



INSTITUT FÜR
ENERGIETECHNIK UND
THERMODYNAMIK
Institute for Energy Systems and Thermodynamics

Diplomarbeit

Modellierung und numerische Prozesssimulation einer Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage

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

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus HAIDER

Institut für Energietechnik und Thermodynamik E302

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Stefan POSTLMAYR

00726215 (066 445)

Sandbauernstraße 38

4400 Steyr

Wien, im *Dezember 2019*

Vorname, Nachname

Danksagung

Mein Dank gilt an dieser Stelle allen Verantwortlichen, welche die Durchführung dieser Diplomarbeit ermöglicht haben.

Zum einen war dies Hr. Prof. Haider, welcher diese Arbeit seitens der Technischen Universität Wien betreut hat. Als Vorstand des Institutes für Energietechnik und Thermodynamik war er auch dafür verantwortlich, dass ich meine Tätigkeit für die EVN Wärmetechnik GmbH in Form einer Diplomarbeit niederschreiben durfte. Seine Vorlesungen im Bereich der wärmetechnischen Anlagen waren außerdem Grundlage für das Interesse in diesem Fachbereich.

Auf Seiten der EVN Wärmetechnik GmbH gilt mein Dank zum einen Herrn DI Gernot Alfons, welcher als Teil der Geschäftsführung diese Arbeit von offizieller Seite ermöglicht hat, zum anderen Hr. Dr. Thomas Gröbl, welcher meine Arbeit betreut hat. Seine Betreuung war sehr intensiv und geduldig. So konnte ich einen erheblichen Wissenszuwachs im Bereich der wärmetechnischen Anlagen erlangen.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Familie, welche durch ihre Unterstützung mein Studium erst ermöglicht hat und mir auch immer mit Rat und Tat zur Seite steht.

Kurzfassung

Für die vorliegende Arbeit wurden im Auftrag der *EVN Wärmekraftwerke GmbH* zwei Modelle für die Simulation einer Monoverbrennungsanlage für Klärschlamm mit anschließendem Dampferzeuger erstellt. Mittels des Programmes *IPSEpro* wurde ein Modell erstellt, das einen Gesamtprozess abbildet. Dieser Gesamtprozess umfasst die Vortrocknung und Verbrennung des Klärschlammes als auch den nachgeschalteten Kreisprozess des Wassers. Ein derartiges *IPSEpro*-Modell dient im Auslegungsprozess der Bilanzierung einzelner Prozesskomponenten. Mittels solcher Bilanzierungen lassen sich Randbedingungen für spätere Auslegungsrechnungen generieren. Die Simulation in *IPSEpro* hat gezeigt, dass die Bereitstellung von Nutzwärme für die Trocknung des Klärschlammes als auch für die Verbrennungsluftvorwärmung und sonstige interne Verbraucher durch prozessinterne Wärmerückgewinnung erfolgen kann. Mit dem Programm *Power Plant Simulator and Designer (PPSD)* wurde ein Modell erstellt, welches die Verbrennung von vorgetrocknetem Klärschlamm samt Abhitzedampferzeuger simuliert. Die Modellbildung erfolgte anhand konstruktiver als auch stofflicher Daten einer vorab durchgeführten Berechnung seitens *EVN*. In beiden Modellen lag ein Hauptaugenmerk auf der möglichst realistischen Darstellung des zweistufigen Verbrennungsprozesses in einer stationären Wirbelschichtfeuerung. In beiden Modellen konnte eine für die *EVN* zufriedenstellende Darstellung dieser Feuerungsform realisiert werden. Die Ergebnisse der Simulation in *PPSD* bestätigen weitestgehend die Vorberechnung der *EVN*. An einzelnen Heizflächen wurden signifikante Unterschiede in den berechneten Wärmeleistungen zwischen *PPSD* und *EVN* festgestellt. Ursachen für diese Unterschiede werden in der Arbeit diskutiert. Im Zuge der Aufgabenstellung werden in der Arbeit Grundlagen über die Entstehung als auch die Verwertung von Klärschlamm behandelt. Außerdem wird auf die Brennstoffeigenschaften von Klärschlamm eingegangen und die daraus folgenden charakteristischen Mechanismen bei der Verbrennung.

Abstract

For the present work, on behalf of EVN Wärmekraftwerke GmbH, two models for the simulation of a mono-combustion-plant for sewage sludge including steam generation were created. By means of the program IPSEpro a model was created, which represents an overall process. This overall process includes the pre-drying and incineration of sewage sludge as well as a water cycle process in order of steam generation. An IPSEpro model like this helps to balance individual process components in the design process. By means of such balances, boundary conditions can be generated for later design calculations. The simulation in IPSEpro has shown that the useful heat for the drying of the sewage sludge as well as for preheating the combustion air and other internal appliances can be provided by process-internal heat recovery. With the program Power Plant Simulator and Designer (PPSD) a model was created which simulates the combustion of pre-dried sewage sludge including a heat recovery steam generator. The modelling was based on constructive as well as material data of a previously performed calculation by EVN. In both models the main focus was on a realistic representation of the two-stage combustion processes in a bubbling fluidized bed combustor. In both models it was possible to achieve a satisfying representation of this type of combustion for EVN. The results of the simulation in PPSD largely confirm the precalculation of EVN. Significant differences in the calculated heat outputs between PPSD and EVN were found at some heating surfaces. Causes for these differences are discussed in this paper. In the course of the task the basics about the formation as well as the utilization of sewage sludge are treated in the work. In addition, the fuel properties of sewage sludge and the resulting characteristics and mechanisms during combustion are discussed.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----------|---|----|
| 1 | Motivation..... | 1 |
| 2 | Thematisierung von Grundlagen rund um den Aufgabenbereich..... | 2 |
| 2.1 | Grundlagen der Wirbelschichtfeuerung (WSF)..... | 2 |
| 2.1.1 | Charakteristiken der stationären Wirbelschichtfeuerung (SWSF)..... | 3 |
| 2.1.2 | Welche Brennstoffe sind für die SWSF geeignet..... | 6 |
| 2.2 | Klärschlamm..... | 7 |
| 2.2.1 | Entstehung von Klärschlamm..... | 7 |
| 2.2.2 | Behandlung von Klärschlamm..... | 8 |
| 2.2.3 | Entsorgung von Klärschlamm..... | 8 |
| 2.2.3.1 | Düngemittel in der Landwirtschaft..... | 8 |
| 2.2.3.2 | Deponierung..... | 8 |
| 2.2.3.3 | Entsorgung im Meer..... | 9 |
| 2.2.3.4 | Thermische Verwertung..... | 9 |
| 2.2.4 | Möglichkeiten der thermischen Verwertung..... | 9 |
| 2.2.4.1 | Monoverbrennung..... | 10 |
| 2.2.4.1.1 | Wirbelschichtfeuerung..... | 10 |
| 2.2.4.1.2 | Etagenöfen..... | 11 |
| 2.2.4.1.3 | Etagenwirbler..... | 11 |
| 2.2.4.1.4 | Drehrohrofen..... | 12 |
| 2.2.4.2 | Mitverbrennung von Klärschlamm..... | 12 |
| 2.2.4.2.1 | Mitverbrennung in Kohlekraftwerken..... | 13 |
| 2.2.4.2.2 | Mitverbrennung in Müllverbrennungsanlagen..... | 13 |
| 2.2.4.2.3 | Mitverbrennung in Zementwerken..... | 13 |
| 2.2.4.3 | Alternative Verfahren zur thermischen Verwertung von Klärschlamm..... | 13 |
| 2.2.5 | Charakteristika und Mechanismen bei der Verbrennung von Klärschlamm..... | 14 |
| 2.2.5.1 | Brennstoffeigenschaften von Klärschlamm..... | 14 |
| 2.2.5.2 | Prozesse und Mechanismen während der Verbrennung..... | 14 |
| 2.2.6 | Verfahrenstechnische Aspekte bei der Verbrennung von Klärschlamm in der stationären Wirbelschicht..... | 17 |
| 2.2.6.1 | Vorgelagerte Trocknung..... | 17 |
| 2.2.6.2 | Einfluss der flüchtigen Bestandteile..... | 18 |
| 2.2.6.3 | Luftstufung..... | 19 |
| 2.2.6.1 | Rauchgasrezirkulation..... | 20 |
| 2.2.6.1 | Emissionen..... | 20 |

| | | |
|-----------|---|----|
| 3 | Modellierung..... | 23 |
| 3.1 | Beschreibung der verwendeten Software | 23 |
| 3.1.1 | IPSEpro | 23 |
| 3.1.1.1 | Struktur | 23 |
| 3.1.1.2 | MDK..... | 24 |
| 3.1.1.3 | Model Libraries | 24 |
| 3.1.1.4 | PSE | 24 |
| 3.1.2 | PPSD..... | 24 |
| 3.2 | IPSEpro Modell | 26 |
| 3.2.1 | Aufgabenstellung | 26 |
| 3.2.2 | Modellbildung in IPSEpro..... | 26 |
| 3.2.2.1 | Modellierung der Trocknung..... | 27 |
| 3.2.2.2 | Modellierung und Simulation der stationären Wirbelschichtfeuerung..... | 27 |
| 3.2.2.3 | Modellierung des Dampfkessels und Integration des Brennkammermodells | 31 |
| 3.2.2.4 | Modellierung des Wasser-Dampf-Weges nach der Turbine | 32 |
| 3.2.3 | Simulation und Parametervariation | 33 |
| 3.2.3.1 | Voraussetzungen bzw. Vorgabeparameter | 34 |
| 3.2.3.2 | Ergebnisse und Diskussion | 34 |
| 3.3 | PPSD-Modell..... | 37 |
| 3.3.1 | Aufgabenstellung | 37 |
| 3.3.2 | Anlagenkonfiguration | 38 |
| 3.3.2.1 | Beschreibung und Aufbau der Anlage | 38 |
| 3.3.3 | Modellbildung in PPSD | 40 |
| 3.3.3.1 | Modellierung der Brennkammer/Erster Zug..... | 42 |
| 3.3.3.2 | Modellierung der Rauchgaszüge..... | 43 |
| 3.3.3.3 | Modellierung des Wasser-Dampf-Systems | 44 |
| 3.3.3.4 | Einstellung und Regelung der Stoffströme | 46 |
| 3.3.4 | Auswertung und Diskussion der Simulationsergebnisse | 48 |
| 3.3.4.1 | Lastfälle | 49 |
| 3.3.4.2 | Vollast (VL), Rauchgasseite | 49 |
| 3.3.4.2.1 | Leistungsdaten, VL | 49 |
| 3.3.4.2.2 | Rauchgasmassen- bzw. Volumenströme | 50 |
| 3.3.4.2.3 | Rauchgastemperaturen..... | 50 |
| 3.3.4.2.4 | Wärmeleistungen | 52 |
| 3.3.4.3 | Teillast (TL), Rauchgasseite..... | 56 |
| 3.3.4.3.1 | Leistungsdaten..... | 56 |
| 3.3.4.3.2 | Rauchgasmassen- bzw. Volumenstrom | 56 |

| | |
|---|----|
| 3.3.4.3.3 Rauchgastemperaturen..... | 56 |
| 3.3.4.3.4 Wärmeleistungen | 58 |
| 3.3.4.4 Vollast (VL), Wasserseite..... | 59 |
| 3.3.4.4.1 Temperaturen..... | 59 |
| 3.3.4.4.2 Drücke/Druckverluste..... | 60 |
| 3.3.4.5 Q-t-Diagramm | 61 |
| 3.3.4.6 Abschätzung des Anlagengewichtes..... | 62 |
| 4 Zusammenfassung..... | 63 |
| Anhang | 64 |
| Abbildungsverzeichnis..... | 64 |
| Tabellenverzeichnis | 65 |
| Diagrammverzeichnis..... | 65 |
| Literatur..... | 66 |
| Sonstige Anhänge..... | 68 |
| A: Vergrößerte Darstellung des PPSD-Modells auf Rauchgasseite | 68 |
| B: Vergrößerte Darstellung des PPSD-Modells auf Wasserseite | 69 |
| C: Vergrößerte Darstellung des Verdampfersystems im PPSD-Modell | 70 |
| D: Vergrößerte Darstellung des IPSEpro-Modells..... | 71 |

1 Motivation

Im Zuge der Globalisierung und dem damit einhergehenden Wirtschafts- als auch Bevölkerungswachstum steigen die Anforderungen an die Abwasserentsorgung. Wachsender Wohlstand und damit steigender Wasserverbrauch sorgen für ein immer größeres Abwasseraufkommen. Wasser spielt neben der Brauch- und Trinkwasserversorgung auch eine wichtige Rolle in vielen technischen und industriellen Prozessen. Daher gelangen viele Schadstoffe und unerwünschte Substanzen in das Abwasser, welches in Kläranlagen davon befreit wird. Diese unerwünschten Bestandteile bleiben im Klärschlamm zurück. In Zeiten des Klimawandels und des immer größer werdenden Umweltbewusstseins werden immer höhere Anforderungen an die Behandlung von Klärschlamm gestellt. Frühere, gängige Entsorgungsvarianten - wie die Deponierung oder die Ausbringung auf landwirtschaftlichen Flächen - werden an immer strengere Rahmenbedingungen geknüpft und verlieren somit an Bedeutung

Unter diesen Voraussetzungen etablierte sich in den letzten Jahren die thermische Behandlung von Klärschlamm. Durch die fachgerechte thermische Verwertung von Klärschlamm werden Schadstoffe thermisch zerstört und das Volumen des Schlammes auf 10% reduziert. Die bei der thermischen Behandlung freigesetzte Wärme kann dafür genutzt werden einen Dampfkraftprozess zu betreiben, welcher zur Erzeugung von Strom bzw. zur Bereitstellung von Nutzwärme dienen kann. Vor allem kommunaler Klärschlamm enthält meist Phosphor, welcher als wichtiger, nicht substituierbarer Pflanzennährstoff gilt. Die Nutzung des enthaltenen Phosphors erfolgte in der Vergangenheit zumeist über die Ausbringung des Klärschlammes in der Landwirtschaft. Aufgrund anderer enthaltener Schadstoffe wie Schwermetallen, toxischer Substanzen oder Mikroplastik wird diese Form der Verwertung aus umweltrechtlichen Gründen immer schwieriger. Unter diesen Voraussetzungen kommt der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen eine immer größere Bedeutung zu. Eine Variante ist die Rückgewinnung aus Klärschlammaschen, welche bei der thermischen Verwertung anfallen. Dabei stellt die Monoverbrennung von Klärschlamm eine der vielversprechendsten Verwertungsmethoden dar.

Unter diesen Umständen stieg die *EVN AG* in der Vergangenheit verstärkt in den Bereich der Abwasserentsorgung ein. In weiterer Folge wird seitdem auch die thermische Behandlung und Verwertung von Klärschlamm verfolgt. Für die vorliegende Masterarbeit sollten für die *EVN Wärmekraftwerke GmbH*, eine Tochter der *EVN AG*, Modelle zur Simulation einer Monoverbrennungsanlage für Klärschlamm erstellt werden.

2 Thematisierung von Grundlagen rund um den Aufgabenbereich

In diesem Kapitel soll auf Grundlagen und den Stand der Technik im Bereich der Klärschlammverwertung eingegangen werden. Dafür werden insbesondere thermische Verfahren zur Klärschlammverwertung behandelt. Insbesondere soll dabei auf Aspekte und Problematiken bei der thermischen Klärschlammverwertung in stationären Wirbelschichtfeuerungen eingegangen werden.

2.1 Grundlagen der Wirbelschichtfeuerung (WSF)

Bei der Wirbelschichtfeuerung liegt ein Gemisch aus Brennstoff und Inertmaterial als Feststoffschicht vor. Als Inertmaterial wird Kalkstein, Quarzsand oder auch Asche verwendet. Diese Feststoffschicht wird durch Luft, welche von unten durch einen Düsenboden strömt, in einen fluidisierten Zustand versetzt. In diesem Zustand wird diese Feststoffschicht als sogenannte Wirbelschicht bezeichnet. [1]

Bis zu einer gewissen Luft- bzw. Fluidisierungsgeschwindigkeit *behält die intensiv wirbelnde Schicht eine definierte Bettoberfläche und man bezeichnet sie als stationär-atmosphärische Wirbelschicht [1]*. Bei steigender Fluidisierungsgeschwindigkeit wird immer mehr Feststoff aus der Schicht ausgetragen. Dieser kann durch entsprechende Einrichtungen abgeschieden und der Schicht wieder zugeführt werden. In dieser Form wird die Wirbelschicht als zirkulierende Wirbelschicht bezeichnet. [1]

Abbildung 2.1-1 zeigt einfache Schemata einer stationären bzw. zirkulierenden WSF.

Wichtige Parameter zur Ausbildung einer Wirbelschicht sind Abmessung und Dichte der Partikel sowie Strömungsgeschwindigkeit, Dichte und kinematische Viskosität der Fluidisierungsluft bzw. des Fluidisierungsgases. [2]

Die Wirbelschichtfeuerung ist für aschereiche Brennstoffe geeignet und besitzt mit 800-950°C relativ niedrige Temperaturen im Verbrennungsraum. Zum Vergleich, in anderen verbreiteten Feuerungssystemen, wie der Rost- oder der Staubfeuerung, betragen die Brennkammertemperaturen 1200-1400°C. Gegenüber den eben erwähnten Feuerungssystemen besitzt die Wirbelschichtfeuerung zwei wesentliche Vorteile. Zum einen ist dies die gute Umsetzung qualitativ minderwertiger Brennstoffe und zum anderen wird bereits ohne zusätzliche Abgasreinigungsanlagen eine beachtliche Reduzierung der SO₂- bzw. NO_x-Emissionen erreicht. Diese Eigenschaften beruhen auf dem intensiven Wärme- bzw. Stoffaustausch in der Wirbelschicht. Laut Effenberger [1] ist die WSF die einzige

Technologie, welche gesetzliche Emissionsgrenzwerte ohne Rauchgasentschwefelungs- und Entstickungsanlagen erreichen kann. Der Leistungsbereich von WSF liegt im Bereich von 50-800 MW_{th} wobei zu sagen ist, dass nur die zirkulierende WSF für Leistungsbereiche von mehr als 100 MW_{th} in Frage kommt. [1]

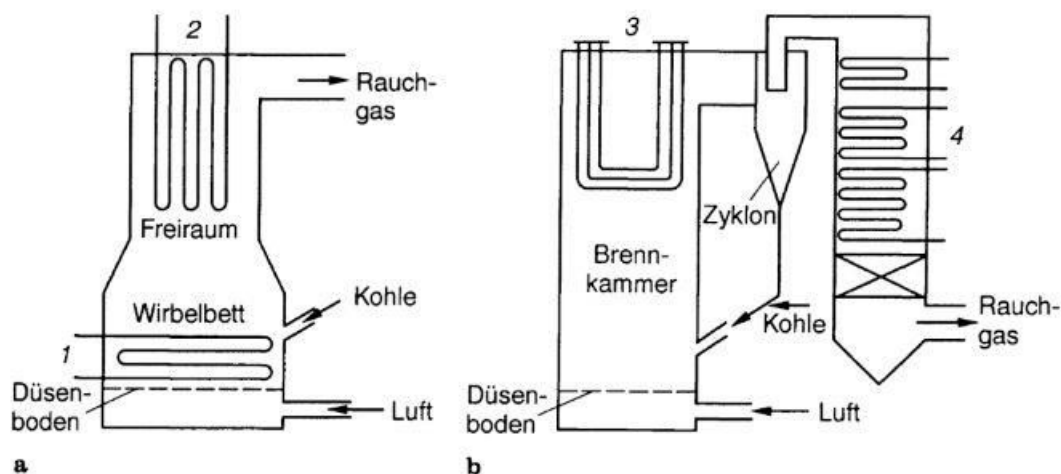


Abbildung 2.1-1: Schema einer stationären (a) und zirkulierenden (b) WSF. 1 Tauchheizfläche, 2 Konvektionsheizfläche, 3 Schottheizfläche, 4 Konvektionsheizfläche [1]

2.1.1 Charakteristiken der stationären Wirbelschichtfeuerung (SWSF)

Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, ist die stationäre Wirbelschicht dadurch gekennzeichnet, dass die wirbelnde Feststoffschicht bzw. das sogenannte Wirbelbett eine definierte Oberfläche ausbildet. Man spricht auch von der Bettoberfläche. In diesem Wirbelbett führen die Partikel eine ungeordnete Bewegung aus. [1]

Infolge der Luftzufuhr bilden sich im Bett (Anm. Wirbelbett) Luftblasen, welche zur Oberfläche wandern. In diesem Fall spricht man auch von einer blasenbildenden Wirbelschicht, welche am häufigsten auftritt. An der Bettoberfläche angekommen eruptieren die Blasen und schleudern Feststoff in den Gasraum darüber. Durch Verdrängungs- und Sogwirkungen der Blasenbewegung kommt es zur Teilchenvermischung bzw. Partikelzirkulation im Bett. Unter bestimmten Umständen können sich große Blasen über dem gesamten Bettquerschnitt bilden; man spricht dann von einer stoßenden Wirbelschicht. Sind die Haftkräfte zwischen den Partikeln merkbar größer als jene zwischen Gas und Partikel können sich Gassen in der Schüttelschicht bilden (vgl. Abbildung 2.1-2). In diesem Fall geht das charakteristischste Merkmal der Wirbelschicht verloren. [1]

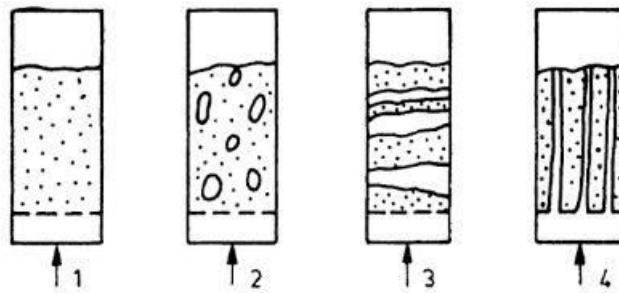


Abbildung 2.1-2: Strömungszustände in einer stationären Wirbelschicht. 1 homogen, 2 blasenbildend, 3 stoßend, 4 gassenbildend [1]

Grundsätzlich kann die Vermischung in der Wirbelschicht homogen oder inhomogen stattfinden. *Homogen* ist sie dann, wenn die Feststoffkonzentration an jedem Ort innerhalb der Wirbelschicht und zu jeder Zeit gleich ist. Dies ist ein Idealfall und in der Praxis nicht realisierbar [1]. Entsprechend gegensätzlich ist die Feststoffkonzentration bei der inhomogenen Wirbelschicht. Dort ist sie im betrachteten Volumen orts- und zeitabhängig. [1]

Um die Existenz einer Wirbelschicht zu gewährleisten muss die Strömungsgeschwindigkeit die Geschwindigkeit des Lockerungspunktes erreichen. Bis zum Erreichen dieser Lockerungsgeschwindigkeit u_L steigt der Druckverlust in der Schüttschicht stetig bei gleichbleibender Struktur, also bei gleichbleibender Porosität und Schichthöhe. Wird die Strömungsgeschwindigkeit über den Lockerungspunkt hinaus erhöht expandiert die Schicht in Folge der stark wirbelnden Partikel bei gleichbleibendem Druckverlust. Ein weiterer Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit führt schließlich zum Austrag der Partikel und dem Anstieg des Druckverlustes (vgl. Abbildung 2.1-3).

