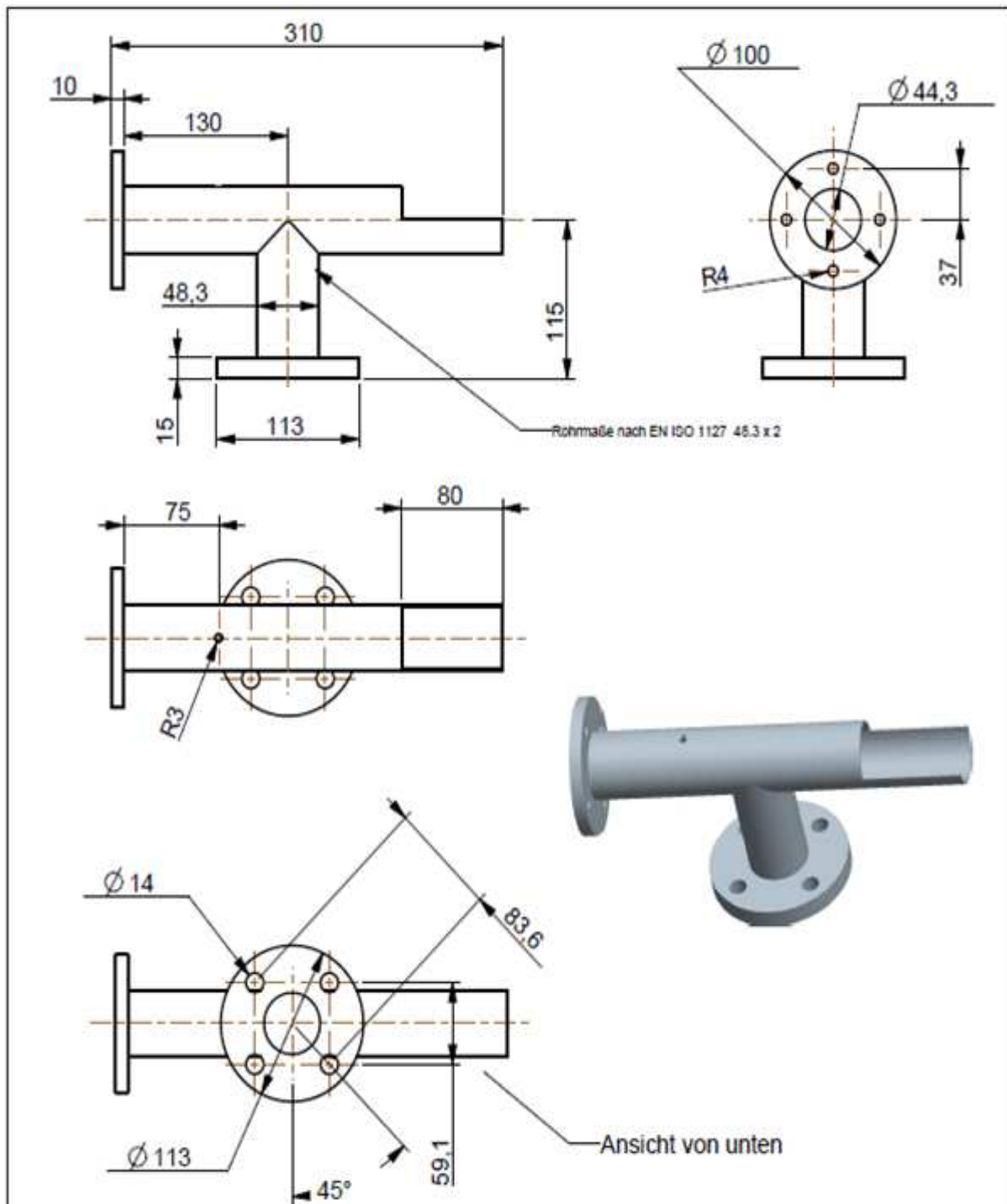


SCHNITT A-A

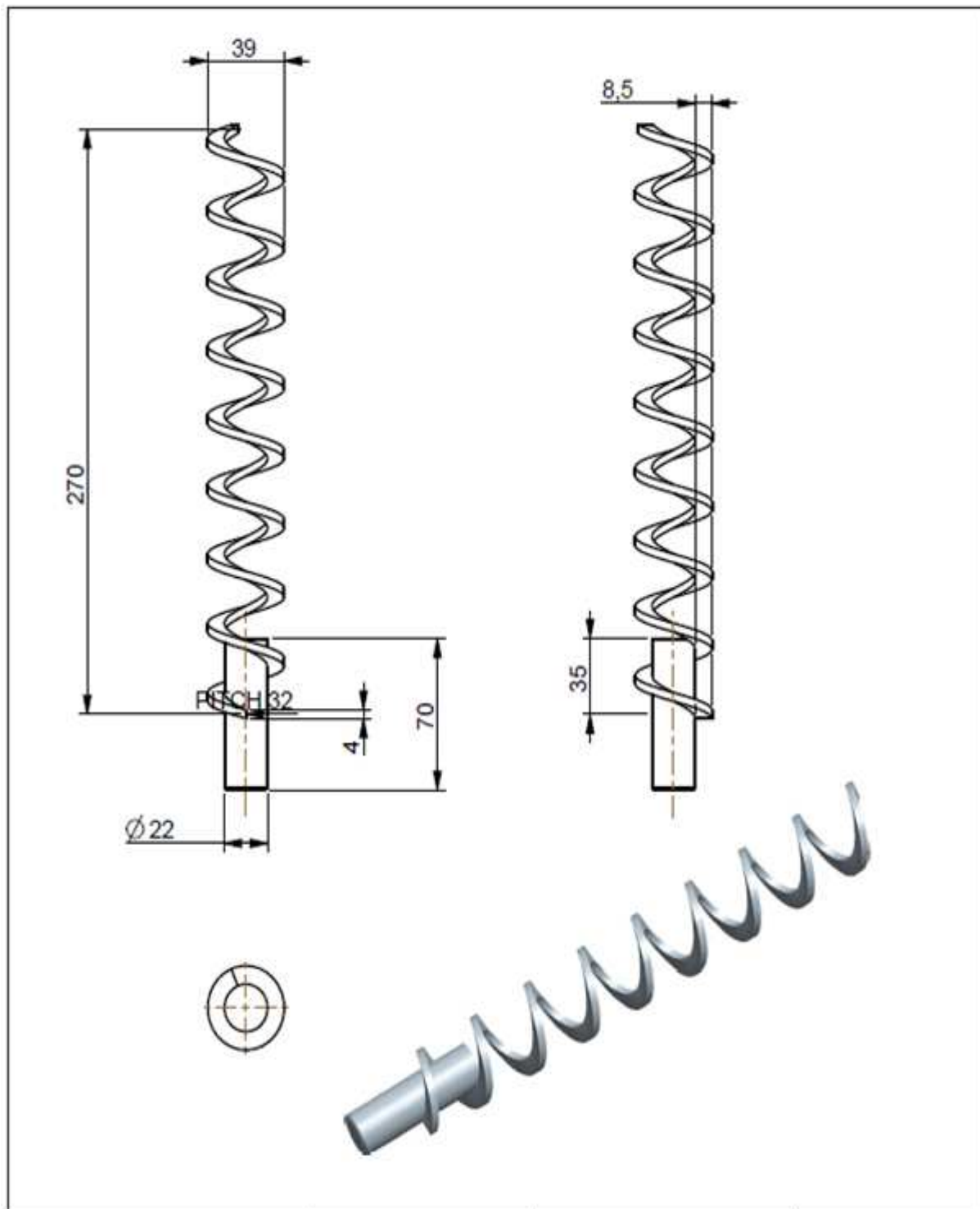
Verwendungsbereich				Oberfläche		Maßstab 1:5		Gewicht	
				Allgemeintoleranz ISO 2768-mK		Werkstoffauswahl			
				Datum		Benennung			
				15.11.2010		LAGERDECKEL_RECHTS			
				Name		Zeichnung/Sach-Nr.:			
				Adzaga		Blatt 7			
				Gepr.		8			
				Gattermig		Ers.:			
				Norm		Ers.:			
				Komm.-Nr.:					
				TU GRAZ					
				Institut für Wärmetechnik					
Zust.	Änderung	Datum	Name						