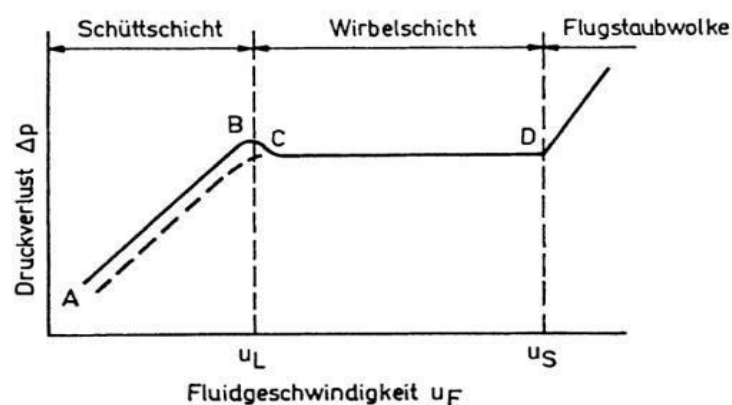


Abbildung 2.1-3: Druckverlust in einer Wirbelschicht in Abhängigkeit der Fluidisierungsgeschwindigkeit [1]

Der Existenzbereich der stationären Wirbelschicht ist also durch den Geschwindigkeitsbereich

$$u_L \leq u \leq u_A \quad (1)$$

definiert. Bei der Austragungsgeschwindigkeit u_A handelt es sich um die Sinkgeschwindigkeit des angeströmten Feststoffes. Der Geschwindigkeitsbereich ist wiederum abhängig vom Partikeldurchmesser d_p in der Schüttung (vgl. Abbildung 2.1-4). Dieser muss der Bedingung (2) genügen. [1]

$$d_{pA} < d_p < d_{pL} \quad (2)$$

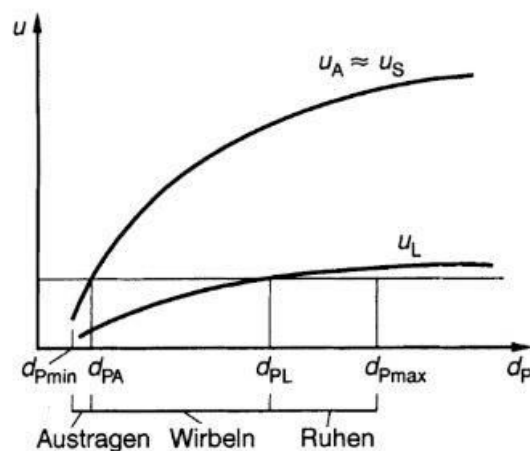


Abbildung 2.1-4: Existenzbereich der Wirbelschicht [1]

Eine SWSF besitzt eine Brennkammer, welche von unten durch einen Düsenboden abgeschlossen ist. Durch diesen strömt die zur Fluidisierung der Schicht notwendige Luft. Typischerweise hat die fluidisierte Schicht eine Höhe von 1-2m. [1]

Charakteristische Betttemperaturen einer WSF sind 800-950°C. Bei Brennstoffen mit niedrigem Wassergehalt bzw. hohem Heizwert können Tauchheizflächen ins Bett gelegt werden, um die Wärmeabfuhr zu gewährleisten. Mit sinkendem Ausbrand reduziert sich auch die abzuführende Wärmemenge (vgl. Abbildung 2.1-5). Ein zu hoher Wassergehalt würde die Betttemperatur zu stark senken. In diesem Fall ist eine vorgelagerte Trocknung des Brennstoffes notwendig. [1]

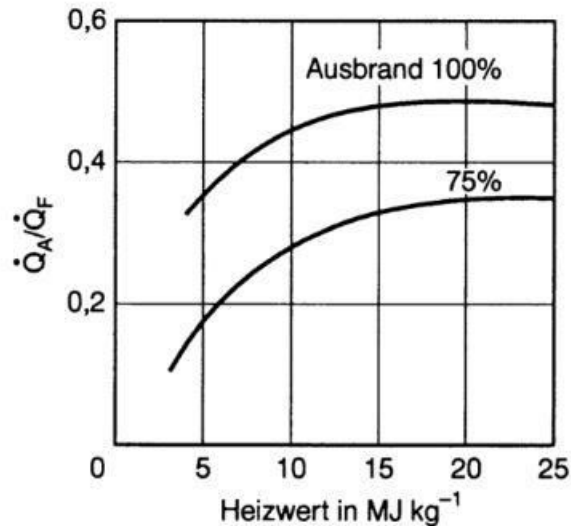


Abbildung 2.1-5: Verhältnis von abzuführender Wärmemenge \dot{Q}_A zu freigesetzter Wärmemenge \dot{Q}_F in Abhängigkeit vom Heizwert [1]

2.1.2 Welche Brennstoffe sind für die SWSF geeignet

Die Brennstoffcharakteristik hat eine große Bedeutung für die Realisierung der gewünschten Betttemperatur. Dabei ist der Gehalt von flüchtigen Bestandteilen im Brennstoff eines der wichtigsten Kriterien. Kohle beispielsweise brennt üblicherweise im Bett, was den Einsatz von Tauchheizflächen erforderlich machen kann. Erosion und Verschmutzung der Tauchheizflächen stellen eine große Problematik dar. Deswegen wird diese Konfiguration bei SWSF heutzutage vermieden und es kommen hauptsächlich Brennstoffe mit höherem Wassergehalt bzw. mehr flüchtigen Bestandteilen zum Einsatz. Beispielsweise verbrennt Biomasse - mit einem meist hohen Anteil an flüchtigen Bestandteilen - knapp über dem Bett und setzt einen großen Teil der Wärme dort frei. [3]

Abbildung 2.1-6 zeigt den vertikalen Temperaturverlauf bei der Verbrennung von Brennstoffen mit geringerem (links) bzw. höherem (rechts) Anteil an flüchtigen Bestandteilen. Darin ersichtlich nimmt die Temperatur im Freeboard (Bereich über dem Bett) bei Brennstoffen mit weniger flüchtigen Bestandteilen (coal) durch die Kühlung der Membranwände ab. Im Gegensatz dazu steigt die Temperatur im Freeboard bei der Verbrennung von Biomasse infolge der Verbrennung der flüchtigen Bestandteile. Die Temperaturerhöhung über dem Bett resultiert aus der Reaktion der flüchtigen Stoffe mit dem Überschuss an Sauerstoff aus der Luftzufuhr. [3]

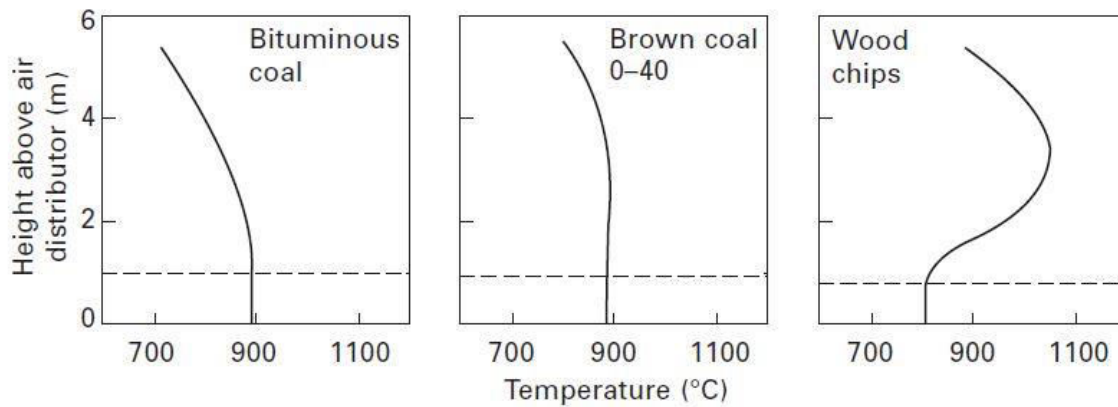


Abbildung 2.1-6: Temperaturprofile von Brennstoffen geordnet nach steigendem Anteil an flüchtigen Bestandteilen (v.l.n.r.). Strichlierte Linie entspricht der Betthöhe. [3]

2.2 Klärschlamm

Nachfolgend sollen Grundlagen über Entstehung, Behandlung und Verwertung von Klärschlamm behandelt werden

2.2.1 Entstehung von Klärschlamm

Klärschlamm ist das bei der Abwasserreinigung anfallende Rückstands- bzw. Abfallprodukt und besteht aus Wasser und einem Gemisch aus abgeschiedenen Feststoffen. Abwasser beinhaltet flüssige bzw. durch Wasser transportierte Abfälle aus Haushalt, Gewerbe, Industrie und der Umwelt. Es kann dadurch eine Reihe von unerwünschten Bestandteilen enthalten. Solche können sein: organische, anorganische oder toxische Substanzen als auch pathogene oder krankheitserregende Mikroorganismen. [4]

U.a. aus diesen Gründen kann es nicht einfach in Gewässern oder der Umwelt entsorgt werden. Die Zersetzung in Gewässern würde viel Sauerstoff benötigen und somit Wasserleben gefährden. Die toxischen Substanzen, v.a. Schwermetalle, aber auch bestimmte Mikroorganismen würden sich gesundheitsschädlich auf das Leben und die Umwelt des Planeten auswirken. Außerdem würde der hohe Phosphat- bzw. Stickstoffgehalt ein unkontrolliertes Wasserpflanzenwachstum mit sich bringen. [4]

Somit ist es notwendig diese unerwünschten Komponenten im Abwasser zu beseitigen bevor es endgültig entsorgt wird. Dieser Vorgang erfolgt in Kläranlagen bis zur Erreichung festgelegter Grenzwerte. [4]

In modernen Kläranlagen erfolgt die Abwasserreinigung üblicherweise in drei Phasen. In den ersten beiden erfolgt eine mechanische bzw. biologische Behandlung. In der zusätzlichen dritten Phase wird versucht den Stickstoff- bzw. Phosphorgehalt zu reduzieren. [4]

Das volumenmäßig größte Randprodukt dieser Abwasserreinigung ist der sogenannte Klärschlamm. [4]

2.2.2 Behandlung von Klärschlamm

Klärschlamm liegt als sehr flüssige Suspension mit einem Feststoffgehalt von 0.25-12% vor, was die weitere Handhabung erschwert. Außerdem besteht er zu einem Großteil aus den zuvor aus dem Abwasser entfernten, gefährlichen Substanzen und Mikroorganismen. [4]

Somit ist eine weitere Behandlung notwendig bevor der Klärschlamm entsorgt werden kann. Ziele der weiteren Behandlung sind die Reduzierung des Geruches, die Reduzierung der organischen Bestandteile (Stabilisierung), die Zerstörung von Krankheitserregern, Verbesserung der Entwässerungscharakteristiken sowie die Reduktion des Wassergehaltes und somit des Volumens des Schlammes. [4]

2.2.3 Entsorgung von Klärschlamm

Die Verwertung des behandelten bzw. aufbereiteten Klärschlammes hat eine wichtige Bedeutung. Diese soll im Idealfall eine sichere und umweltverträgliche Lösung darstellen. Einige verbreitete Möglichkeiten der Verwertung sollen in diesem Abschnitt beschrieben werden.

2.2.3.1 Düngemittel in der Landwirtschaft

Aufgrund des Phosphor- bzw. Stickstoffgehaltes besitzt Klärschlamm gute Düngeeigenschaften. Deswegen wird Klärschlamm in vielen Regionen auf Feldern ausgebracht. Ein Vorteil dieser Nutzung ist, dass dadurch weniger Kunstdünger ausgebracht werden muss, welcher in der Erzeugung sehr energieintensiv ist. [4]

Aufgrund der oft hohen Schadstoffbelastung des Klärschlammes geriet diese Form der Verwertung in der jüngeren Vergangenheit jedoch in die Kritik. Die Folge war, dass auch die landwirtschaftliche Ausbringung an die Einhaltung von Grenzwerten gebunden wurde. [4]

2.2.3.2 Deponierung

Landschaftliche Deponierung ist bislang eine der verbreitetsten Lösung zur Verwertung von Klärschlamm. Laut Werther und Ogada [4] wurden in der europäischen Union im Jahr 1997 40% des Klärschlammes deponiert.

Auch diese Form der Verwertung ist nicht unproblematisch. Ist der Wassergehalt des Klärschlammes zu hoch, besteht die Gefahr des Versickerns ins Grundwasser. Wird der Schlamm nicht ausreichend von organischen Stoffen befreit kommt es zu Faulprozessen und im Zuge dessen zu Emissions- (v.a. Methan) bzw. Geruchsproblemen. Aus diesen Gründen wurden in vielen Ländern auch für die Deponierung Grenzwerte festgelegt. Diese

gelten für einen Mindestanteil an Trockensubstanz im Schlamm bzw. für einen Maximalanteil an organischen Substanzen. [4]

Aufgrund der steigenden Anforderungen, schwindendem Angebot und steigenden Preisen von nutzbaren Flächen sinkt auch das ökonomische Interesse an der Deponierung. [4]

2.2.3.3 Entsorgung im Meer

Auch die Entsorgung im Meer wurde lange Zeit praktiziert. Die damit einhergehende Wasserverschmutzung sorgte aber in vielen Regionen für ein Verbot dieser Vorgehensweise. So beispielsweise in der EU im Jahr 1998. [4]

2.2.3.4 Thermische Verwertung

Aufgrund der immer schwierigeren Rahmenbedingungen für die oben genannten Entsorgungsvarianten kommt der thermischen Verwertung von Klärschlamm eine immer größere Bedeutung zu. Verfahren wie v.a. die Verbrennung vereinen zahlreiche Anforderungen, welche an die zeitgemäße Klärschlammverwertung gestellt werden. So kann das Volumen des bereits entwässerten Klärschlammes auf 10% seines ursprünglichen Volumens reduziert werden. Toxische organische Bestandteile werden thermisch zerstört. Außerdem besitzt getrockneter Klärschlamm einen Heizwert nahe Braunkohle. Somit kann die thermische Verwertung zur Bereitstellung von Wärme oder Strom genutzt werden. [4]

Vor allem in Ballungszentren ist es außerdem schwierig die großen anfallenden Mengen an Klärschlamm zu deponieren oder anderwärtig zu entsorgen. Somit stellt die Verbrennung, vor allem in dicht besiedelten Regionen, eine vielversprechende Lösung für die Zukunft dar. In einigen europäischen Ländern wurden bereits Ende der 90er Jahre bis zu 24% des anfallenden Klärschlammes verbrannt. [4]

2.2.4 Möglichkeiten der thermischen Verwertung

Bei der thermischen Verwertung von Klärschlamm gilt es verschiedenste Anforderungen zu berücksichtigen. Diese sind laut Werther und Ogada [4] u.a. folgende:

- Nach der Verbrennung liegen bis zu 50 Gewichtsprozent der zugeführten Trockensubstanz (TS) als Asche vor. Die Asche enthält noch einen großen Teil der giftigen Schwermetalle. Somit stellt die Entsorgung der Asche eine wesentliche Anforderung dar.
- Während der Trocknung durchläuft der Klärschlamm eine sehr zähe Phase, die s.g. Leimphase, was die Handhabung während des Trocknungsprozesses erschwert.

- Im Schlamm enthaltene Bestandteile wie Schwefel, Stickstoff, Chlor, Furane und Dioxine werden bei der Verbrennung in unterschiedlichsten Formen gasförmig freigesetzt. Dies erfordert eine intensive Abgasreinigung.
- Aufgrund des hohen Wassergehaltes ist der Heizwert von entwässertem Klärschlamm sehr niedrig. Wird keine Trocknung vorgelagert kann ein Stützbrennstoff zur Erhöhung des Heizwertes notwendig sein.

Nachfolgend werden einige Verfahren zur thermischen Verwertung von Klärschlamm erläutert. Für detaillierte bzw. ergänzende Informationen über bestehende und zukünftige Techniken der thermischen Klärschlammverwertung wird auf die Literatur verwiesen. [4, 5]

Auf charakteristische Vorgänge bei der Verbrennung von Klärschlamm wird in Abschnitt 2.2.5 eingegangen.

2.2.4.1 Monoverbrennung

Die Monoverbrennung stellt eine der am weitesten verbreitete Methode zur thermischen Verwertung von Klärschlamm dar. Dabei wird Klärschlamm ohne Zugabe von Stützbrennstoffen verbrannt. Um einen ausreichenden Heizwert für die Monoverbrennung zu erreichen ist - wie bereits erwähnt - auf entsprechende Prozessschritte zur Entwässerung bzw. Trocknung des Klärschlammes zu achten. [4, 5]

2.2.4.1.1 Wirbelschichtfeuerung

Die stationäre Wirbelschichtfeuerung ist das weltweit am häufigsten genutzte Verfahren um Klärschlamm zu verbrennen. [5]

Der Erfolg dieser Technologie beruht u.a. auf folgenden Vorteilen. Zunächst ist die gute Durchmischung im Bett zu erwähnen. Dadurch wird eine große Oberfläche für den Wärmetransport zwischen Bettmaterial und Brennstoff geschaffen. Somit erreicht man auch einen guten Ausbrand bei relativ niedrigen Temperaturen. Dieser Umstand und die lange Verweilzeit im Bett sorgen auch bei großen Schlammklumpen für einen guten Ausbrand. Üblicherweise kommt es im Freeboard quasi zu einer Nachverbrennung der flüchtigen Bestandteile, was für die Zerstörung organischer Bestandteile sorgt. Weiters dient der große Bestand an inertem Bettmaterial als thermischer Puffer. Durch das große Wärmereservoir können Schwankungen beim Wassergehalt bzw. in der Schlammzusammensetzung stabilisiert werden. Durch den geringen Brennstoffanteil wiederum ist es möglich die Anlage rasch an- oder abzufahren. Das Bettmaterial ist außerdem verantwortlich für eine lange Lebensdauer der Ausmauerung. Deren Wartung und Instandhaltung ist ein wesentlicher Kostenpunkt beim Betrieb einer solchen Anlage. Durch die gleichmäßige Temperaturverteilung im Bett kommt es zu keinen punktuellen thermischen Belastungen in der Ausmauerung. Somit wird diese weniger belastet und muss dementsprechend seltener

erneuert werden. Auch der Umstand, dass sich wenig bewegliche Teile in der Brennkammer befinden wirkt sich positiv auf die Wartungskosten aus. [4]

2.2.4.1.2 Etagenöfen

Die Verbrennungstechnik mittels Etagenöfen war in den Anfangszeiten der Klärschlammverbrennung weit verbreitet. Derartige Öfen bestehen aus einem ausgemauerten Zug, welcher in Etagen unterteilt ist (vgl. Abbildung 2.2-1). Der Klärschlamm wird auf der obersten Ebene zugegeben und durch auf einer rotierenden Welle befestigte s.g. Krählarms von Etage zu Etage nach unten befördert. In den oberen Zonen findet dabei die Schlammtrocknung statt. In den mittleren Etagen kommt es zur Verbrennung bzw. Pyrolyse. In den unteren Etagen kommt es zur Aschekühlung bei gleichzeitiger Vorwärmung der Verbrennungsluft. Ein Vorteil der Etagenöfen ist die Klärschlamm-trocknung durch einen Teil der Rauchgase. Somit können Klärschlämme ohne vorgeschaltete Trocknung verbrannt werden. Hohe Wartungskosten und die Schwierigkeiten die Verbrennung in den mittleren Etagen gewährleisten zu können, führten dazu, dass die Etagenöfen immer mehr durch andere Techniken, v.a. jener der Wirbelschicht, abgelöst wurden. [4, 5]

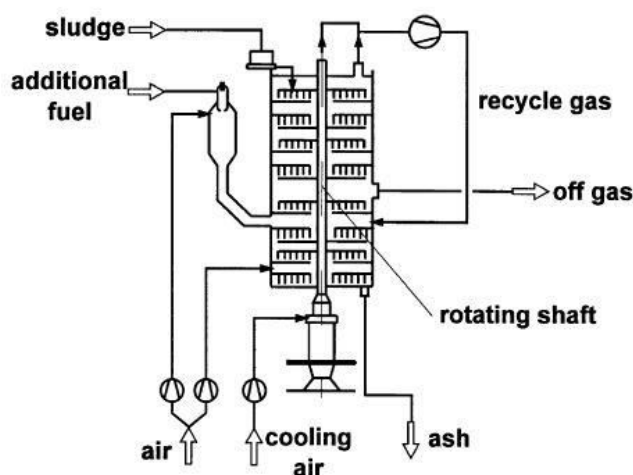


Abbildung 2.2-1: Schematische Darstellung eines Etagenofens [4]

2.2.4.1.3 Etagenwirbler

In sogenannten Etagenwirblern werden die Vorteile der Etagenöfen mit einer Wirbelschichtfeuerung kombiniert. Dabei wird über einem Wirbelschichtofen ein Etagentrockner platziert (vgl. Abbildung 2.2-2). Der Schlamm wird von oben zugegeben und beim Durchwandern der Etagen durch einen Teil der Rauchgase aus der Wirbelschichtfeuerung getrocknet. Von der untersten Etage fallen die Schlammklumpen dann gleichmäßig verteilt in das Wirbelbett. [4, 5]

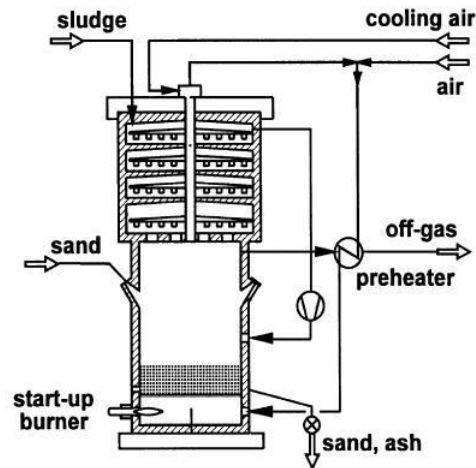


Abbildung 2.2-2: Schematische Darstellung eines Etagenwirblers [4]

2.2.4.1.4 Drehrohröfen

In Drehrohröfen wird der Schlamm in einer langsam drehenden ausgemauerten Stahltrommel verbrannt. Durch die Rotation und eine leichte Neigung wird der Schlamm vom oberen zum unteren Ende befördert. Dadurch durchläuft er verschiedene Zonen, in welchen Trocknung, Entgasung, Verbrennung und Aschekühlung stattfinden. Diese Technologie fand keine weite Verbreitung bei der Klärschlammverbrennung. Ein Problem sind Schlammschichten, welche sich an die heißen Wände anbacken können. Diese behindern den Ausbrand im Zentrum der Trommel. [4]

2.2.4.2 Mitverbrennung von Klärschlamm

Neben der Monoverbrennung kann Klärschlamm auch in anderen, bestehenden Anlagen wie Kohlekraftwerken oder Müllverbrennungsanlagen, mitverbrannt werden. Dies kann unter bestimmten Aspekten eine interessante Variante sein. Es können bestehende Kapazitäten genutzt werden, wenn keine Monoverbrennungsanlage zur Verfügung steht. Außerdem können Klärschlämme mitverbrannt werden, deren Heizwert für die Monoverbrennung nicht ausreichen würde. Des Weiteren ist bei der Mitverbrennung in Müllverbrennungsanlagen oft keine Zusatzgenehmigung erforderlich. [4]

Es ist zu erwähnen, dass die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen nur den Aschen aus Monoverbrennungsanlagen vorbehalten ist. Eine Zufueuerung ist nur dann zulässig, wenn die zugefeuerten Brennstoffe ebenfalls über einen erhöhten Phosphorgehalt oder einen geringen Aschegehalt verfügen. Außerdem darf die Schadstoffkonzentration in der Asche durch die Zufueuerung nicht erhöht werden. [6]

2.2.4.2.1 Mitverbrennung in Kohlekraftwerken

Die Mitverbrennung von Klärschlamm in Kohlekraftwerken ist an eine Reihe von Anforderungen gebunden. Diese sind z.B. die entsprechende Brennstoffaufbereitung, die Modifikation der Brenner bzw. der Verbrennungstechnik als auch die Behandlung der anfallenden Schadstoffe. Für die meisten Kohlekraftwerke muss der Schlamm entsprechend getrocknet und gemahlen werden. Die Trocknungskapazitäten von Kohlekraftwerken sind außerdem oft nicht auf den zusätzlichen Trocknungsprozess des Schlammes ausgelegt. Eine externe Trocknungsanlage stellt eine große finanzielle Belastung dar. Außerdem sind die Abgasnachbehandlungsmaßnahmen an die Mitverbrennung anzupassen. Fördereinrichtungen für den Schlamm sind ebenfalls zu berücksichtigen. Die Wirbelschichtfeuerung hat sich auch in Kohlekraftwerken als die geeignetste Feuerungstechnik zur Mitverbrennung von Klärschlamm erwiesen. [4, 5]

2.2.4.2.2 Mitverbrennung in Müllverbrennungsanlagen

Auch bei der Mitverbrennung in Müllverbrennungsanlagen (MVA) ist die Nutzung von bestehenden Kapazitäten ein wesentlicher Anreiz. Moderne MVA verfügen außerdem über entsprechende Rauchgasreinigungseinrichtungen, welche auch den Anforderungen bei der Verbrennung von Klärschlamm genügen. Die Techniken der Rostfeuerung, der Etagenöfen und der Wirbelschichtfeuerung haben sich bei der Mitverbrennung in MVA als bewährt erwiesen. [4]

2.2.4.2.3 Mitverbrennung in Zementwerken

Für die Mitverbrennung in Zementwerken wird in der Regel Klärschlamm mit einem Anteil an Trockensubstanz von mehr als 90% verwendet. Dieser steht jedoch nur begrenzt zur Verfügung. Die Mitverbrennung von entwässertem Klärschlamm kann den Brennprozess des Zements beeinträchtigen. Hohe Phosphorgehalte können bei der Mitverbrennung außerdem die Zementqualität mindern. Des Weiteren sind die Rauchgasreinigungseinrichtungen in Zementwerken meist nicht auf die flüchtigen Schwermetallverbindungen ausgelegt. [5]

2.2.4.3 **Alternative Verfahren zur thermischen Verwertung von Klärschlamm**

Treibende Faktoren für die Entwicklung alternativer Technologien zur thermischen Klärschlammverwertung sind u.a. die großen Rauchgasvolumina, welche bei der Verbrennung von Klärschlamm entstehen. Diese stellen eine große Herausforderung für die Rauchgasreinigung dar. [4]

Eine Möglichkeit, das Rauchgasvolumen zu verringern ist die Vergasung, beispielsweise mit reinem Sauerstoff als Vergasungsmittel. Das gebildete Synthesegas ist, abgesehen von der Eignung als Brennstoff, auch ein gefragtes Produkt in der chemischen Industrie. [4]

Eine weitere Möglichkeit der Volumenreduktion ist die Pyrolyse. Bei der thermischen Zersetzung der organischen Bestandteile durch Pyrolyse entsteht brauchbares Pyrolysegas. Durch die niedrige Reaktionstemperatur wird außerdem die Bildung von SO_2 und NO_x gehemmt. [4]

Diese und weitere alternative Verfahren werden in der Literatur von Werther und Ogada [4] als auch von Lehrmann [5] behandelt.

2.2.5 Charakteristika und Mechanismen bei der Verbrennung von Klärschlamm

Im folgenden Kapitel wird auf wichtige Aspekte bei der Verbrennung von Klärschlamm eingegangen. Dabei wird insbesondere Bezug auf die Brennstoffeigenschaften sowie die Feuerung in einer stationären Wirbelschicht genommen.

2.2.5.1 Brennstoffeigenschaften von Klärschlamm

Klärschlamm ist ein Gemisch aus organischem und anorganischem Material und einem großen Anteil an Wasser. Für den Feuerungsprozess ist die Berücksichtigung charakteristischer Eigenschaften unbedingt notwendig. Laut Werther und Ogada [4] sind diese:

- Der hohe Wassergehalt von bis zu 80 Gewichtsprozent
- Der hohe Aschegehalt in der Trockensubstanz (TS) von bis zu 50 Gewichtsprozent
- Der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen von bis zu 90 Gewichtsprozent in der asche-freien TS
- Der Gehalt von weniger als 10 Gewichtsprozent an gebundenem Kohlenstoff in der Asche-freien TS

2.2.5.2 Prozesse und Mechanismen während der Verbrennung

Nach Cui et al. [7] kann man den Verbrennungsprozess von Klärschlamm der Reihe nach in folgende Teilprozesse gliedern: Trocknung/Dehydrierung, Entgasung bzw. autotherme Vergasung, Verbrennung der Flüchtigen, Ascheschmelzung und Asche-Agglomeration (vgl. Abbildung 2.2-3).

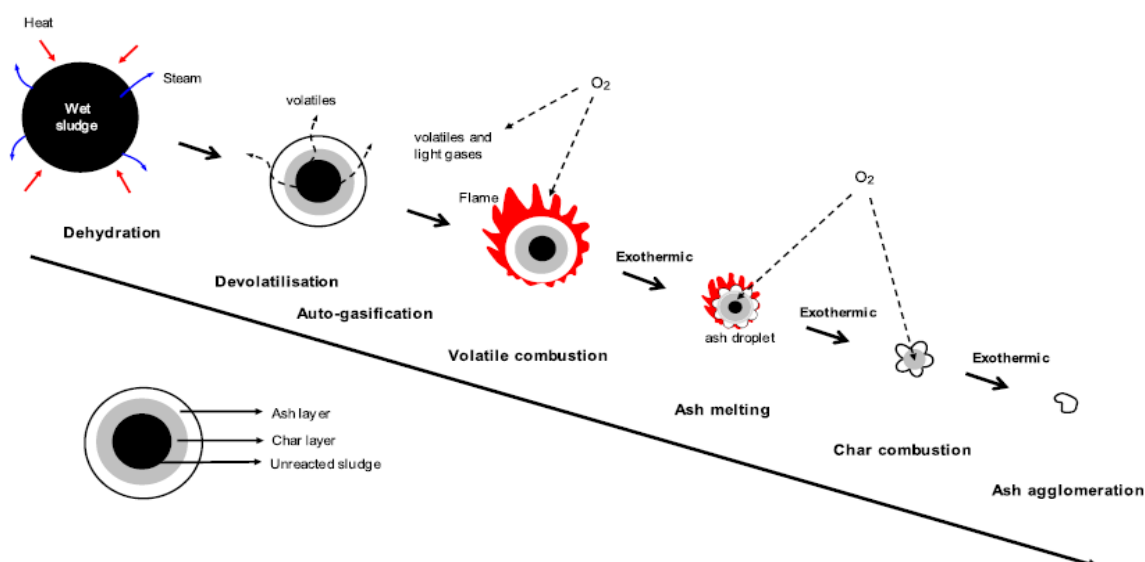


Abbildung 2.2-3: Vorgänge bei der Verbrennung von Klärschlamm-Pellets [7]

Trocknung

Der hohe Wassergehalt hat eine Reihe von Auswirkungen auf die Verbrennung von Klärschlamm. Für die Verdampfung des Wassers wird sehr viel Energie benötigt. Enthält der Schlamm nicht genug Energie, um die Verdampfung der Flüssigkeit zu gewährleisten, muss ein Stützbrennstoff eingesetzt werden. Dies kann z.B. Öl oder Gas sein. [4]

Durch die Verdampfung des Wassers während des Trocknungsprozesses erhöht sich die Menge bzw. das Volumen des entstehenden Abgases. Dementsprechend muss die gesamte Anlage auf den großen Massen- bzw. Volumenstrom des Rauchgases ausgelegt werden. Die mechanische Entwässerung des Schlammes bzw. eine vorgelagerte Trocknung sind wichtige Voraussetzungen für den Verbrennungsprozess, weil dadurch die zu verdampfende Wassermenge bereits reduziert wird. [4, 8]

Pyrolyse/ Entgasung

Der Verbrennungsprozess von Klärschlamm wird dominiert von der Verbrennung der durch die Pyrolyse freigesetzten gasförmigen flüchtigen Bestandteile (Flüchtigen). Wie bereits in Abschnitt 2.2.5.1 erwähnt besteht die aschefreie TS von Klärschlamm zu einem Großteil aus Flüchtigen. Je höher die Temperatur desto mehr Flüchtige werden freigesetzt. Abbildung 2.2-4 zeigt die Variation der Pyrolyseprodukte abhängig von der Temperatur. Hauptbestandteile der bei der Pyrolyse des Schlammes freiwerdenden Flüchtigen sind laut Werther und Ogada [4] zumeist H_2 , CO , CO_2 und Kohlenwasserstoffe (C_xH_y). Davon ist laut den Autoren CO der dominierende Anteil, aber auch die Kohlenwasserstoffe können einen großen Anteil ausmachen. [4]

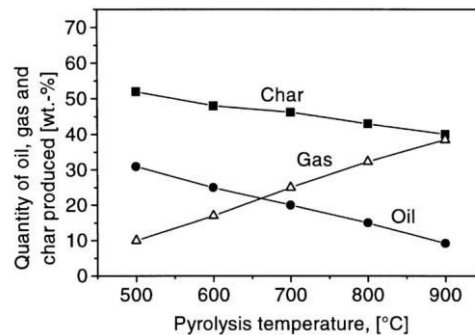


Abbildung 2.2-4: Pyrolyseprodukte abhängig von der Temperatur [4]

| Temperature, °C | 620 | 670 | 760 | 830 |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| Hydrogen, wt% | 2.5 | 2.59 | 3.2 | 4.62 |
| Carbon dioxide, wt% | 24.4 | 18.32 | 15.39 | 7.25 |
| Carbon monoxide, wt% | 28.63 | 34.62 | 43.43 | 66.17 |
| Hydrocarbons, wt% | 33.54 | 36.04 | 31.12 | 16.45 |

Tabelle 2.2-1: Hauptkomponenten im Pyrolysegas von thermisch getrocknetem Klärschlamm [4]

Auch die Gaszusammensetzung der Flüchtigen ist abhängig von der Pyrolysetemperatur (vgl. Tabelle 2.2-1). So steigt der Anteil von CO bei steigender Temperatur, während der Anteil von CO₂ und C_xH_y sinkt. Wichtig zu erwähnen ist, dass die brennbaren Bestandteile (CO, H₂, C_xH_y) 80 Gewichts-% des Pyrolysegases ausmachen können. Demnach wird der Großteil des Kohlenstoffes im Schlamm mit den Pyrolysegasen freigesetzt. Aber auch hier ist zu erwähnen, dass der Anteil des freigesetzten Kohlenstoffes durch die Pyrolysegase mit steigender Temperatur zunimmt. Bei üblichen Feuerungstemperaturen (>700°C) kann aber damit gerechnet werden, dass der Großteil des Kohlenstoffes über die Gase freigesetzt wird. [4]

Der Entgasungsprozess kann, je nach Aufbau der Brennkammer bzw. Beschaffenheit des Schlammes, gleichzeitig oder zeitlich getrennt vom Trocknungsprozess stattfinden. [9]

Verbrennung der flüchtigen Bestandteile

Ogada und Werther [10] beschreiben aufgrund des hohen Anteils an Flüchtigen die Brennstoffcharakteristik von Klärschlamm mit jener von gasförmigen Brennstoffen. In Anwesenheit von überschüssigem Sauerstoff reagieren die frei gewordenen Flüchtigen schnell zu CO, CO₂, H₂O, NO, NO₂, SO₂, SO₃. Ein schneller Verbrauch von O₂ kann somit als Indiz für die Verbrennung der Flüchtigen herangezogen werden. [9]

Ascheschmelze, Koksbrand und Ascheagglomeration

Ist die Temperatur hoch genug (ab ca. 900 °C) kann es zur Ascheschmelze kommen. Diese Schmelzaschen bedecken dann die Schlammteilchen. Der Ausbrand des restlichen Kohlenstoffes begünstigt die weitere Ascheschmelzung und fördert somit die Agglomeration von Schmelzaschepartikeln. Im Allgemeinen hat der Ausbrand des verbleibenden Kohlenstoffes aber keine große Bedeutung bei der Verbrennung von Klärschlamm. Der Grund dafür ist der geringe Anteil an festem Kohlenstoff, der nach der Entgasung zurückbleibt. [7, 9]

2.2.6 Verfahrenstechnische Aspekte bei der Verbrennung von Klärschlamm in der stationären Wirbelschicht

Die Kenntnisse über die oben genannten Charakteristiken bei der Verbrennung von Klärschlamm sind demnach auch bei der Feuerung in der stationären Wirbelschicht von großer Bedeutung. Auf wesentliche, daraus resultierende, verfahrenstechnische Aspekte soll im Folgenden eingegangen werden

2.2.6.1 Vorgelagerte Trocknung

Die Monoverbrennung von KS in einer Wirbelschicht ist abhängig von der Prozesskonfiguration (z.B. Verbrennungsluftvorwärmung) ab einem Heizwert von ca. 3500-4500kJ/kg möglich. Um diesen Heizwertbereich zu erreichen muss der bereits mechanisch entwässerte Schlamm in der Regel in einem vorgelagerten Trockner getrocknet werden. Die Trocknung erfolgt bei einer Feststofftemperatur von ca. 60 – 90 °C, sodass möglichst wenig organische Bestandteile abgebaut werden. [5, 8]

Die Veränderung der Konsistenz während der Trocknung ist eine sehr charakteristische Eigenschaft von Klärschlamm. Man kann den Trocknungsprozess in drei Phasen unterteilen. In der ersten Phase ist der bereits mechanisch entwässerte Schlamm noch sehr nass und dementsprechend fließfähig. Deswegen kann er sehr gut gehandhabt und verarbeitet werden. In der zweiten Phase durchläuft er eine sehr zähe Phase (Leimphase), in der er nicht frei fließt. In dieser Phase ist er aufgrund der starken Klebeigenschaft sehr schwer handzuhaben. Anbackungen und Klumpenbildung können die Folge sein. In der letzten Phase wird der Schlamm Granulat-ähnlich und durchmischt sich gut. [4]

Um die Probleme bei der Handhabung während der Leimphase zu umgehen haben sich zwei Trocknungsprinzipien entwickelt. Zum einen handelt es sich dabei um die sogenannte Volltrocknung, zum anderen um die Teiltrocknung. Bei der Volltrocknung werden dem entwässerten Klärschlamm bereits getrocknete Schlammteilchen (90% TS) beigemischt. Die Beimischung erfolgt in einem Ausmaß, sodass sich ein Gesamtanteil an TS einstellt, der

einem Zustand nach der zähen Phase entspricht (60-65% TS). Bei der Teiltrocknung wird der Schlamm soweit getrocknet, dass man die Leimphase nicht erreicht. [4]

Aus technischer Sicht werden für den Trocknungsprozess die drei Mechanismen der Wärmeübertragung genutzt. Diese Mechanismen sind die Konvektion (direkte Trocknung), die Wärmeleitung (indirekte Trocknung) und die Wärmestrahlung (Infrarot-Trocknung). [8]

- Bei der direkten Trocknung kommt der Schlamm in Kontakt mit dem zur Trocknung verwendeten heißen Gas. Das heiße Gas nimmt die verdampfte Flüssigkeit auf und transportiert diese ab. [8]
- Bei der indirekten Trocknung kommt der Schlamm in Kontakt mit einer heißen Oberfläche, welche das Heizmedium vom Schlamm trennt. Die verdampfte Flüssigkeit wird unabhängig vom Heizmedium abtransportiert. [8]
- Bei der Infrarot- oder Strahlungstrocknung erfolgt die Trocknung mittels elektrischer Elemente wie Infrarot-Lampen oder durch beheizte Strahlungsflächen. [8]

2.2.6.2 Einfluss der flüchtigen Bestandteile

Der hohe Gehalt an Flüchtigen hat, wie bereits im Abschnitt zuvor erwähnt, einen großen Einfluss auf die Verbrennung von Klärschlamm. Für die Auslegung einer SWSF für Klärschlamm ist es somit wichtig Kenntnis darüber zu haben wo bzw. wann sich die Flüchtigen bilden bzw. wo und wann sie verbrennen.

Werther und Ogada [4] verweisen dafür in ihrem Artikel auf den Einfluss der Durchmischungszeit der Partikel im Bett. Durchmischen sich die Schlammpartikel entsprechend schneller als der Prozess der Trocknung und Entgasung dauert, so kann eine gute Verbrennung der Flüchtigen im Bett stattfinden. Dabei spielen die Fluidisierungsgeschwindigkeit und die Größe der Schlammpartikel eine bedeutende Rolle. Ab einer gewissen Größe dauern die Trocknung und Entgasung der Partikel lange genug, um eine ausreichende Durchmischung und somit gute Verbrennung im Bett zu realisieren. Die Autoren nennen dazu in ihrem Artikel bestehende Anlagen, in welchen dieses Verhalten beobachtet wurde. Hartman et al. [11] konnten in einem experimentellen Aufbau unter stöchiometrischen Verhältnissen ebenfalls eine vollständige Verbrennung der Flüchtigen im Bett nachweisen.

In Abschnitt 2.1.1 wurde bereits auf das Phänomen verwiesen, dass die Flüchtigen bei der Feuerung von Biomasse größtenteils im Freeboard verbrennen. Auch Werther und Ogada [4] verweisen darauf, dass dieses Phänomen in zahlreichen Klärschlamm-gefeuerten Anlagen beobachtet wurde. Als Indiz dafür wird die zumeist deutlich erhöhte Freeboard-Temperatur gegenüber dem Wirbelbett genannt. Die Recherchen von Werther und Ogada [4] verweisen auf bestimmte Ursachen, welche für dieses Phänomen verantwortlich sein könnten. Eine

davon ist, dass die Flüchtigen, die im Bett frei werden, Blasen bilden. Bei hohen Fluidisierungsgeschwindigkeiten werden diese Blasen so schnell an die Bettoberfläche befördert, dass sie im Bett keine Zeit zum Reagieren haben. Als weiterer Grund wird genannt, dass Quenching-Effekte durch das Bettmaterial die Verbrennung im Bett behindern könnten. Des Weiteren wird partielle Segregation von Schlammteilchen im Wirbelbett als möglicher Grund genannt. Diese kann laut den Autoren bei niedrigeren Fluidisierungsgeschwindigkeiten auftreten. [4]

Im Allgemeinen verweisen Hartman, Svoboda et al. [11] auf die Notwendigkeit von einer möglichst gleichmäßigen Brennstoffzufuhr bei Brennstoffen mit einem hohen Anteil an Flüchtigen. Unregelmäßigkeiten bei der Brennstoffzufuhr können demnach zu unerwünschten Emissionen von CO oder flüchtigen organischen Verbindungen sorgen.

2.2.6.3 Luftstufung

Die Verbrennungscharakteristiken von Klärschlämmen bzw. Biomassen erfordern besondere Beachtung bezüglich des Ortes und der Menge der Luftzufuhr. So hat sich u.a. die Zufuhr der Luft in mehreren Stufen etabliert. Ein Grund für die Anwendung von Luftstufung kann die Emissionsminderung sein. Sie kann aber auch der Kontrolle von Bett- bzw. Freeboardtemperatur oder der vollständigen Verbrennung der Flüchtigen dienen. [3, 4]

Die Einhaltung entsprechender Temperaturen kann als Primärmaßnahme gegen die NO_x -Bildung dienen. Lokale Temperaturmaxima sind Voraussetzung für die Bildung von thermischem NO_x . NO_x -Bildung aus Brennstoffstickstoff kann durch Sauerstoffmangel vermindert werden. Dieser Sauerstoffmangel und in Folge dessen eine Vermeidung von zu hohen Temperaturen kann beispielsweise durch unterstöchiometrische Zugabe ($\lambda < 1$) von Primärluft erfolgen. [4, 12]

Die Zugabe von Sekundärluft oder sogar Tertiärluft im Freeboard kann für die vollständige Verbrennung der im Bett freigewordenen Flüchtigen sorgen und zur Emissionsminderung beitragen. Des Weiteren kann die Luftstufung dazu beitragen die gesamte Verbrennungsluftmenge zu reduzieren. Dies wiederum resultiert in einer Effizienzsteigerung, da weniger Verbrennungsluft vorgewärmt werden muss. Bei der Sekundärluftzufuhr ist auf eine gute Durchmischung der brennbaren Gase mit der Luft zu achten. Ein zu beachtender Aspekt bei der Sekundärluftregelung ist, dass die Temperaturen im Freeboard unter der Ascheschmelztemperatur bleiben (ca. 900°C). Der Aschegehalt von Klärschlamm ist sehr hoch (vgl. Abschnitt 2.2.5.1) und in SWSF wird der Großteil der Asche mit dem Rauchgas ausgetragen. Somit bergen Schmelzaschen eine große Gefahr für die Verunreinigung von Heizflächen. [3, 4, 10, 13]

Laut Experimenten von Han, Niu et al. [14] steigt die Notwendigkeit der Applikation von Sekundärluft mit steigendem Wassergehalt im Klärschlamm. Sie begründen diese

Schlussfolgerung folgendermaßen: Eine Maßnahme, um eine gewünschte Betttemperatur auch bei hohem Wassergehalt des Schlammes zu gewährleisten, ist die Steigerung der Rate der Brennstoffzufuhr. Diese Steigerung würde auch eine Steigerung der Luftzufuhr erfordern. Würde man aber lediglich die Fluidisierungs- bzw. Primärluft steigern, könnte das wiederum zu einer unerwünschten Kühlung des Bettes und somit zu einer schlechteren Verbrennung im Bett führen.