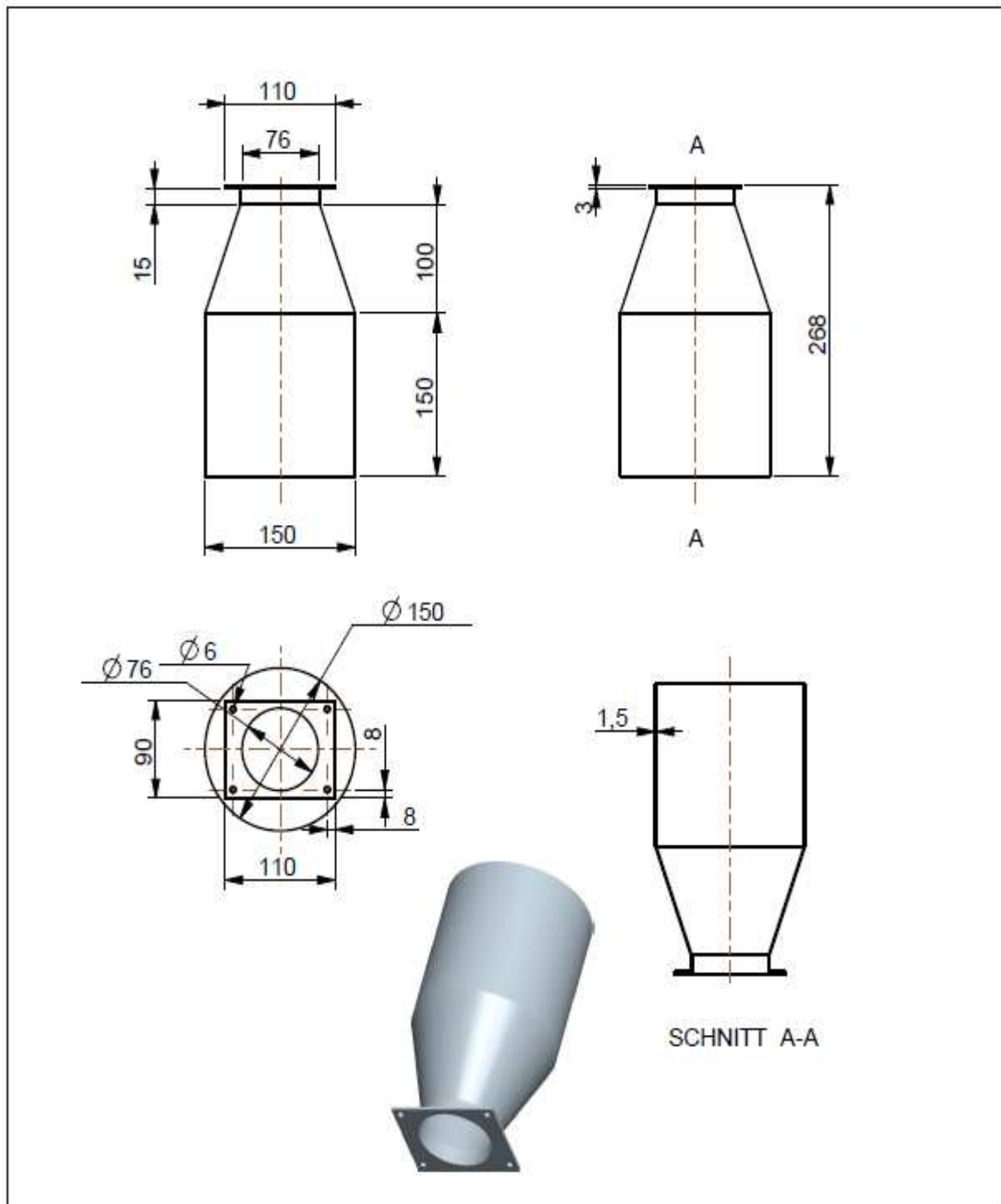
Verwendungsbereich				Oberfläche		Maßstab 1:3		Gewicht		
				Allgemeintoleranz ISO 2768-mK				Werkstoff/Anzeugu		
				Datum	Name	Benennung ZWISCHENTEIL				
				Bearb.	15.11.2010					Adzaga
				Gepr.						Gatterlig
				Norm						
				Komm.-Nr.:		Zeichnung/Sach-Nr.:				
				TU GRAZ Institut für Wärmetechnik						Blatt 8
Zust.	Änderung	Datum	Name			Inst.:		Ers.d.:		



Verwendungsbereich				Oberfläche		Maßstab 1:2,5		Gewicht	
				Allgemeintoleranz ISO 2768-mK		Werkstoff/Anfertigung			
				Datum		Name		Benennung	
				Bearb. 15.11.2010		A. Dzaga		SCHNECKENROHR	
				Gepr.		Gattermig			
				Norm					
				Kont.-Nr.				Zichnung/Guch-Nr.	
				TU GRAZ		Institut für Wärmetechnik		Blatt 9	
								8	
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ers.		Ers.			



Verwendungsbereich		Oberfläche		Maßstab	1:4	Gewicht	
		Allgemeintoleranz ISO 2768-mK		Werkstoffbezeichnung			
		Datum	Name	Benennung SCHNECKE			
		Ream	15.11.2010				Adzaga
		Gepr.					Gattermig
		Norm					
		Komm.-Nr.:		Zählung/Sach-Nr.:		Stk	
		TU GRAZ Institut für Wärmetechnik				10	
Zust.	Änderung			Datum	Name	Ers.:		Stk.



Verwendungsbereich				Oberfläche		Maßstab 1:2		Gewicht		
				Allgemeintoleranz /ISO 2768-mK		Werkstoff/Handzeug				
				Datum	Name	Benennung TRICHTER				
				Bearb.	15.11.2010					Adzaga
				Gepr.						Gattermig
				Nomr.						
				Komm.-Nr.:		Zeichnung/Sach-Nr.:				
				TU GRAZ Institut für Wärmelehre					Blatt 11	
									8.	
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ers.		Ers.				