2.2.6.1 Rauchgasrezirkulation

Rauchgasrezirkulation gilt u.a. als probates Mittel für die NO_x -Reduktion. Ob sie auch bei der Verbrennung von Klärschlamm in stationären WSF Einfluss auf die NO_x -Emissionen hat, hängt davon ab in welchem Zustand der Klärschlamm vorliegt. Sänger, Werther et al. [15] analysierten den Einfluss von Rauchgasrezirkulation bei der Verbrennung von teilgetrocknetem Klärschlamm in einem stationären Wirbelschichtofen und kamen dabei zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Im Fall gestufter Verbrennung lassen sich gute Ergebnisse hinsichtlich NO_x -Reduktion erzielen
- Im Fall der Verbrennung unter lediglich einer Luftstufe fällt die NO_x -Reduktion sehr gering aus; der NH_3 -Gehalt lässt sich jedoch deutlicher reduzieren.
- Der Anteil an rezirkuliertem Rauchgas sollte 10-15% nicht überschreiten, um die Verbrennung nicht zu stören bzw. die CO-Emissionen nicht zu erhöhen.

Neben diesen Aspekten kann die Rauchgasrezirkulation auch dazu beitragen im Teillastbetrieb die gewünschten Fluidisierungscharakteristiken des Bettes aufrecht zu erhalten. Außerdem kann sie als Regelungsmanahme genutzt werden um gewünschte Temperaturbereiche, beispielsweise im Bett, einzuhalten. [3, 15]

2.2.6.1 Emissionen

NO_x -, N_2O -Emissionen

Durch den meist hohen Stickstoffanteil im Brennstoff entstehen bei der Feuerung von Klärschlamm hohe Emissionen von NO_x bzw. N_2O . Dabei variiert die Konzentration von NO_x und N_2O abhängig von der Beschaffenheit des Klärschlammes. So sind die NO_x - bzw. N_2O -Emissionen von trockenem Schlamm (>80 Gew.-% TS) relativ hoch; vergleichbar mit jenen von Kohle. Bei nassem Schlamm (20-40 Gew.-% TS) fallen die NO_x -Emissionen wiederum verhältnismäßig gering aus. Auch teilgetrockneter Schlamm (30-55 Gew.-% TS) weist ähnlich geringe NO_x -Emissionen auf wie nasser Schlamm. [15]

Basierend auf zahlreichen Studien erwähnen Ogada und Werther [4] in ihrem Artikel einige Einflüsse auf die NO_x - bzw. N_2O -Emissionen. So wird von den Autoren der Einfluss von Luftüberschuss bzw. Verbrennungstemperatur genannt. Eine Erhöhung dieser beiden Parameter führt demnach bei der Feuerung von trockenem Schlamm-Granulat zu einer Erhöhung der Emissionen. Eine Verringerung dieser Emissionen kann laut den Autoren durch gestufte Verbrennung und selektive nicht-katalytische Reduktion (SCNR) als auch eine höhere Freeboardtemperatur erreicht werden. Abbildung 2.2-5 zeigt den Einfluss von gestufter Verbrennung auf die NO_x und N_2O -Emissionen.

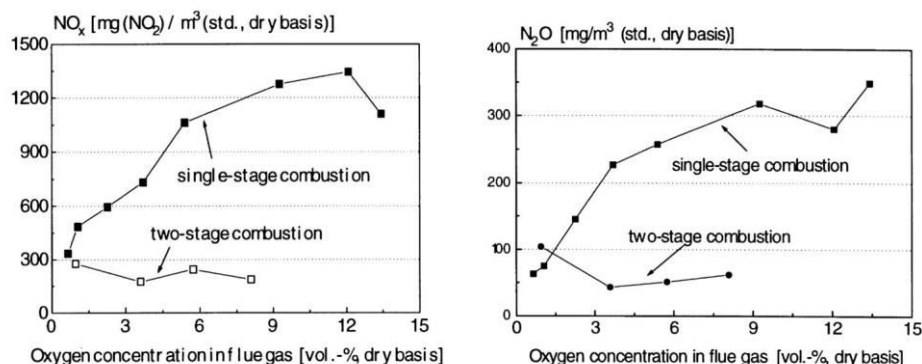


Abbildung 2.2-5: Einfluss gestufter Verbrennung auf NO_x - und N_2O -Emissionen von trockenem Klärschlammgranulat [4]

Anders verhält sich die Situation bei der Verbrennung von nassem, unbehandeltem Schlamm. Dabei reduzieren sich die NO_x -Emissionen bei steigendem Luftüberschuss (vgl. Abbildung 2.2-6). Außerdem hat eine erhöhte Feuerungstemperatur keinen signifikanten Einfluss auf die NO_x -Emissionen. Des Weiteren zeigen gestufte Verbrennung und SCNR keine Reduktion von NO_x . Eine entsprechende Behandlung des nassen Schlammes vor der Verbrennung kann diese Charakteristiken jedoch ändern. Die Autoren nennen in Ihrem Artikel Beispiele, in welchen durch Kalkstein stabilisierter bzw. thermisch konditionierter Schlamm in Wirbelschichten verbrannt wurde. Dabei konnte einer Erhöhung der NO_x -Emissionen bei steigendem Luftüberschuss festgestellt werden. Außerdem konnte mittels gestufter Verbrennung eine Reduktion von NO_x erreicht werden. [4]

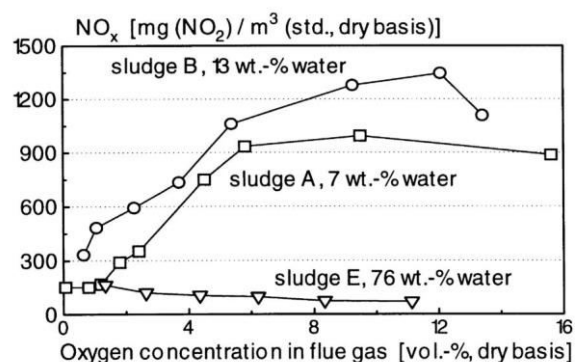
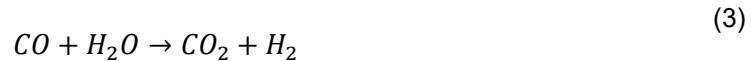


Abbildung 2.2-6: Einfluss des Luftüberschusses auf die NO_x -Emissionen von trockenem und nassem, unbehandeltem Klärschlamm [4]

CO-Emissionen

Bei einer experimentellen stationären Wirbelschichtfeuerung stellten Han, Niu et al. [14] fest, dass die CO-Emissionen mit dem Wassergehalt steigen. Laut den Autoren können auf Grund hoher Wassergehalte folgende Vergasungsreaktionen stattfinden:



Bei Gleichung (3) handelt es sich um die homogene, s.g. Wassergas-Shift-Reaktion. Bei Gleichung (4) handelt es sich um eine heterogene Wassergas-Reaktion. Letztere würde demnach für erhöhte CO-Emissionen sorgen. Der festgestellte Zusammenhang zwischen Wassergehalt und CO-Emissionen ist in Abbildung 2.2-7 dargestellt.

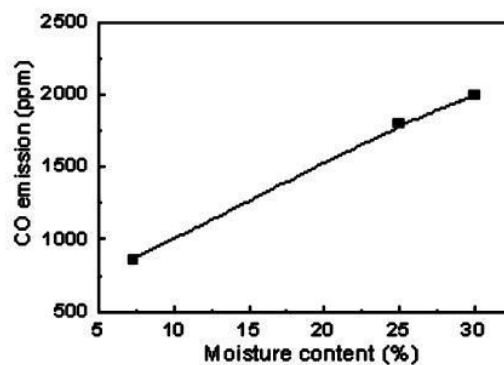


Abbildung 2.2-7: Einfluss des Wassergehaltes auf die CO-Emissionen [14]

Hartmann, Svoboda et al. [11] untersuchten bei einem experimentellen Aufbau einer stationären Wirbelschichtfeuerung den Einfluss der Freeboardtemperatur auf die CO-Emissionen von trockenem Klärschlamm (97-98 Gew.-% TS). Dabei kamen sie zu der Schlussfolgerung, dass eine Erhöhung der Freeboardtemperatur die CO-Emissionen senken kann. Dieser Zusammenhang zwischen der Freeboardtemperatur und den CO-Emissionen ist in Abbildung 2.2-8 dargestellt.

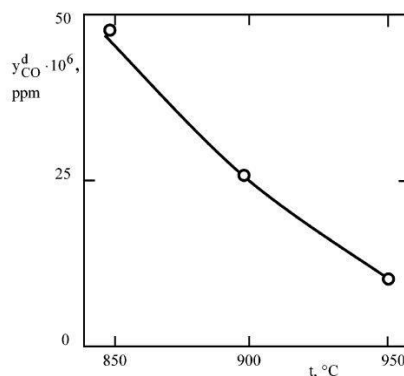


Abbildung 2.2-8: Einfluss der Freeboard-Temperatur auf die CO-Emissionen [11]

3 Modellierung

3.1 Beschreibung der verwendeten Software

Zur Modellierung wurden das Programm *IPSEpro* der *SimTech GmbH* als auch das Programm *PPSD* der *KED GmbH* verwendet. Grundlegende Eigenschaften der Programme sollen in diesem Abschnitt beschrieben werden.

3.1.1 IPSEpro [16, 17]

IPSEpro ist ein Softwaresystem zur Simulation von verfahrenstechnischen Prozessen. Es ermöglicht die grafische Darstellung eines Prozesses auf Basis mathematischer Gleichungen. Um ein Modell eines Prozesses zu erschaffen werden in *IPSEpro* standardisierte oder selbst erstellte Komponenten in einem Flussschema miteinander verbunden. Dabei wird die Funktion jeder Komponente durch mathematische Gleichungen beschrieben. Bei diesen Gleichungen handelt es sich hauptsächlich um Massen- und Energiebilanzen. *IPSEpro* vereint diese Gleichungen zu einem einzigen Gleichungssystem und löst dieses.

IPSEpro ist für die Berechnung von Energie- und Massenbilanzen stark vernetzter Anlagen geeignet. Aufgrund einer Vielzahl von Komponenten aus unterschiedlichen Modell-Libraries (vgl. 3.1.1.3) lässt sich *IPSEpro* in einem breiten Bereich der Energie- und Verfahrenstechnik anwenden. Durch die Vielzahl an Komponenten und die Möglichkeit selbst Komponenten zu modellieren (vgl. 3.1.1.2) lässt sich *IPSEpro* sehr flexibel und individuell einsetzen.

3.1.1.1 Struktur

IPSEpro ist aus Modulen aufgebaut (vgl. Abbildung 3.1-1). Für die vorliegende Aufgabenstellung wurden im Wesentlichen zwei der Hauptmodule benötigt. Bei diesen handelt es sich um *IPSEpro*'s Process Simulation Environment (PSE) und Model Development Kit (MDK).

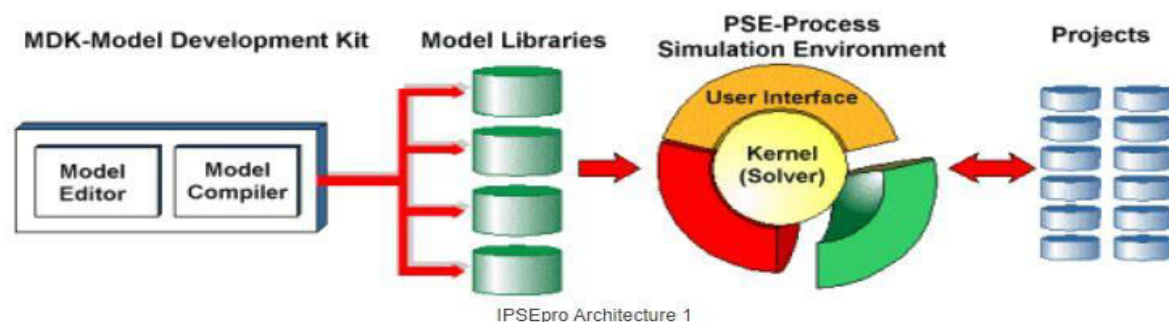


Abbildung 3.1-1: Struktur der *IPSEpro*-Module [16]

3.1.1.2 MDK

Mittels MDK kann der Benutzer neue Komponentenmodelle erschaffen bzw. bestehende manipulieren. Im MDK kann das Verhalten bzw. die Funktion der jeweiligen Modelle mathematisch beschrieben werden. Außerdem kann zur grafischen Darstellung ein Icon für die Modelle designt werden. Die mathematische Beschreibung erfolgt in MDK mittels einer von *IPSEpro* bereitgestellten Modellbeschreibungssprache. Ein Compiler „übersetzt“ die Modellbeschreibung in ein binäres Format, um später in PSE eine genaue und schnelle Lösung zu garantieren.

3.1.1.3 Model Libraries

Die Bibliotheken (Model Libraries) beinhalten alle notwendigen Informationen über die Komponenten, welche für den zu modellierenden Prozess notwendig sind. Neben fertigen *Ready-to-use-Libraries* kann man über das MDK seine eigene Library erschaffen oder bestehende Libraries anpassen.

Ready-to-use-Bibliotheken sind beispielsweise die *Advanced Power Plant (APP)* Library, welche zur Modellierung von thermischen Kraftwerksprozessen dient, oder die *Pyrolysis and Gasification Process (PGP)* Library. Diese wurde in erster Linie zur Modellierung von Biomasse-Vergasungsprozessen erstellt.

3.1.1.4 PSE

PSE ist *IPSEpro's* Simulationsumgebung, in welcher die Prozesse modelliert werden. In PSE werden die benötigten Komponenten aus der jeweiligen Bibliothek im Flussschema miteinander verbunden. Prozessdaten können direkt im Flussschema eingegeben werden. Außerdem werden die Simulationsergebnisse ebenfalls im Flussschema angezeigt.

Zur Lösung des entstehenden Gleichungssystems nutzt PSE einen 2-phasigen, gleichungsorientierten Ansatz. In der Analysephase überprüft PSE ob Fehler in der Prozesskonfiguration bzw. -spezifikation vorliegen. Falls kein Fehler vorliegt wird die optimale Lösungsmethode bestimmt. In der anschließenden Lösungsphase wird das Gleichungssystem mit der zuvor festgelegten numerischen Lösungsmethode gelöst.

3.1.2 PPSD [18]

PPSD ist die Abkürzung für *Power Plant Simulator & Designer*. Wie der Name verrät, ist *PPSD* eine spezifische Software zur Modellierung und Simulation von Kraftwerken.

In der grafischen Benutzeroberfläche von *PPSD* lassen sich spezifische, vordefinierte Komponenten und Elemente eines Dampfkraftwerkes miteinander verbinden und so ein Kraftwerksprozess modellieren. Die Verbindungen zwischen den Elementen können dabei unterschiedliche Funktionen haben. Zum einen können sie Stoffströme darstellen. Solche

Stoffströme sind typischerweise Fluide wie Wasser, Gase oder andere Arbeitsfluide. Außerdem können die Verbindungen auch konstruktive, mechanische Verbindungen darstellen. Zum anderen können die Verbindungen dem Übertragen von Signalen dienen. So verfügt *PPSD* über eine Vielzahl an Regelementen, welche aufgrund vom Benutzer festgelegter Werte eine Regelung von bestimmten Parametern übernehmen können.

Die Funktion der unterschiedlichen Komponenten beruht auf hinterlegten Gleichungen zu der jeweiligen Funktion der Komponente. Diese Gleichungen beschreiben thermodynamische bzw. strömungstechnische Phänomene abhängig von Stoff- oder Geometriedaten.

PPSD greift auf eine umfangreiche Stoffdatenbank zurück. In dieser sind beispielsweise die Stoffdaten verschiedenster Brennstoffe oder Werkstoffe hinterlegt. Wasserseitig greift *PPSD* beispielsweise auf eine Wasser-Dampf-Tafel zurück.

Die Berechnung in *PPSD* erfolgt iterativ. Sie kann statisch oder auch dynamisch erfolgen. Die statische Berechnung ist beispielsweise bei der Auslegung nützlich. Die dynamische Berechnung kann für instationäre Prozesse verwendet werden. Solche Prozesse sind z.B. Anfahrvorgänge oder Lastwechsel. *PPSD* erlaubt eine sehr spezifische Berechnung von Druckverlusten im Fall von Natur- oder Zwangumlauf.

Ein wesentlicher Unterschied von *PPSD* - verglichen mit *IPSEpro* – liegt, neben der Spezifikation auf Dampferzeuger, im erforderlichen Kenntnisgrad über die zu modellierende Anlage. So sind etwa für die Funktion eines Wärmetauschers genaue Daten über die Geometrie und auch den verwendeten Werkstoff anzugeben. Somit erlaubt *PPSD* eine sehr detaillierte Auslegungsrechnung eines Dampferzeugers samt dessen Wärmeübertragungssystemen. Dieser Detaillierungsgrad macht *PPSD* weniger flexibel.

3.2 *IPSEpro* Modell

3.2.1 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung in *IPSEpro* umfasste die Modellierung und Simulation eines Gesamtprozesses zur thermischen Auslegung einer Klärschlammverwertungsanlage. Dieser Gesamtprozess sollte folgende Teilprozesse umfassen:

- Trocknung von mechanisch entwässertem Klärschlamm
- Verbrennung des getrockneten Klärschlammes inkl. Abwärmenutzung
- Dampfkraftprozess samt Abwärmenutzung des in der Dampfturbine entspannten Dampfes

Der Richtigkeit halber ist zu erwähnen, dass die Rauchgasreinigung vom Gesamtprozess ausgenommen ist. Diese soll - laut *EVN* - in Zukunft in das Modell integriert werden.

Ein *IPSEpro* Modell hat für die *EVN* den Vorteil, dass man bei Parameteränderungen eines Teilprozesses auch unmittelbar Kenntnis über die Auswirkungen auf den Gesamtprozess erhält. So lassen sich beispielsweise relativ schnell Abwärmepotentiale einzelner Teilprozesse erkennen und deren Nutzungsmöglichkeiten eruieren. Diese Eigenschaft stellt bei der Auslegung von Gesamtanlagen eine erhebliche Erleichterung dar. Des Weiteren lassen sich mit Hilfe solcher Modelle Randbedingungen erkennen, welche im Laufe eines Planungsprozesses für die detaillierte Auslegungsrechnung von Teilprozessen notwendig sind.

Im *IPSEpro*-Modell war die mögliche thermische Integration der Teilprozesse, wie z.B. des Trocknungsprozesses, ein wesentlicher und auch geforderter Aspekt. Ein weiteres Hauptaugenmerk seitens *EVN* war eine plausible Modellierung der gestuften stationären Wirbelschichtfeuerung. Auf die Vorgehensweise der Modellierung und die damit einhergehenden Problematiken wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

3.2.2 Modellbildung in *IPSEpro*

Wie bereits eingangs erwähnt, wurde in *IPSEpro* ein Gesamtprozess zur thermischen Klärschlammverwertung modelliert. Abbildung 3.2-6, S. 36, zeigt den Gesamtprozess in *IPSEpro*. Für eine vergrößerte Darstellung wird auf den Anhang verwiesen (vgl. Anhang, sonstige Anhänge D).

Da *IPSEpro* zur Lösung der erstellten Gleichungssysteme auf eine gewisse Anzahl an bekannten Größen angewiesen ist, wurden gewisse Randbedingungen laut *EVN* vorgegeben. Dabei handelte es sich beispielsweise um die Brennstoffeigenschaften des

getrockneten Klärschlammes, die Umgebungsluftbedingungen, gewisse Rauchgastemperaturen entlang des Rauchgasweges oder die Frischdampfparameter.

Für die Modellierung wurde eine von *EVN* in MDK erweiterte PGP-Library verwendet (vgl. Abschnitt 3.1.1.3). Diese wurde im Wesentlichen um Elemente aus der APP-Library erweitert. Dabei handelte es sich Großteils um Elemente auf Seiten des Wasser- bzw. Dampfkreislaufes.

Nachfolgend soll auf die Modellierung der einzelnen Teilprozesse eingegangen werden.

3.2.2.1 Modellierung der Trocknung

Der der Verbrennung vorgelagerte Trocknungsprozess wurde für zwei Trocknungsprinzipien modelliert. Die Trocknung kann dabei entweder als Voll- oder als Teiltrocknung erfolgen (vgl. Abschnitt 2.2.6.1). Abbildung 3.2-1 zeigt eine Abbildung des Trockners im *IPSEpro*-Modell. Im Fall der Teiltrocknung wird der gesamte Klärschlammstrom durch den Trockner geschickt und auf einen TS-Gehalt getrocknet, welcher für eine selbstgängige Verbrennung im Wirbelschichtofen notwendig ist. Im Fall der Volltrocknung wird nur ein Teilstrom durch den Trockner geschickt, welcher auf einen sehr hohen TS-Gehalt (90 Gew.-%) getrocknet wird. Der restliche, mechanisch entwässerte Klärschlammstrom umläuft den Trockner und wird danach mit dem vollgetrockneten Teilstrom vermischt. Die Aufteilung der Massenströme erfolgt in einem Ausmaß, dass sich nach der Vermischung wieder der gewünschte Gesamt-TS-gehalt ergibt. Die Trocknung erfolgt indirekt über die Wärme eines Dampfstromes des Gesamtprozesses. Das verdampfte Wasser verlässt den Trockner über einen Gasstrom. Die Brennstoffzusammensetzung wurde gemäß *EVN*-Daten eingestellt.

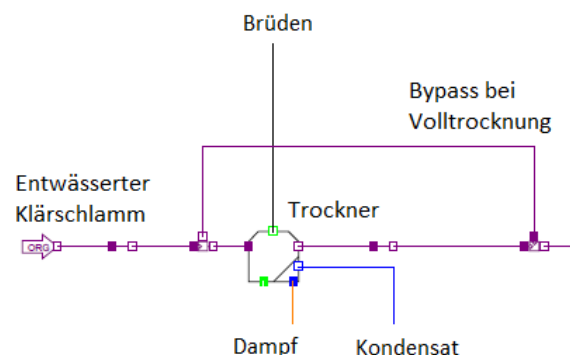


Abbildung 3.2-1: Klärschlamm-trocknung im *IPSEpro*-Modell

3.2.2.2 Modellierung und Simulation der stationären Wirbelschichtfeuerung

Ein wichtiger Aspekt war die Modellierung der gestuften Verbrennung. Für die *EVN* war es interessant ein analytisch möglichst realitätsnahes Modell des Wirbelbettes samt Nachbrennkammer mit gestufter Verbrennungsluftzuführung zu erhalten.

In *IPSEpro* wurden zwei Brennkammer-Modelle separat modelliert und die Ergebnisse verglichen. In einem Modell wurde eine unterstöchiometrische Verbrennung im Wirbelbett mit einem in *IPSEpro* enthaltenem Brennkammerelement (BKE) dargestellt. Im zweiten Modell wurde sie durch ein Vergaserelement (VGE) beschrieben. In beiden Modellen wurde zur Modellierung der Nachbrennkammer ein Brennkammerelement für gasförmige Brennstoffe verwendet. Durch den Vergleich sollte evaluiert werden, welches Modell den Prozess plausibler darstellt. Der Vergleich dieser beiden Brennkammermodelle wird nachfolgend behandelt.

Vergleich der Brennkammer-Modelle

Wie bereits erwähnt unterscheiden sich die verglichenen Modelle im verwendeten Elementmodell zur Modellierung des Wirbelbettes. Ansonsten deckt sich die Struktur mit der des restlichen Prozesses.

Um einen aussagekräftigen Vergleich zu erhalten wurden in beiden Modellen Randbedingungen gleichgesetzt. So sind in beiden Modellen Umgebungsbedingungen, Brennstoffzusammensetzung, Luft- und Brennstofftemperaturen die gleichen. Auch die Wirkungsgrade der Verdichter wurden abgeglichen. Für den Austritt aus der Nachbrennkammer wurde in beiden Modellen derselbe O₂-Gehalt festgelegt. Es ist zu erwähnen, dass diese gewählten Randbedingungen noch nicht den Randbedingungen aus dem Gesamtprozess entsprachen.

Sowohl im VGE als auch im BKE des jeweiligen Modells wurden- wo möglich - exakt die gleichen Einstellungen getroffen. So wurde in beiden Elementen dieselbe Luftüberschusszahl gewählt. Außerdem wurde die gleiche Brennstoffwärmeleistung festgelegt. Relative Wärmeverluste wurden ebenfalls in beiden Elementen gleich gewählt. Außerdem wurde im Modell mit VGE der Anteil der Kohlenwasserstoffe im Rauchgas nach dem Wirbelbett auf quasi Null gesetzt. Diese Einstellung soll einerseits die rasche Reaktion der Kohlenwasserstoffe bei der Klärschlammverbrennung darstellen. Andererseits soll sie den Vergleich zum BKE erleichtern, in welchem gemäß der Verbrennungsrechnung keine Kohlenwasserstoffe im Abgas berücksichtigt werden.

Abbildung 3.2-2 auf der nächsten Seite zeigt das Modell der gestuften Wirbelschichtfeuerung in *IPSEpro*, in welchem der unterstöchiometrische Verbrennungsprozess im Wirbelbett mit einem von *IPSEpro* definierten Brennkammerelement modelliert wurde. Abbildung 3.2-3 zeigt das Modell, in dem die Verbrennung im Wirbelbett durch ein Vergaserelement dargestellt ist. Im Vergaserelement werden durch Hinterlegung entsprechender Gleichung homogene Vergasungsreaktionen berücksichtigt.

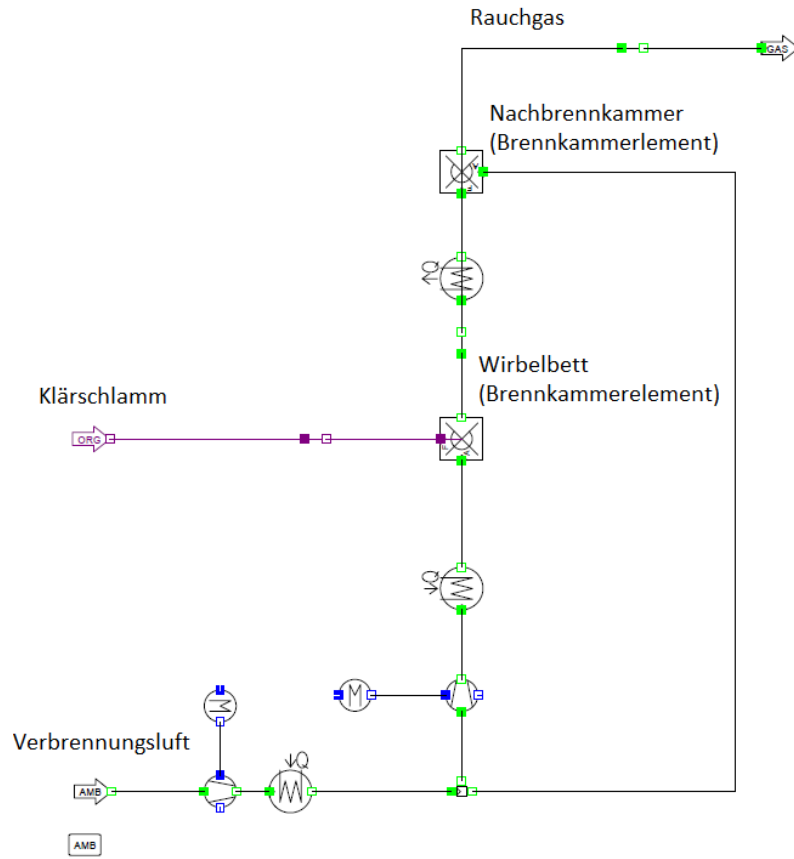


Abbildung 3.2-2: Brennkammermodell mit Brennkammererelement zur Simulation des Wirbelbettes

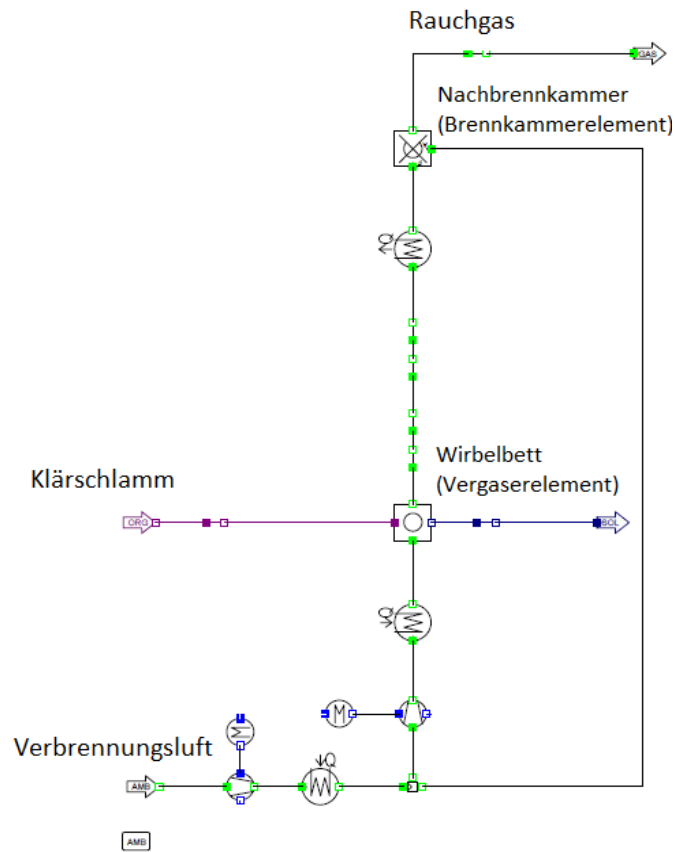


Abbildung 3.2-3: Brennkammermodell mit Vergaserelement zur Simulation des Wirbelbettes

Das Interesse lag beim Vergleich der Simulationsergebnisse in der Rauchgaszusammensetzung bzw. Rauchgastemperatur nach dem Wirbelbett. Tabelle 3.2-1 zeigt die Resultate dieser Parameter für beide Modelle, welche nachfolgend diskutiert werden.

| Parameter | | Einheit | Brennkammermodell | Vergasermodell |
|-------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|----------------|
| Primärlufttemperatur | | [°C] | 200 | 200 |
| Luftzahl Wirbelbett | | - | 0.8 | 0.8 |
| RG-Temperatur | | [°C] | 762.4 | 825.4 |
| RG-Zusammensetzung | Ar | [vol%] | 0.45 | 0.45 |
| | CO | [vol%] | 5.29 | 0.60 |
| | CO ₂ | [vol%] | 6.16 | 10.26 |
| | H ₂ | [vol%] | 0.00 | 2.65 |
| | H ₂ O | [vol%] | 48.13 | 45.63 |
| | HCl | [vol%] | 0.02 | 0.02 |
| | N ₂ | [vol%] | 39.79 | 40.21 |
| | SO ₂ | [vol%] | 0.18 | 0.00 |
| Heizwert H _u | | [MJ/Nm ³] | 0.67 | 0.40 |

Tabelle 3.2-1: Luft und Rauchgasparameter für das Wirbelbett für beide Brennkammermodelle

Interpretation der Ergebnisse

Betrachtet man die Ergebnisse aus Tabelle 3.2-1 fallen bei bestimmten Werten signifikante Unterschiede zwischen den beiden Modellen auf. Bei diesen Unterschieden handelt es sich um die Werte von Rauchgastemperaturen und die Werte der Volumenanteile von CO, CO₂ und H₂. Es ist zu erwähnen, dass sich bei beiden Modellen die Rauchgasmassenströme decken.

Betrachtet man die Rauchgaszusammensetzungen, lassen sich die Unterschiede folgendermaßen erklären. Dem Brennkammerelement liegen lediglich die Gleichungen für die Realisierung der Verbrennungsrechnung zugrunde. Im Wirbelbett sind unterstöchiometrische Bedingungen gefordert. Deswegen wurde dort eine Luftüberschusszahl $\lambda < 1$ vorgegeben. Reicht nun, aufgrund der Vorgabe, der Sauerstoff für den vollständigen Verbrennungsprozess nicht aus, kommt es zu einer unvollständigen Verbrennung. Die Folge ist die Bildung von Kohlenmonoxid, weil nicht genug Sauerstoff vorhanden ist damit der gesamte Kohlenstoff zu Kohlendioxid oxidieren kann.

Der erhöhte CO₂- bzw. H₂-Gehalt lässt sich durch die Berücksichtigung der Wassergas-Shift-Reaktion erklären (vgl. Gleichung (3), S.22), welche durch den gebildeten Wasserdampf begünstigt wird.

Die erhöhte Temperatur im Vergasermodell scheint auch aufgrund dieser Reaktion plausibel. Die Reaktion ist exotherm, d.h. Wärme wird frei. Ein weiterer Grund für die erhöhte Temperatur sind die Koks- und Teer-Gehalte im Rauchgas nach dem

Vergaserelement. Diese deuten auf nicht bzw. nicht vollständig ablaufende heterogene, endotherme Vergasungsreaktionen hin (vgl. z.B. Gleichung (4), S. 22). Da die Energie für die endotherme Reaktion nicht benötigt wird bleibt sie in Form von fühlbarer Wärme im Rauchgas, was auf die erhöhte Temperatur schließen lässt. Es ist zu erwähnen, dass in *IPSEpro* im BKE keine Koks- bzw. Teer-Gehalte berücksichtigt werden.

Die oben diskutierten Ergebnisse des Brennkammermodells mit VGE scheinen plausibel. Die erwähnten Reaktionen werden auch in der Literatur zur SWSF erwähnt (vgl. Abschnitt 2.2.6.1). Aus diesen Gründen wurde entschieden, dass zur Modellierung der Wirbelschichtfeuerung das Brennkammermodell mit Vergaserelement verwendet werden sollte.

3.2.2.3 Modellierung des Dampfkessels und Integration des Brennkammermodells

Für die Modellierung der Wirbelschichtfeuerung wurde also das VergasermodeLL gewählt. Vorgabeparameter waren der O_2 -Gehalt nach der Nachbrennkammer, als auch die Rauchgastemperatur nach dem Wirbelbett. Für die Berücksichtigung der Rauchgasrezirkulation wurde ein externer Gaseintritt verwendet. Die Zusammensetzung dieses Rezirkulationsgases wurde - mittels einer sogenannten Free-Equation - der Zusammensetzung des Rauchgases nach dem Economiser gleichgesetzt. Ergänzend dazu wurde beispielhaft eine vereinfachte Rauchgasreinigung realisiert, indem der SO_2 -Gehalt des Rezirkulationsgases manuell auf null gesetzt wurde. Die Konfiguration dieser Rauchgasrezirkulation wurde im Nachhinein der Konfiguration des später erläuterten *PPSD*-Modells (vgl. Abschnitt 3.3) nachempfunden.

Der Verdampferprozess wurde im Nachhinein ebenfalls prinzipiell nach der Konfiguration des *PPSD*-Modells modelliert, welches später erläutert wird (vgl. Abschnitt 3.3). D.h. Heizflächen bzw. Wärmetauscher wurden in ähnlicher Reihenfolge entlang des Rauchgasweges geschaltet. Als Frischdampfparameter wurden jene des *PPSD*-Modells für den Vollastfall vorgegeben. Auch die Temperaturen von Verbrennungsluft und Rezirkulationsgas wurden vom *PPSD*-Modell übernommen und vorgegeben.

Abbildung 3.2-4 zeigt die modellierte Feuerung als auch den Dampferzeuger-Prozess im *IPSEpro*-Modell. Die schwarzen Linien kennzeichnen dabei das Rauchgas, Blau das Wasser im Verdampfer-System, Orange den überhitzten Dampf, Türkis die Luft, Gelb das Luft-Rezirkulationsgas-Gemisch und Dunkelblau die Asche.

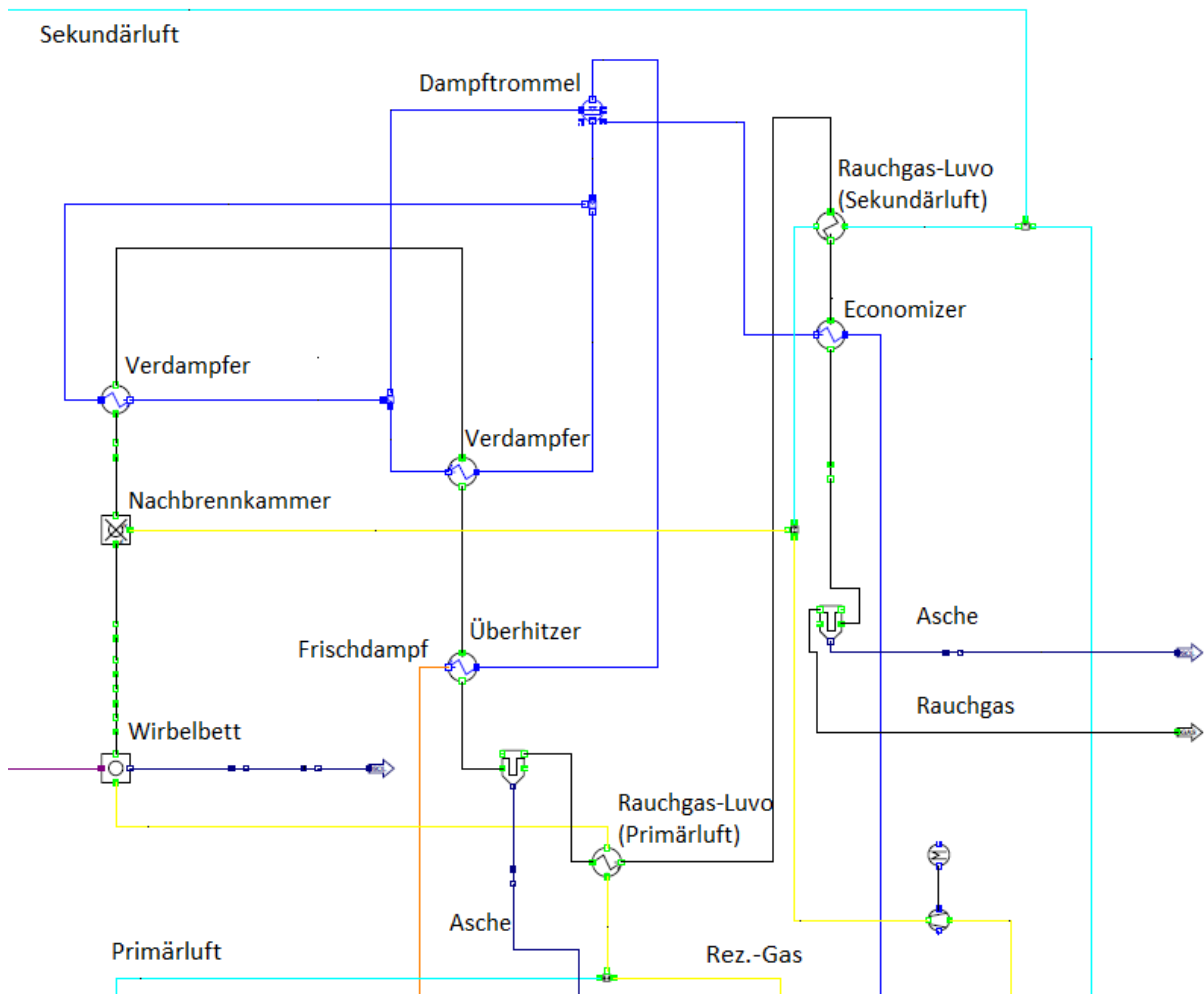


Abbildung 3.2-4: Darstellung des Dampferzeugers samt Feuerung des IPSEpro-Gesamtprozesses

3.2.2.4 Modellierung des Wasser-Dampf-Weges nach der Turbine

Der Weg bzw. die Schaltung des Dampfes nach der Dampfturbine war von einem Modell seitens *EVN* gegeben und wurde zum Großteil übernommen. Auch die Parameter des entspannten Dampfes wurden übernommen. Zu erwähnen ist, dass es sich bei der Turbine um eine Gegendruckturbine handelt. Der Prozessdampf für die Abwärmenutzung liegt also noch im überhitzten Zustand vor. Auf die genaue Schaltung bzw. die Komponenten wird hier nicht näher eingegangen. Im Wesentlichen handelte es sich um typische Elemente eines Kreisprozesses nach einer Dampfturbine. Diese umfassten u.a. einen Kondensator, Elemente zur Trennung von Wasser und Dampf als auch einen Speisewasser- und Kondensatbehälter. Die thermische Integration dieser Elemente in den Gesamtprozess war bereits aus dem *EVN*-Modell vorgegeben.

Abbildung 3.2-5 zeigt die Darstellung des Teilprozesses.

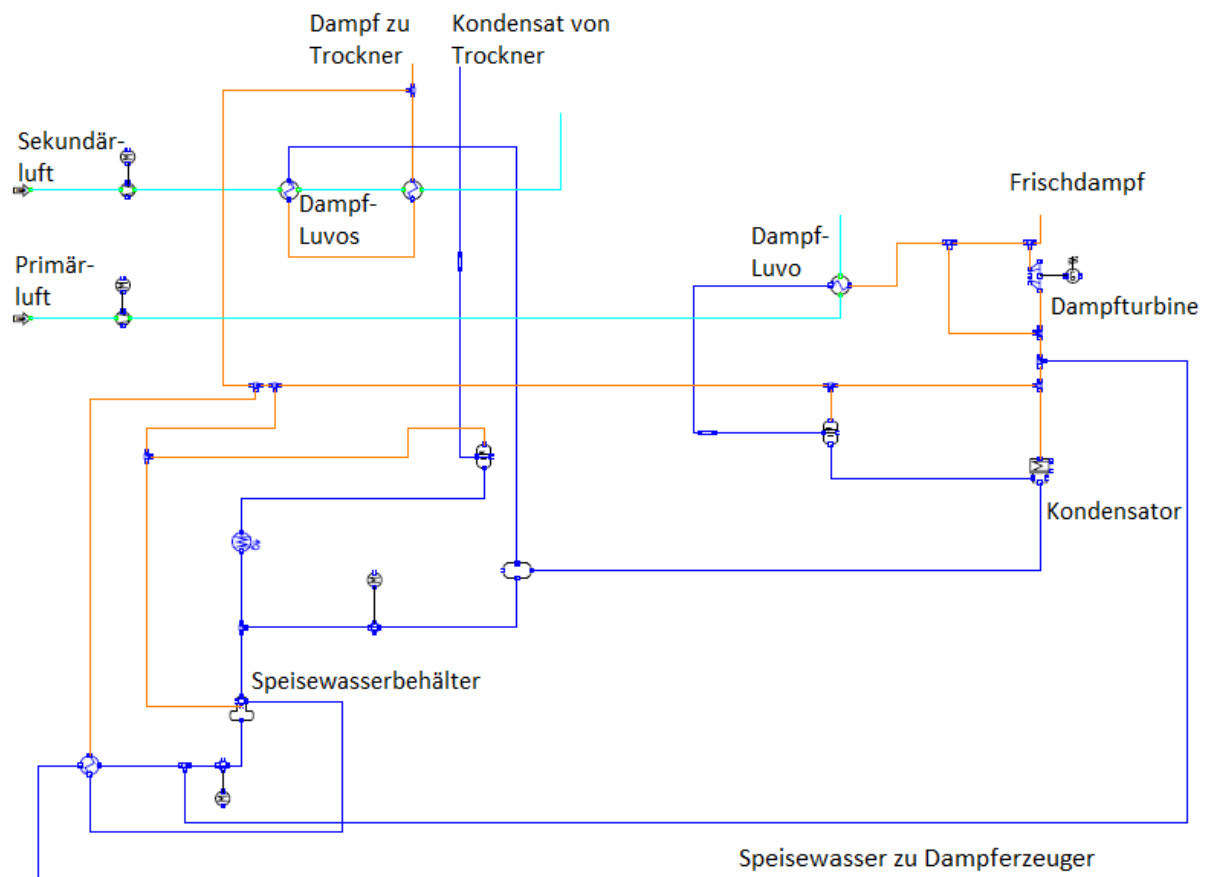


Abbildung 3.2-5: Wasser-Dampf-Weg nach der Turbine im IPSEpro-Modell

Wie bereits erwähnt, wurde ein Teilstrom des Dampfes für die Vortrocknung des Klärschlammes verwendet. Auch die Vorwärmung von Primär- und Sekundärluft wurde durch die Abwärme des Dampfes vorgenommen.

3.2.3 Simulation und Parametervariation

Wie bereits erwähnt war ein funktionierendes Modell des Gesamtprozesses samt einer plausiblen Lösung für die Simulation des Feuerungsprozesses in einer stationären Wirbelschicht die wesentliche Anforderung seitens *EVN*. Der Nutzen dieses IPSE-Modells liegt in der Kenntnis über die unmittelbaren Wechselwirkungen zwischen den Teilprozessen des Gesamtprozesses. So lassen sich die Auswirkungen von geänderten Parametern erkennen und man kann daraus relativ rasch Schlussfolgerungen ziehen.

Im vorliegenden Modell war die Integration der Prozesswärme ein wichtiger Aspekt. Die Simulation im *IPSEpro*-Modell hat gezeigt, dass bei den vorgegebenen Randbedingungen die Bereitstellung von Wärme zur Versorgung sämtlicher interner Wärmeverbraucher zur Gänze durch die bei der Verbrennung des Klärschlammes freiwerdenden Wärme erfolgen kann. Folglich ist der Gesamtprozess unter den angenommenen Randbedingungen thermisch autark.

Um den Nutzen des IPSE-Modells zu verdeutlichen wurde eine vereinfachte Parametervariation durchgeführt, um mögliche relevante Auswirkungen zu verdeutlichen. Als zu variierender Parameter wurde der TS-Gehalt des Klärschlammes nach dem Trockner gewählt. Wie in Abschnitt 2.2.5 erwähnt, handelt es sich beim hohen Wasser- bzw. niedrigen TS-Gehalt um eine sehr charakteristische Brennstoffeigenschaft. Um den Schlamm auf einen -zur Monoverbrennung ausreichenden - TS-Gehalt zu trocknen wird demnach eine erhebliche Menge an Energie für die Trocknung bzw. die Vortrocknung benötigt. Welche Auswirkungen eine gesteigerte Trocknungsleistung und somit eine Verringerung des Wassergehaltes nach sich ziehen kann soll nachfolgend behandelt werden.

3.2.3.1 Voraussetzungen bzw. Vorgabeparameter

Aus Vergleichszwecken wurden folgende Parameter im Gegensatz zur Ursprungskonfiguration vorgegeben:

- Austrittstemperatur aus Nachbrennkammer
- Massenstrom des Klärschlammes vor Trockner

Ansonsten wurden die Werte und Einstellungen aus dem modellierten Gesamtprozess beibehalten.

Unter diesen Voraussetzungen wurde der Wassergehalt des Klärschlammes ausgehend vom Ursprungswert der Reihe nach schrittweise reduziert

3.2.3.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Simulationen mit variierten Parametern sind in Tabelle 3.2-2 gelistet.

| Wassergehalt | [Gew.-%] | 68.6 | 65 | 60 | 55 |
|---------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|
| Heizwert Hu | [kJ/kg] | 3377 | 4045 | 4971 | 5898 |
| Brennstoffmassenstrom | [kg/h] | 12851 | 11530 | 10089 | 8967 |
| Frischdampfmassenstrom | [kg/h] | 13242 | 14349 | 15556 | 16496 |
| Dampfmassenstrom Trockner | [kg/h] | 4533 | 6352 | 8335 | 9878 |
| Generatorleistung | [kWel] | 1153 | 1271 | 1395 | 1492 |
| Kondensatorleistung | [kW] | 4748 | 3928 | 3036 | 2345 |
| Trocknerleistung | [kW] | 2796 | 3920 | 5145 | 6098 |
| Rauchgasmassenstrom | [kg/h] | 42640 | 49906 | 57789 | 63905 |

Tabelle 3.2-2: Ergebnisse der Parametervariation

Aus Tabelle 3.2-2 lassen sich plausible Ergebnisse bzw. Auswirkungen ablesen: Der Massenstrom des getrockneten Schlammes verringert sich mit sinkendem Wassergehalt. Der Heizwert steigt erwartungsgemäß mit sinkendem Wassergehalt. Der steigende Heizwert wirkt sich wiederum erwartungsgemäß auf eine steigende Frischdampfmenge aus, was in einer gesteigerten Turbinen- bzw. Generatorleistung resultiert. Der erhöhte Trocknungsbedarf zeigt sich in der steigenden Trocknerleistung. Mit der erhöhten Trocknerleistung geht der erhöhte Dampfmassenstrom einher, welcher für die Bereitstellung der Trocknungswärme sorgt. Da mehr Dampf für die Trocknung benötigt wird, wird auch weniger Wärme vom Kondensator an die Umgebung abgeführt.

Aus diesen Ergebnissen kann man nun Schlussfolgerungen zur Prozessanpassung ziehen. Laut der Simulation kann der Bedarf an Prozesswärme in jedem der vier Fälle durch interne Wärmerückgewinnung gedeckt werden. Aus analytischer Sicht scheint es so, als würde die Reduzierung des Wassergehaltes ausschließlich Vorteile mit sich bringen: Es wird weniger Wärme an die Umgebung abgeführt, was auf eine effizientere Wärmenutzung schließen lässt. Der Wärmebedarf der erhöhten Trocknungsleistung kann durch den erhöhten Frischdampfmassenstrom gedeckt werden, welcher auch für eine höhere Turbinen- und somit Generatorleistung sorgt. Würde jedoch nicht die Erhöhung der elektrischen Leistung im Vordergrund stehen, sondern würde externe Wärme benötigt, könnte eine Schlussfolgerung anders aussehen. In diesem Fall wäre die im Kondensator abgeführte Wärme ein Indiz für das Vorhandensein einer gewissen Wärmemenge, welche extern Verwendung finden könnte. Unter diesen Umständen würde man bei einer Prozessoptimierung einen anderen Weg einschlagen.

Eine solche Parametervariation in *IPSEpro* erlaubt eine erste Eingrenzung möglicher Prozessanpassungen auf analytischer Ebene. In weiterer Folge kann man konstruktive bzw. technologische Aspekte miteinbeziehen, um eine erwünschte Konfiguration zu realisieren. So könnten die oben berechneten Werte zur Steigerung der elektrischen Leistung z.B. folgende konstruktive Überlegungen nach sich ziehen: Die erhöhte Trocknungsleistung würde ein möglichst energieeffizientes Trocknungskonzept erfordern. Der steigende TS-Gehalt kann dafür sorgen, dass der Schlamm eine sehr zähe, schwer handzuhabende Konsistenz erreicht. Somit müssten Überlegungen getroffen werden, ob der Schlamm bis in diese Phase getrocknet werden sollte und, wenn ja, wie dieser zähe Schlamm komplikationsfrei befördert werden könnte.

Dies sind nur beispielhafte Folgen, welche auf der Grundlage einer solchen, einfachen, Parametervariation basieren könnten. Würde man eine tatsächliche Optimierung einer solchen Prozesskonfiguration vornehmen, müssten noch eine Vielzahl solcher Variationen mit zahlreichen anderen Parametern durchgeführt werden. Mittels einer Sensitivitätsanalyse müssten die Folgen dann entsprechend dargestellt und ausgewertet werden.

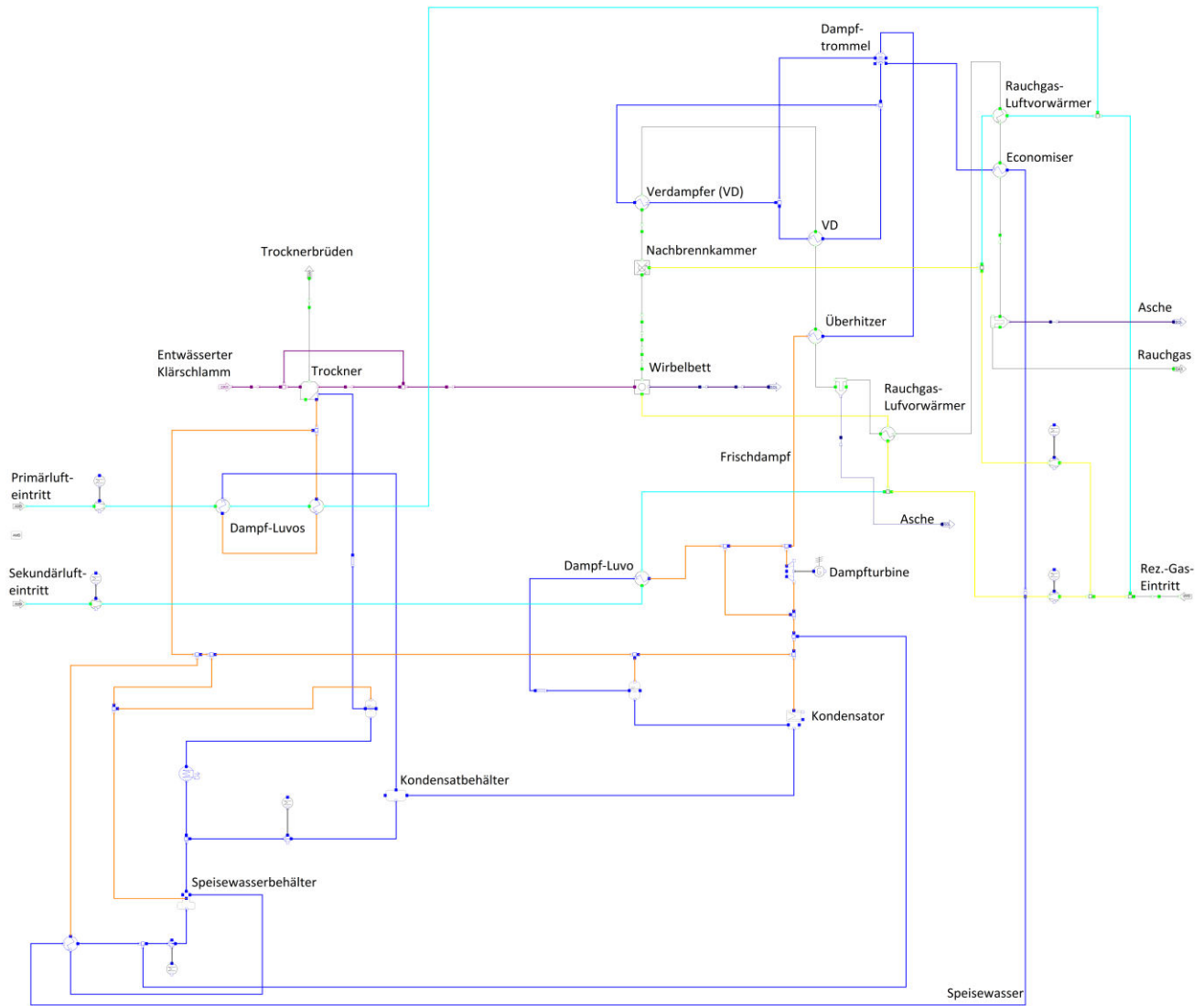


Abbildung 3.2-6: Abbildung des Gesamtprozesses in IPSEpro

3.3 PPSD-Modell

3.3.1 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung für die Arbeit mit *PPSD* war die Erstellung eines Modells von einem mit Klärschlamm gefeuerten stationären Wirbelschichtofen samt Dampferzeuger. Die grundsätzliche Anlagenkonfiguration war vorab bekannt. Diese wurde von einem Planungsbüro im Auftrag der *EVN Wärmekraftwerke GmbH* erstellt. Aufgabe war es, anhand dieser Daten ein Modell in *PPSD* zu erstellen, welches die *EVN* als Simulations-Referenzmodell für zukünftige Anlagen verwenden kann.

Die Auslegungsunterlagen seitens *EVN* enthielten u.a.:

- Dispositionszeichnungen der Anlage
- konstruktive Daten der Anlage, wie z.B.: Abmessungen und Ausführung von wichtigen Komponenten und Bauteilen wie Heizelementen, Wärmetauschern, Rohrleitungen etc.
- Fließschemata der wichtigsten Stoffströme von Luft, Rezirkulationsgas, Wasser bzw. Dampf, Rauchgas und Brennstoff
- Eigenschaften und Bilanzdaten der Stoffströme, wie Temperaturen, Drücke Massenströme, Geschwindigkeiten, Brennstoffzusammensetzung
- Energie-/Massenbilanzen und Leistungsdaten der Anlage und der Komponenten

3.3.2 Anlagenkonfiguration

Eine vereinfachte Darstellung der seitens der *EVN* vordefinierten Anlagenkonfiguration ist in Abbildung 3.3-1 zu sehen. Darin ist die grundlegende Struktur, samt den wichtigsten Komponenten, Abschnitten und Stoffströmen, erkennbar.

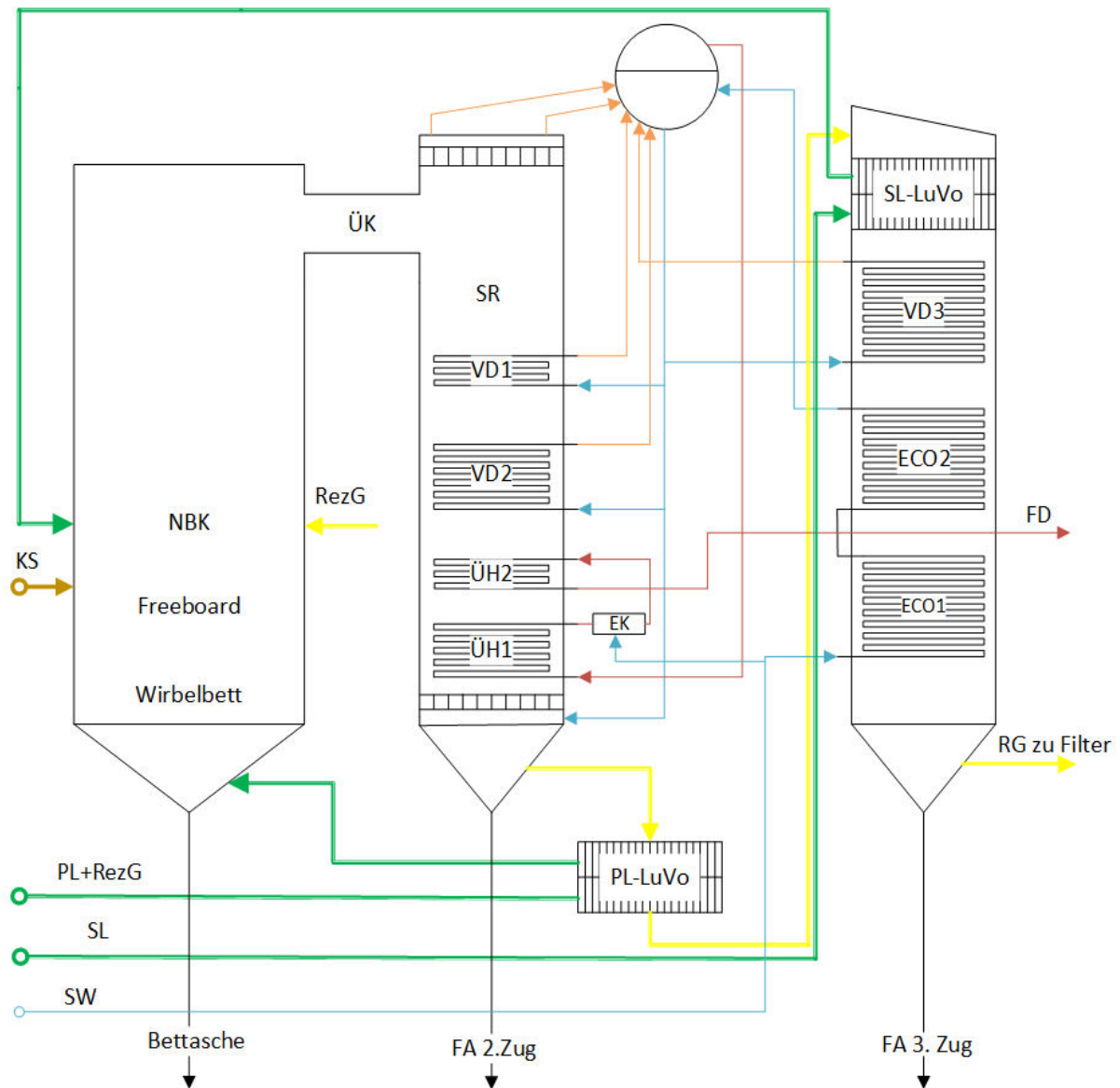


Abbildung 3.3-1: Schema der zu modellierenden Anlagenkonfiguration

3.3.2.1 Beschreibung und Aufbau der Anlage

Wie Abbildung 3.3-1 zeigt, ist die Anlage in einer Drei-Zug-Bauweise als Naturumlauf-Wasserrohr-Dampferzeuger ausgeführt. Den ersten Zug bildet dabei die adiabate Wirbelschichtfeuerung. Im Anschluss werden die wichtigsten Abschnitte und Elemente in Rauchgasrichtung beschrieben.

Stoffströme und Medien

Die Primär- und Sekundärluftströme werden mittels externen, in Abbildung 3.3-1 nicht abgebildeten, Dampf-Luftvorwärmern erwärmt. Anschließend passieren sie -zum Teil mit Rezirkulationsgas gemischt - jeweils einen Rauchgas-Luftvorwärmer. Danach treten sie in die Brennkammer ein.

Erster Zug / Brennkammer

Der erste Zug stellt die Brennkammer dar. In dieser findet die Wirbelschichtfeuerung statt. In Abbildung 3.3-1 sind drei charakteristische Zonen dieser Feuerungsmethode ersichtlich: das Wirbelbett, das Freeboard und die Nachbrennkammer, in welcher die Sekundärluft zugeführt wird. Die Brennkammer ist adiabot ausgeführt, also zur Gänze ausgemauert. Zu erkennen sind prinzipiell die Bereiche der Luftzufuhr. Sowohl Primär- (PL+RezG) als auch Sekundärluft (SL+RezG) werden - mit Rezirkulationsgas (RezG) gemischt - zugeführt. Mit Hilfe einer sogenannten Dampfzerstäuberlanze wird bei der Klärschlammaufgabe der Klärschlamm zerteilt, um große Schlammbrocken zu vermeiden und eine gleichmäßige Aufgabe über den Wirbelbettquerschnitt zu gewährleisten. Am unteren Ende des ersten Zuges werden die zurückbleibende Bettasche und Störstoffe abgeschieden.

Zweiter Zug

Der Übergang in den zweiten Zug erfolgt über einen ausgemauerten Übergangskanal (ÜK). Der zweite Zug stellt einen Konvektionszug dar, welcher von Flossenwänden umgeben ist. Abbildung 3.3-1 zeigt die wichtigsten Zonen bzw. Komponenten zur Wärmeübertragung. Unmittelbar nach dem Übergangskanal beginnt der Zug mit einem Strahlraum (SR). In diesem gibt das Rauchgas die Wärme vorwiegend durch Strahlung an die wasserführenden Flossenwände ab, in welchen das Wasser verdampft wird. Das entstehende Wasser-Dampf-Gemisch strömt in die Dampftrommel, wo die flüssige Phase von der Gasförmigen getrennt wird.

Dem Strahlraum folgen zwei Verdampferbündel (VD 1 und VD 2), in welchen das Wasser im Wesentlichen durch konvektiven Wärmeübergang verdampft wird. Die beiden Verdampferbündel sind als Gegenstromwärmetauscher ausgeführt. Von ihnen strömt das Wasser-Dampf-Gemisch wiederum in die Dampftrommel.

Nach den Verdampferbündeln erreicht das Rauchgas zwei Überhitzerbündel (ÜH2 und ÜH1). In diesen wird der Satttdampf aus der Trommel überhitzt, um die gewünschten Dampfparameter zu erreichen. ÜH2 ist dabei als Gleichstrom-, ÜH1 als Gegenstromwärmetauscher ausgeführt. Zwischen ÜH1 und ÜH2 ist ein Einspritzkühler installiert. Mit diesem lässt sich, durch Einspritzung von Speisewasser (SW), die Frischdampf Temperatur regeln.

Am Ende des zweiten Zuges erfolgt eine Flugascheabscheidung (FA 2. Zug). Danach strömt das Rauchgas durch einen Röhren-Primärluftvorwärmer (PL Luvo).

Dritter Zug

Über einen isolierten Kanal strömt das Rauchgas in den abwärtsdurchströmten Konvektionszug ohne gekühlte Wände. Dort passiert das Rauchgas zuerst einen Röhren-Sekundärluftvorwärmer (SL Luvo). Danach folgt noch ein Verdampferbündel (VD 3) im Gegenstrombetrieb. In den beiden darauffolgenden Economiserbündeln (ECO 1 und ECO 2) wird das Speisewasser vorgewärmt und der Dampftrommel zugeführt. Am Ende des Zuges erfolgt wiederum eine Flugascheabscheidung, ehe das Rauchgas den Zug verlässt.

Brennstoff

Als Brennstoff kommt teilgetrockneter Klärschlamm zum Einsatz. Die Brennstoffeigenschaften lagen den Unterlagen der *EVN* bei und sind in Tabelle 3.3-1 zusammengefasst. Darin ersichtlich sind die für Klärschlamm charakteristischen Eigenschaften, wie der niedrige Heizwert, der hohe Wassergehalt und der hohe Aschegehalt bezogen auf die Trockensubstanz (vgl. Abschnitt 2.3.5.1).

| | | |
|------------------|---------|--------------|
| Heizwert | | |
| Hu | [MJ/kg] | 3.5 |
| Temperatur | | |
| T | [°C] | 25 |
| Elementaranalyse | | |
| C | [%] | 11.98 |
| H2 | [%] | 1.74 |
| O2 | [%] | 6.91 |
| N | [%] | 1.08 |
| S | [%] | 0.54 |
| Cl | [%] | 0.29 |
| F | [%] | 0 |
| Wasser | [%] | 68.6 |
| Asche | [%] | 8.85 |
| Gesamt | [%] | 99.99 |

Tabelle 3.3-1: Gegebene Brennstoffeigenschaften

3.3.3 Modellbildung in PPSD

Abbildung 3.3-2 zeigt das Anlagenmodell in der *PPSD*-Simulationsumgebung für die Rauchgasseite (vgl. auch Anhang, sonstige Anhänge A). Das Modell wurde derart aufgebaut, dass alle wesentlichen Komponenten enthalten sind und diese derart modelliert sind, dass die tatsächliche Anlagenstruktur sowie die relevanten Zusammenhänge abgebildet werden können. Zusätzlich sind eine Vielzahl an Regelementen, Ventilen und Verbindungen enthalten. Auf deren Zweck wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

Außerdem soll auf die Modellierung der wichtigsten Bestandteile, Abschnitte und Stoffströme eingegangen werden.

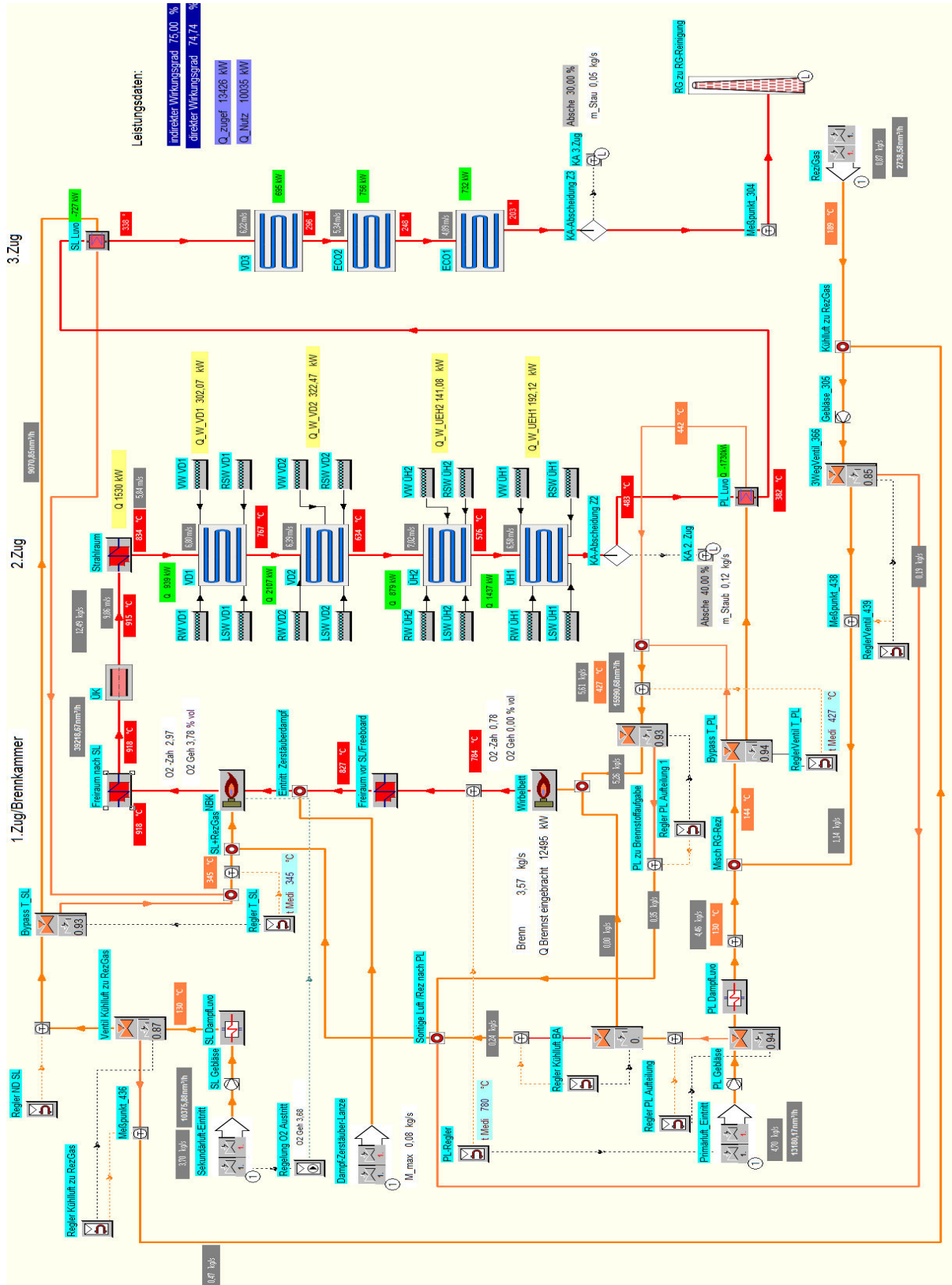


Abbildung 3.3-2: PSD-Modell Rauchgasseite

3.3.3.1 Modellierung der Brennkammer/Erster Zug

Die Modellierung der Brennkammer war geprägt von der Realisierung der Phänomene einer Klärschlamm-feuernden stationären Wirbelschichtfeuerung (vgl. Abschnitt 2.2.5). Mit der adiabaten Gestaltung des ersten Zuges bestand auch eine konstruktive Anforderung seitens *EVN*.

In *PPSD* gibt es keine vorgefertigten Brennkammermodelle für die Darstellung einer Wirbelschichtfeuerung. *KED* stellt jedoch Help-Files zur Verfügung, in welchen u.a. die Modellierung eines substöchiometrischen Verbrennungsvorgangs bzw. Vergasungsvorgangs mit anschließender Nachverbrennung beschrieben wird. Diese Anleitung war Grundlage für die Modellierung der Brennkammer.

Abbildung 3.3-3 zeigt den ersten Zug im *PPSD*-Modell. Dieser setzt sich aus zwei Brennkammern und Strahlräumen zusammen. Wie auch in Abbildung 3.3-3 bezeichnet, stellen die Brennkammern jeweils das Wirbelbett und die Nachbrennkammer (NBK) dar. Um im Wirbelbett in *PPSD* einen Vergasungsprozess simulieren zu können, muss in den Einstellungen die Berücksichtigung von Vergasungsreaktionen aktiviert werden. *PPSD* berechnet dann eine einfache Rauchgaszusammensetzung als Funktion von Luftüberschuss oder Temperatur. Bei Deaktivierung der Vergasungsreaktionen wird im Brennkammermodell standardmäßig versucht eine vollständige Verbrennung zu realisieren. Dabei führt der bei unterstöchiometrischen Luftzahlen vorliegende Sauerstoffmangel zur Bildung von CO. Die Folge wäre einerseits, dass sich über die Regelung ein vergleichsweise zu hoher Luftmassenstrom einstellen würde. Andererseits würde sich bei vorgegebenem Luftmassenstrom die gewünschte Rauchgastemperatur nicht erreichen lassen.

Zwischen Wirbelbett und NBK befindet sich ein Strahlraum, welcher das Freeboard darstellt. Entgegen seiner ursprünglichen Funktion, nämlich der Erwärmung des Wasser-Dampf-Gemisches in den Membranwänden, dient dieser Strahlraum im Modell der Wärmeabgabe an das Rauchgas. Diese Eigenschaft konnte über entsprechende Einstellungen realisiert werden. Somit sollte eine Temperaturerhöhung des Rauchgases über dem Bett erreicht werden, wie sie auch in der *EVN*-Berechnung bilanziert ist.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Referenzanlage ist die adiabate Brennkammer. Diese Eigenschaft konnte, mittels entsprechender Einstellungen in den Brennkammern bzw. Strahlräumen, ebenfalls im Modell realisiert werden. In einem später abgebildeten Q-t-Diagramm wird dies ersichtlich (vgl. Diagramm 3.3-3, S.61).

In der Vorlage der Anlagenkonfiguration ist eine sogenannte Dampfzerstäuberlanze vorgesehen. Im Modell wurde dies berücksichtigt, indem dem Rauchgas ein Dampfstrom - mit entsprechenden Parametern - zwischen Freeboard und NBK hinzugefügt wurde (vgl. Abbildung 3.3-3).

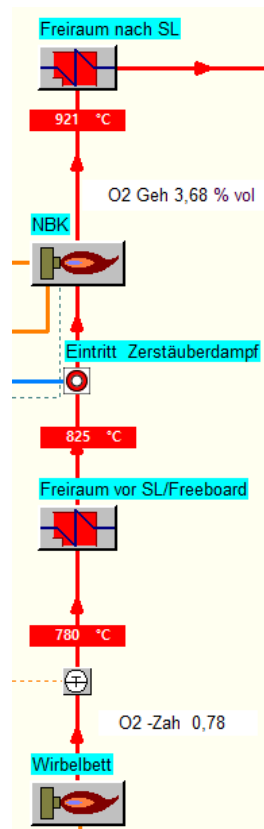


Abbildung 3.3-3: Brennkammer im PPSD-Modell

Informationen über den Eintritt und die Regelung von Verbrennungsluft, Brennstoff bzw. Rezirkulationsgas werden in Abschnitt 3.3.3.4 behandelt.

3.3.3.2 Modellierung der Rauchgaszüge

Die Konstruktion der Heizelemente wurde, soweit möglich, exakt nach den Angaben der Vorberechnung modelliert. Das heißt, es wurden alle bekannten Abmessungen und Geometrien der Vorberechnung übernommen. Dabei konnte die Konstruktion der Heizbündel relativ genau modelliert werden. V.a. die Konstruktion der Rauchgas-Luftvorwärmer konnte sehr genau nach den Vorgaben modelliert werden. Die exakte Höhe der einzelnen Flossenwände war nicht bekannt. Diese wurde mithilfe vorliegender Dispositionszeichnungen abgeschätzt. Überprüft wurden die Abmessungen der Flossenwände durch Abgleich mit der resultierenden Heizfläche, welche aus den Unterlagen der EVN bekannt war. In Abbildung 3.3-4 sind der zweite und dritte Zug des PPSD-Modells abgebildet. Darauf sind alle Heizelemente erkennbar, welche der Vorwärmung, Verdampfung und Überhitzung der Wasser-, Wasserdampf- bzw. Dampfströme dienen. Außerdem erkennbar sind die beiden Rauchgas-Luftvorwärmer und die Ascheabscheidung. Mittels dieser Abscheideelemente sollte der Ascheaustrag aus dem Kessel an den entsprechenden Stellen modelliert werden.

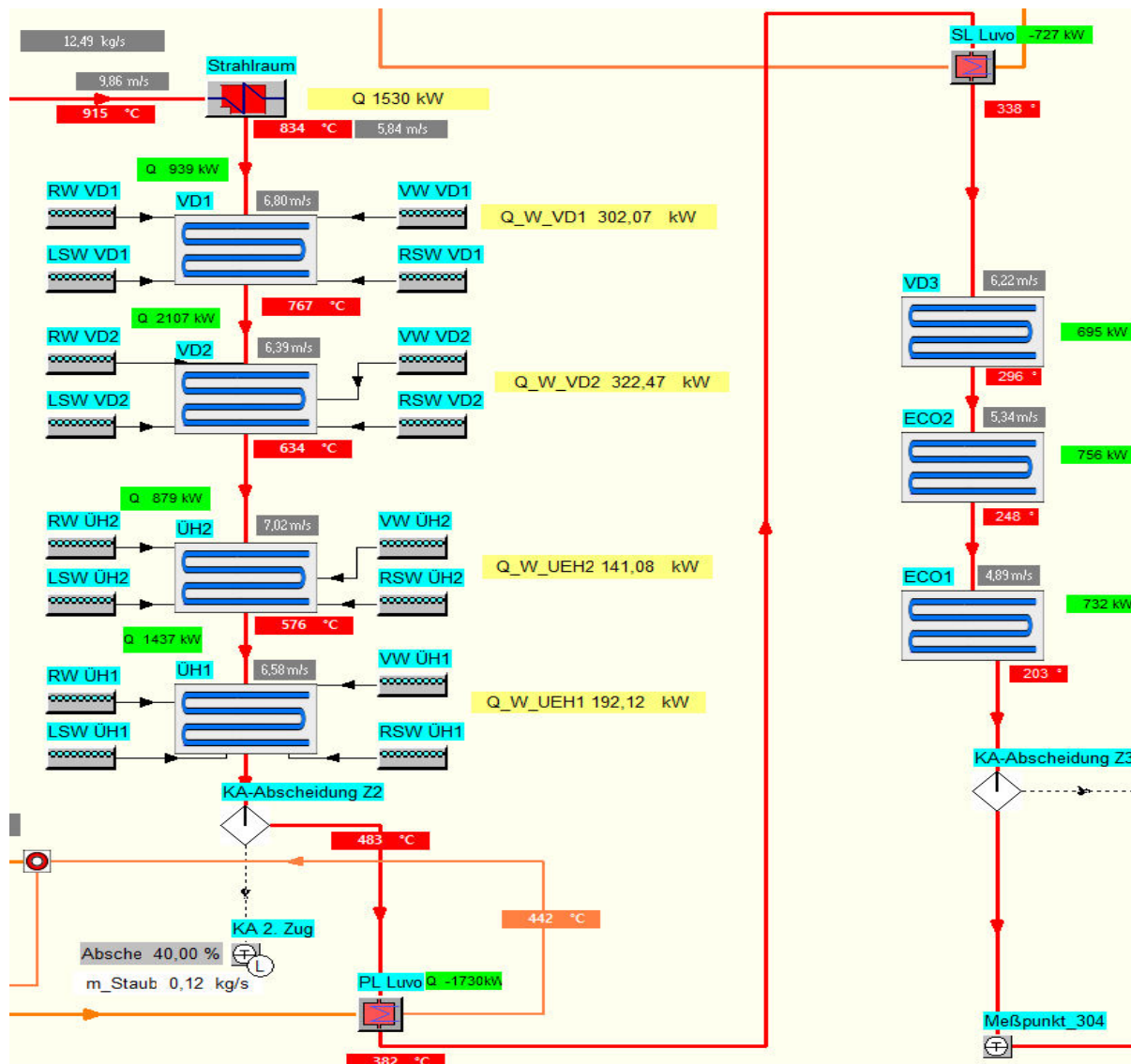


Abbildung 3.3-4: Zweiter und dritter Zug auf Rauchgasseite im PPSD-Modell

3.3.3.3 Modellierung des Wasser-Dampf-Systems

Abbildung 3.3-5 zeigt die Wasserseite im *PPSD*-Modell (siehe Anhang für größere Darstellung). Neben Speisewasserpumpe, Dampftrommel und Einspritzregler sind darin alle Heizelemente ersichtlich, welche der Speisewasservorwärmung bzw. der Dampfüberhitzung dienen. Außerdem ist ein zweites Wasser- bzw. Dampf-System zu erkennen (vgl. Abbildung 3.3-5 unten). Damit erfolgt die gewünschte Luftvorwärmung der Hauptluftströme mittels externem Niederdruckdampf.

Abbildung 3.3-6 zeigt den Verdampferkreislauf des *PPSD*-Modells. Dort sind alle Heizflächen ersichtlich, welche der Wasserverdampfung dienen.

In den beiden, eben erwähnten Abbildungen, sind auch die Verrohrungen zwischen den Heizelementen zu erkennen. Die Wasser- bzw. Dampfleitungen zwischen den einzelnen Komponenten waren in Anzahl, Material und Querschnittsabmessungen seitens *EVN*

gegeben. Die Länge war jedoch nicht bekannt. Somit wurden die Längen, wie auch schon in Abschnitt 3.3.3.2 erwähnt, anhand von vorliegenden Dispositionszeichnungen abgeschätzt.

Eine Problematik auf der Wasserseite war die Realisierung der Druckverluste im Wasser- bzw. Dampfkreislauf. Die in *PPSD* wasserseitig auftretenden Druckverluste fallen geringer aus als in der Vorauslegung von *EVN*. Mangelnde Kenntnis über Rohrrauigkeit, Rohrlängen bzw. eine exakte Modellierung der Sammler machten eine genauere Anpassung nicht möglich.

Ein weiterer Aspekt, welchem größere Aufmerksamkeit zukam, war die realitätsnahe Abbildung der Flossenwände um die Heizbündel im zweiten Zug (vgl. Abbildung 3.3-4 bzw. Abbildung 3.3-6 bzw. auch Anhang, sonstige Anhänge B,C). Diese wasserdurchströmten Rohrwände stellen Verdampfer-Heizelemente dar. Die Herausforderung in *PPSD* liegt darin, diese Heizelemente so zu modellieren, dass das Rauchgas gleichzeitig und nicht orts- bzw. zeitversetzt Wärme an die Bündel und die umliegenden Heizflächen abgibt. Die realitätsnahe Funktion im vorliegenden Modell kann dem später abgebildeten Q-t-Diagramm entnommen werden (vgl. Diagramm 3.3-3, S.61).

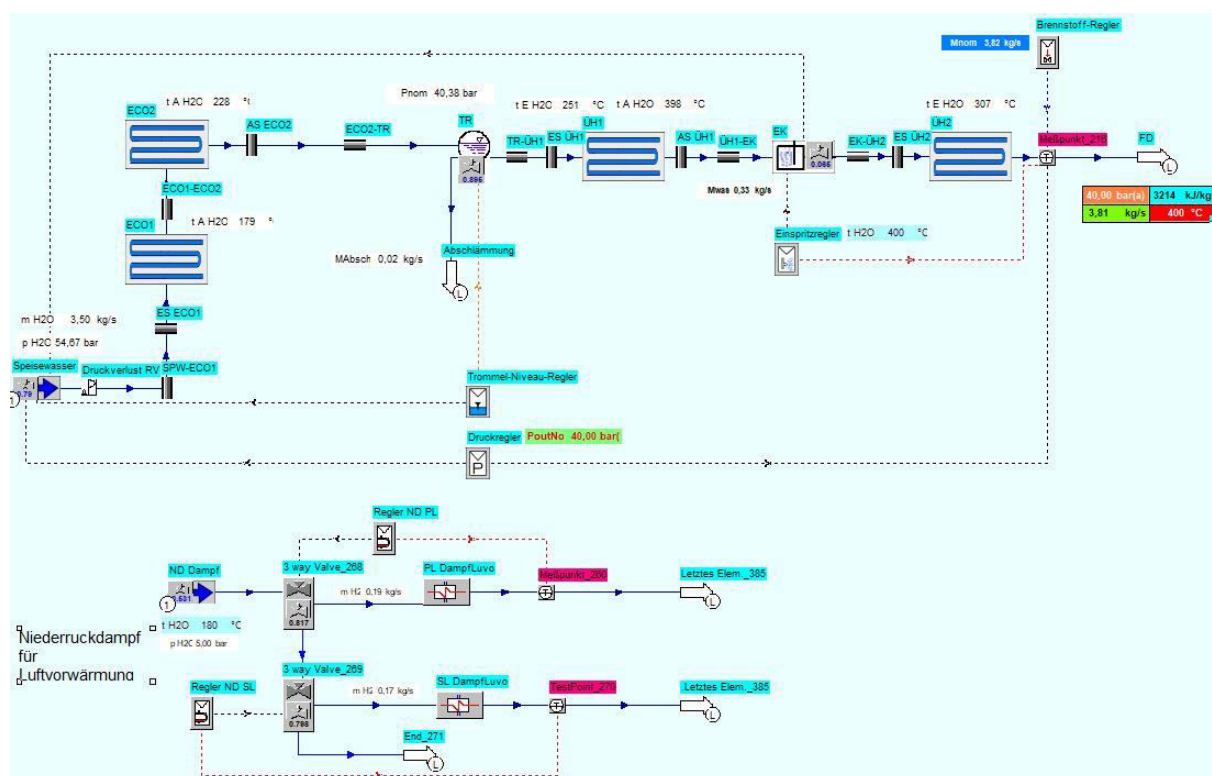


Abbildung 3.3-5: Wasserseite des PPSD-Modells

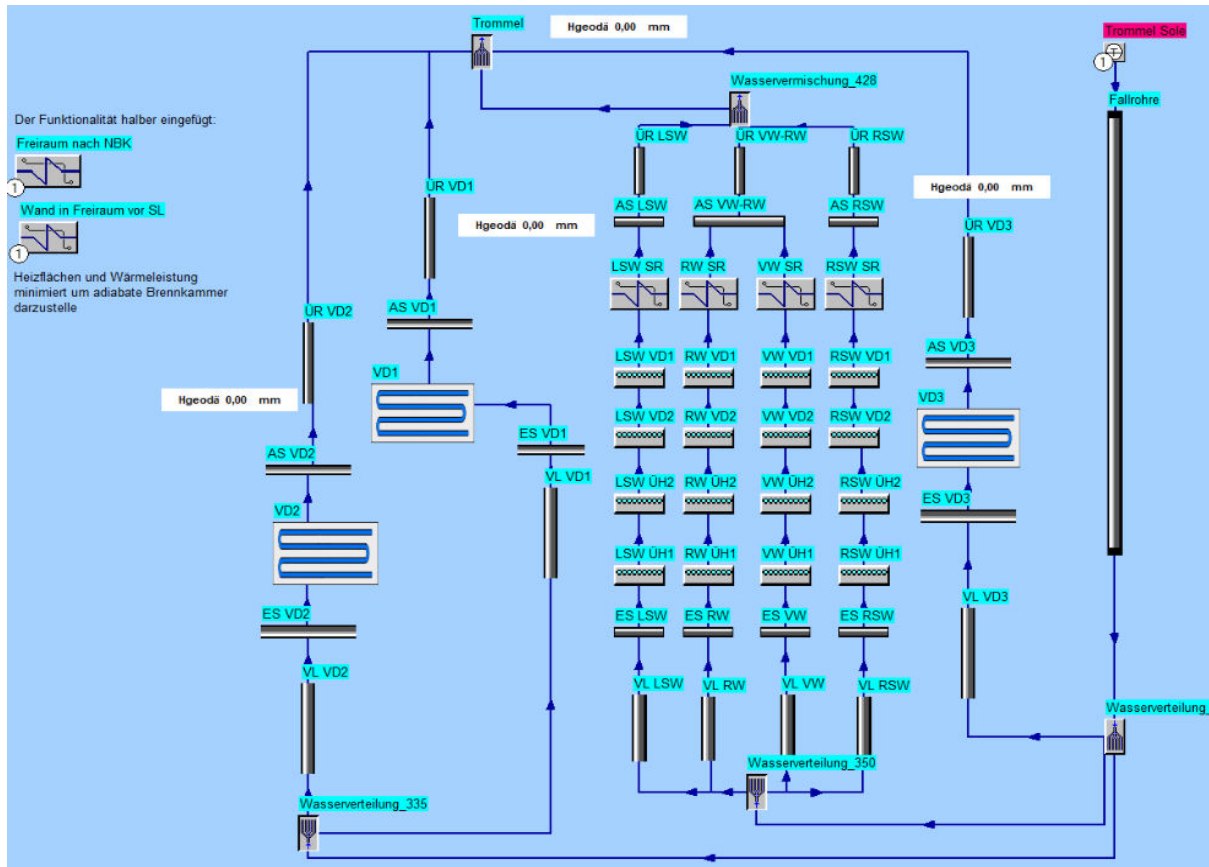


Abbildung 3.3-6: Verdampfersystem im PPSD-Modell

3.3.3.4 Einstellung und Regelung der Stoffströme

Abbildung 3.3-2 lässt eine relativ komplexe und verzweigte Führung der Stoffströme von Luft und Rezykulationsgas erkennen. Diese Komplexität ist das Resultat folgender Ursachen: Zum einen ist die Stromführung laut der vordefinierten Anlagenkonfiguration ebenfalls sehr komplex. Zum anderen sind viele Verzweigungen im *PPSD*-Modell eine Folge von Regelementen, welche vor allem der Temperatur und Massenstromregelung dienen. Es ist zu erwähnen, dass diese Regelemente einerseits der tatsächlichen Regelung des Betriebes dienen. Andererseits dienen sie aus Validierungsgründen auch der Anpassung notwendiger Bilanzdaten an die *EVN*-Berechnung. Nachfolgend soll auf die Regelung und Schaltung der wichtigsten Stoffströme eingegangen werden.

Verbrennungsluft

Die Regelung des Primärluftmassenstromes erfolgt im Modell aktiv über die Rauchgasaustrittstemperatur aus dem Wirbelbett. Die Regelung des Sekundärluftmassenstromes erfolgt aktiv über den Sauerstoffgehalt im Rauchgas nach der Nachbrennkammer.

Die Aufteilung der Luftströme erfolgt in einer gewissen Abweichung zur vordefinierten Anlagenkonfiguration. In dieser zweigen kleinere Teilströme von den Hauptströmen der Primär- und Sekundärluft ab. Diese Teilströme treten nicht an den Hauptzufuhrstellen in den Feuerraum ein, sondern z.B. auf Höhe der Brennstoffzufuhr, oder an sonstigen spezifischen Stellen. Diese zusätzlichen Lufteinträge dienen vorwiegend der Kühlung bestimmter Komponenten. Sie wurden im Modell so ähnlich als möglich wie in der grafischen Vorabkonfiguration geschaltet und dementsprechend der Primär- bzw. Sekundärluft zugeordnet. Die Schaltung wurde jedoch so angepasst, dass sich wichtige Parameter, wie die resultierenden Rauchgastemperaturen, mit jenen aus der Vorberechnung decken.

Die eben erwähnten spezifischen Luftströme wurden massenmäßig vorgegeben. Das heißt, für jeden Lastfall wurden die Werte für die Massenströme aus der Vorberechnung übernommen. Die Vielzahl an Reglern im Modell dient u.a. der Vorgabe dieser Massenströme (vgl. Abbildung 3.3-2).

Die Temperaturen wurden, entsprechend der Werte der Vorberechnung, für Primär- und Sekundärluftströme vorgegeben. Dafür sind im Modell ebenfalls eine Reihe von Reglern erforderlich. Diese Vorgabe umfasst die Vorwärmung der Luftströme durch die Dampf-Luvos, als auch die Vorwärmung durch die Rauchgas-Luvos auf eine bestimmte Temperatur.

Rezirkulationsgas

Auch die Rezirkulationgasführung unterliegt in der Vorabkonfiguration einer komplexen Schaltung. Auch hier wurde die Stromführung so exakt als möglich abgebildet. Anpassungen erfolgten aber ebenfalls in der Absicht, dass die Rauchgastemperaturen im Feuerraum von Modell und Vorberechnung übereinstimmen.

Der Rezirkulationsgasstrom wurde nach den Werten der Vorberechnung vorgegeben und unterliegt keiner Last- bzw. parameterabhängigen Regelung. Die Regelelemente im Modell dienen wiederum nur dem Zweck, dass die vorgegebenen Werte eingehalten werden.

Die exakte Zusammensetzung des Rezirkulationsgases war nicht bekannt. Für die Zusammensetzung wurde die Rauchgaszusammensetzung am Austritt des *PPSD*-Modells gewählt. Um die Rauchgasreinigung - zumindest vereinfacht - zu berücksichtigen, wurde mittels Scripts der SO_2 -Gehalt des Rezirkulationsgases null gesetzt.

Brennstoff

Die Brennstoffzusammensetzung als auch dessen Heizwert und Temperatur waren seitens *EVN* bekannt (vgl. Tabelle 3.3-1, S.40) und wurden dementsprechend im Modell vorgegeben. Der Brennstoffmassenstrom wurde abhängig vom geforderten Frischdampfmassenstrom geregelt.

Wasser/Dampf

Die Wasser- bzw. Dampf-seitige Regelung erfolgte lastabhängig. So wurde der gewünschte Frischdampfmassenstrom, als auch dessen Temperatur und Druck, als Regelparameter vorgegeben. Abhängig davon erfolgte die Regelung des Druckes und des Massenstromes des Speisewassers, als auch jene des Einspritzkühlers (vgl. Abbildung 3.3-5). Die Temperatur des Speisewassers wurde, der Vorberechnung entsprechend, vorgegeben.

Der Dampfstrom für die Niederdruck-Luvos wurde in Masse, Temperatur und Druck vorgegeben (vgl. Abbildung 3.3-5 unten).

Ascheabscheidung

Die Abscheidung der Asche im zweiten und dritten Zug wurde derart festgelegt, dass sich ein abgeschiedener Massenstrom ergibt, welcher sich mit den Werten aus der *EVN*-Berechnung deckt.

3.3.4 Auswertung und Diskussion der Simulationsergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse des *PPSD*-Modells den Ergebnissen der Vorberechnung gegenübergestellt und diskutiert.

Wie in Abschnitt 3.3.3.4 erwähnt, wurden Luft und Brennstoffmassenströme im *PPSD*-Modell abhängig von der Last bzw. vorgegebenen Parametern geregelt. Die beiden Lastfälle wurden jedoch auch für fest vorgegebene Luft- bzw. Brennstoffmassenströme simuliert. Daraus ergaben sich im Modell die Fälle der *aktiven* und der *inaktiven Regelung*. Der Zweck dieser Vorgehensweise soll nachfolgend erläutert werden.

- Regelung *aktiv* (A) bedeutet, dass die Hauptluftmassenströme von Primär- und Sekundärluft, als auch der Brennstoffmassenstrom abhängig von Regelparametern geregelt werden. Regelparameter für die Primärluft ist dabei die Rauchgastemperatur nach dem Wirbelbett. Die Sekundärluft wird in Abhängigkeit vom O₂-Gehalt des Rauchgases nach der Nachbrennkammer geregelt. Der Brennstoffmassenstrom wird in Abhängigkeit vom geforderten Dampfmassenstrom geregelt (vgl. Abschnitt 3.3.3.4).
- Regelung *inaktiv* (IA) bedeutet, dass die Hauptluftmassenströme, als auch der Brennstoffmassenstrom fix vorgegeben wurden. Die Vorgabe erfolgte nach den Werten der Vorberechnung. Damit sollte erreicht werden, dass sich im Modell ein Rauchgasmassenstrom bildet, der in Masse und Temperatur jenem der Vorberechnung entspricht, was der Validierung dient. Der Massenstrom samt der sich dadurch ergebenden Rauchgasgeschwindigkeiten sind wesentliche Einflussfaktoren auf den übertragbaren Wärmestrom. Somit konnten die

Wärmeleistungen der Heizflächen des Modells kontrolliert, und mit jenen der Vorberechnung verglichen werden.

3.3.4.1 Lastfälle

Wie bereits erwähnt wurden zwei Lastfälle simuliert. Ein Vollastfall und ein Teillastfall bei gleichem Brennstoff. Die Eckdaten der Lastfälle sind in Tabelle 3.3-2 zusammengefasst.

| Lastfall | | Vollast | Teillast |
|--------------------|--------|---------|----------|
| Brennstoff | | | |
| Massenstrom | [kg/h] | 12.857 | 10.286 |
| Temperatur | [°C] | 25 | 25 |
| Wärmeleistung | [MW] | 12.5 | 10 |
| Nutzleistung | [MW] | 10.24 | 8.16 |
| Frischdampf | | | |
| Massentrom | [t/h] | 13.75 | 10.94 |
| Temperatur | [°C] | 400 | 400 |
| Druck | [bar] | 40 | 40 |

Tabelle 3.3-2: Eckdaten der Lastfälle

3.3.4.2 Vollast (VL), Rauchgasseite

Nachfolgend erfolgt die Gegenüberstellung der rauchgasseitigen Berechnungsergebnisse aus der Vorberechnung und dem *PPSD*-Modell für den Vollastfall.

3.3.4.2.1 Leistungsdaten, VL

Die in *PPSD* berechneten Werte von Nutzleistung bzw. Wirkungsgrad sind etwas geringer als die von *EVN* vorab berechneten Werte (vgl. Tabelle 3.3-2). Dieser Umstand ist durchaus plausibel. Für einen noch genaueren Vergleich müssten viele Einflussparameter miteinander verglichen bzw. abgeglichen werden. So müssten z.B. konstruktive Daten aller Heizelemente exakt übereinstimmen. Auch die berücksichtigten Wärmeübertragungsphänomene und deren Gewichtung müssten übereinstimmen. Außerdem müssten die von *PPSD* und der Vorberechnung miteinberechneten Verluste übereinstimmen. Unter den Umständen mangelnder Kenntnis über Berücksichtigung dieser Faktoren, ist die Abweichung zwischen *PPSD* und der Vorberechnung von *EVN* als sehr gering einzuschätzen.

| Bilanzzone | PPSD | | Berechnung EVN | Abweichung PPSD | |
|---------------------------|-------------|------------|----------------|-----------------|------------|
| | Regelung IA | Regelung A | | Regelung IA | Regelung A |
| | [%] | | | | |
| Nutzleistung [MW] | 10.04 | 10.17 | 10.24 | -2.0 | -0.7 |
| Wirkungsgrad indirekt [%] | 75.00 | 75.08 | 76.2 | -1.6 | -1.5 |

Tabelle 3.3-3: Nutzleistung und Wirkungsgrad, VL

3.3.4.2.2 Rauchgasmassen- bzw. Volumenströme

Die in *PPSD* berechneten Massen- bzw. Volumenströme decken sich sehr gut mit der Vorgabe. Insbesondere im Fall der inaktiven Regelung (vgl. Tabelle 3.3-4). Wie bereits zuvor erwähnt, wurden dabei die Massenströme von Verbrennungsluft und Brennstoff exakt nach der Vorberechnung vorgegeben, um einen vergleichbaren Rauchgasmassenstrom zu erreichen. Somit ist das Ergebnis wenig überraschend. Es ist jedoch zu erwähnen, dass der geforderte Frischdampfmassenstrom in diesem Fall nicht ganz erreicht wurde.

Im Fall der aktiven Regelung steigt der Massen- bzw. Volumenstrom des Rauchgases über den Wert der Vorberechnung an. Um die geforderten Regelparameter zu erreichen erlaubt die Regelung in diesem Fall höhere Verbrennungsluftmassenströme als auch einen höheren Brennstoffmassenstrom. Das Resultat ist der höhere Rauchgasmassenstrom, der u.a. für die Bereitstellung des geforderten Frischdampfmassenstromes verantwortlich ist.

| Bilanzzone | PPSD | | Berechnung EVN | Abweichung PPSD | |
|--|-------------|------------|----------------|-----------------|------------|
| | Regelung IA | Regelung A | | Regelung IA | Regelung A |
| | [kg/s] | | | [%] | |
| Rauchgasmassenstrom m°_{RG} [kg/s] | 12.49 | 12.57 | 12.51 | -0.2 | 0.5 |
| Rauchgasvolumenstrom V°_{RG} [nm ³ /h] | 39218.6 | 39480.7 | 39335 | -0.3 | 0.4 |

Tabelle 3.3-4: Rauchgasmassen-/Volumenstrom des ersten und zweiten Zuges, VL

3.3.4.2.3 Rauchgastemperaturen

Die resultierenden Rauchgastemperaturen werden nachfolgend gelistet und mit den Temperaturen aus der Vorberechnung verglichen. Die Auflistung erfolgt tabellarisch für den jeweiligen Zug. Die Temperaturen beziehen sich darin auf den Austritt aus dem jeweiligen Abschnitt.

| Bilanzzone | PPSD | | Berechnung EVN | Abweichung PPSD | |
|--------------------------------|-------------|------------|----------------|-----------------|------------|
| | Regelung IA | Regelung A | | Regelung IA | Regelung A |
| | [°C] | | | [%] | |
| Austritt Wirbelbett | 784 | 780 | 780 | 0.5 | 0 |
| Freiraum vor SL / Freeboard | 827 | 825 | 878 | -5.8 | -6.0 |
| Austritt Nabchrennkammer (NBK) | 919 | 921 | 921 | -0.2 | 0 |

Tabelle 3.3-5: Rauchgastemperaturen des ersten Zuges, VL

| Bilanzzone | PPSD | | Berechnung EVN | Abweichung PPSD | |
|-----------------------------------|-------------|------------|----------------|-----------------|------------|
| | Regelung IA | Regelung A | | Regelung IA | Regelung A |
| | [°C] | | | [%] | |
| Austritt Übergangskanal | 915 | 918 | 916 | -0.1 | 0.2 |
| Austritt Strahlraum | 834 | 837 | 833 | 0.1 | 0.5 |
| Austritt Verdampferbündel 1 (VD1) | 767 | 770 | 754 | 1.7 | 2.1 |
| Austritt Verdampferbündel 2 (VD2) | 633 | 636 | 623 | 1.6 | 2.1 |
| Austritt Überhitzer 2 (ÜH2) | 576 | 578 | 557 | 3.4 | 3.8 |
| Austritt Überhitzer 1 (ÜH1) | 482 | 484 | 472 | 2.1 | 2.5 |

Tabelle 3.3-6: Rauchgastemperaturen des zweiten Zuges, VL

| Bilanzzone | PPSD | | Berechnung EVN | Abweichung PPSD | |
|-----------------|-------------|------------|----------------|-----------------|------------|
| | Regelung IA | Regelung A | | Regelung IA | Regelung A |
| | [°C] | | [%] | | |
| Austritt Luvo 1 | 382 | 383 | 373 | 2.4 | 2.7 |
| Austritt Luvo 2 | 338 | 340 | 330 | 2.4 | 3.0 |

Tabelle 3.3-7: Rauchgastemperaturen der Rauchgas-Luvos, VL

| Bilanzzone | PPSD | | Berechnung EVN | Abweichung PPSD | |
|-----------------------------------|-------------|------------|----------------|-----------------|------------|
| | Regelung IA | Regelung A | | Regelung IA | Regelung A |
| | [°C] | | [%] | | |
| Austritt Verdampferbündel 3 (VD3) | 296 | 297 | 293 | 1.0 | 1.4 |
| Austritt ECO 2 | 248 | 243 | 246 | 0.8 | -1.2 |
| Austritt ECO 1 | 203 | 203 | 201 | 1.0 | 1.0 |

Tabelle 3.3-8: Rauchgastemperaturen des dritten Zuges, VL

Der Verlauf der Rauchgastemperaturen entspricht im Wesentlichen den Temperaturen aus der Vorberechnung (vgl. Diagramm 3.2-1). Betrachtet man zweiten und dritten Zug, so liegt die größte Abweichung bei 3.4 % bzw. 3.8 % im Vergleich zu den Ergebnissen der *EVN*. Im Schnitt beträgt die Abweichung der RG-Temperaturen in beiden Zügen unter 2 % (vgl. Tabelle 3.3-6 und Tabelle 3.3-8).

Betrachtet man den ersten Zug, so fällt die relativ große Temperaturabweichung im Bereich zwischen Bett und Nachbrennkammer auf (vgl. Tabelle 3.3-5). In der Berechnung der *EVN* ist die Zone zwischen Bett und Nachbrennkammer sehr detailliert in mehrere Bilanzzonen unterteilt. Grund dafür dürfte die möglichst realistische theoretische Berechnung bzw. Beschreibung des Verbrennungsprozesses in einer Wirbelschicht sein (vgl. Abschnitt 2.2.6). Es besteht jedoch kein Einblick in die Methodik der *EVN*-Berechnung. Im Gegensatz dazu existiert im *PPSD*-Modell nur eine Bilanzzone (Freiraum vor SL) zwischen Bett und Nachbrennkammer. Diese soll das Freeboard darstellen. Für den Vergleich der Temperaturverläufe wurden die Bilanzzonen zwischen Wirbelbett und NBK aus der *EVN*-Berechnung zusammengefasst und ein Mittelwert daraus gebildet. Dieser Mittelwert wurde dem Wert des Freeboards aus dem *PPSD*-Modell gegenübergestellt.

In Diagramm 3.2-1 sind die Temperaturverläufe von *PPSD*-Modell und der *EVN*-Berechnung dargestellt. Darin ist nochmals die relativ gute Korrelation zu erkennen.

Da das Temperaturprofil (vgl. Diagramm 3.3-1) des *PPSD*-Modells ab der Nachbrennkammer sehr gut mit den Ergebnissen der Vorberechnung korreliert, kann man davon ausgehen, dass die Leistungen der Heizflächen im zweiten und dritten Zug jenen der Vorberechnung sehr ähnlich sind. Die Wärmeleistungen werden nachfolgend bilanziert und verglichen.

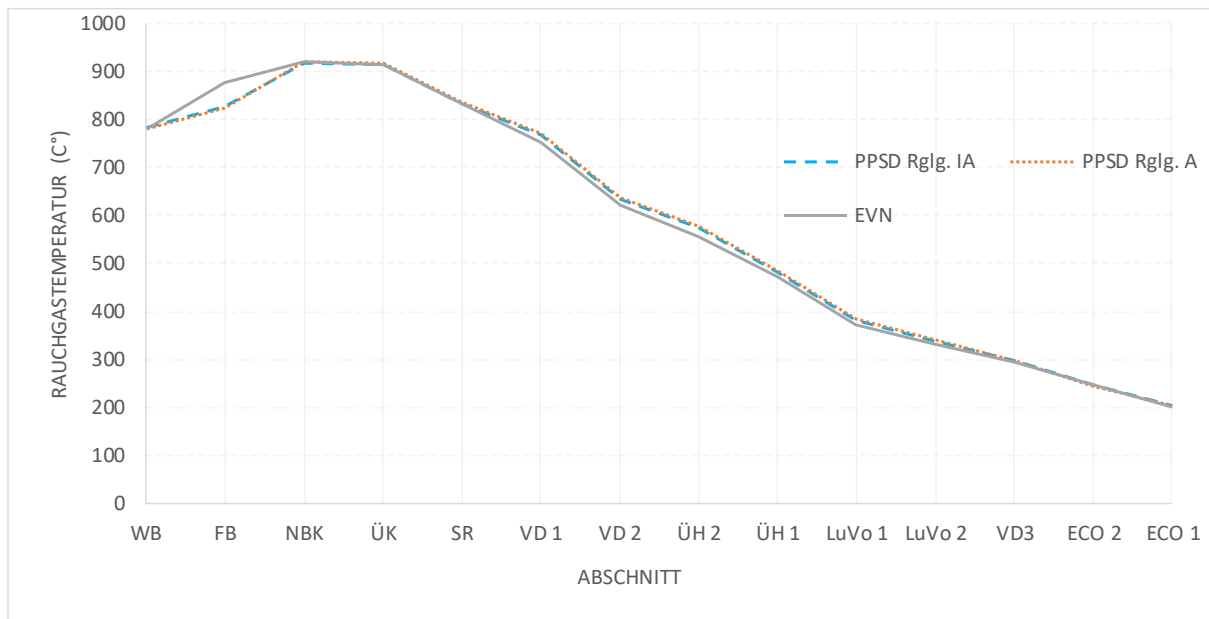


Diagramm 3.3-1: Temperaturprofile Rauchgas, VL

3.3.4.2.4 Wärmeleistungen

Wie bereits erwähnt, wurde für den Vergleich der Wärmeleistungen der Fall der inaktiven Regelung gewählt. In diesem Fall entspricht der Rauchgasmassenstrom annähernd jenem aus der Vorberechnung (vgl. Tabelle 3.3-4), welcher für die Berechnung der übertragbaren Wärmeströme eine wichtige Rolle spielt. Es sei gesagt, dass sich die Wärmeleistungen der Bündelheizflächen im zweiten Zug aus den Leistungen der Bündel samt den umliegenden Flossenwänden zusammensetzt.

| Bilanzzone | PPSD-Modell IA | Berechnung EVN | Abweichung |
|---------------|--------------------|----------------|-------------|
| | Wärmeleistung [kW] | | [%] |
| Strahlraum | 1530 | 1631 | -6.2 |
| VD 1 | 1241.08 | 1496 | -17.0 |
| VD 2 | 2429.47 | 2454 | -1.0 |
| ÜH 2 | 1020.08 | 1090 | -6.4 |
| ÜH 1 | 1629.11 | 1520 | 7.2 |
| Gesamt | 7849.74 | 8191 | -4.2 |

Tabelle 3.3-9: Wärmeleistungen des zweiten Zuges, VL

| Bilanzzone | PPSD-Modell IA | Berechnung EVN | Abweichung |
|------------|--------------------|----------------|------------|
| | Wärmeleistung [kW] | | [%] |
| LuVo 1 | 1728 | 1701 | 1.6 |
| LuVo 2 | 726 | 727 | -0.1 |

Tabelle 3.3-10: Wärmeleistungen der Luvos, VL

| Bilanzzone | PPSD-Modell IA | Berechnung EVN | Abweichung |
|---------------|--------------------|----------------|------------|
| | Wärmeleistung [kW] | | [%] |
| VD 3 | 695 | 616 | 12.8 |
| ECO 2 | 756 | 763 (korr.) | -0.9 |
| ECO 1 | 732 | 730 | 0.3 |
| Gesamt | 2183 | 2109 | 3.5 |

Tabelle 3.3-11: Wärmeleistungen des dritten Zuges, VL

Die gesamte Wärmeleistung der Heizflächen weicht insbesondere in den beiden Rauchgaszügen und bei den Rauchgas-Luvos wenig von der Vorberechnung ab (vgl. Tabelle 3.3-9, Tabelle 3.3-10, Tabelle 3.3-11). Es fallen aber signifikante Abweichungen bei den Leistungen der einzelnen Abschnitte auf. Mögliche Gründe für diese Abweichungen sollen nachfolgend erörtert werden.

Zweiter Zug

Die Abweichungen der Wärmeleistungen im ersten Zug beruhen - aller Voraussicht nach - auf folgenden Gründen:

Zum einen gibt es keine Kenntnis über die exakte Berechnungsmethodik der Wärmeübertragung seitens der EVN. Insbesondere bei der Wärmeübertragung eines Rauchgasstromes an Rohrbündel und umliegende Flossenwände gibt es unterschiedliche Berechnungsansätze, welche bestimmte Wärmeübertragungsphänomene an die jeweiligen Heizflächen unterschiedlich gewichten bzw. abschätzen (vgl. z.B. VDI-Wärmeatlas [19]). Des Weiteren gibt es auch in PPSD unzählige Einstellungen zum Verhalten der Wärmeübertragung zwischen Rauchgas und Heizelementen, als auch von Heizelementen untereinander. Hier eine plausible Einstellung zu finden, welche mit der Berechnungsmethodik der EVN exakt übereinstimmt, war nicht möglich. Aus diesem Grund wurden die Grundeinstellungen beibehalten. Diese Grundeinstellungen umfassen z.B. die Berechnung des Wärmeüberganges laut *FachverbandDampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau (FDBR)*. Im PPSD-Modell konnte die Wandfläche der Flossenwände im zweiten Zug nicht zur Gänze direkt durch Maßangaben definiert werden. Lediglich die Geometrie des Strahlraumes vor den Heizbündeln konnte mittels Maßangaben festgelegt werden. Die Wandfläche, welche die Heizbündel umgibt, resultiert in PPSD aus den Geometrien der Heizbündel selbst. So setzen sich die Wandflächen um die Bündel zusammen aus der Fläche unmittelbar um die Bündel als auch aus einer Fläche nach bzw. zwischen den Bündeln (vgl. Abbildung 3.3-7).

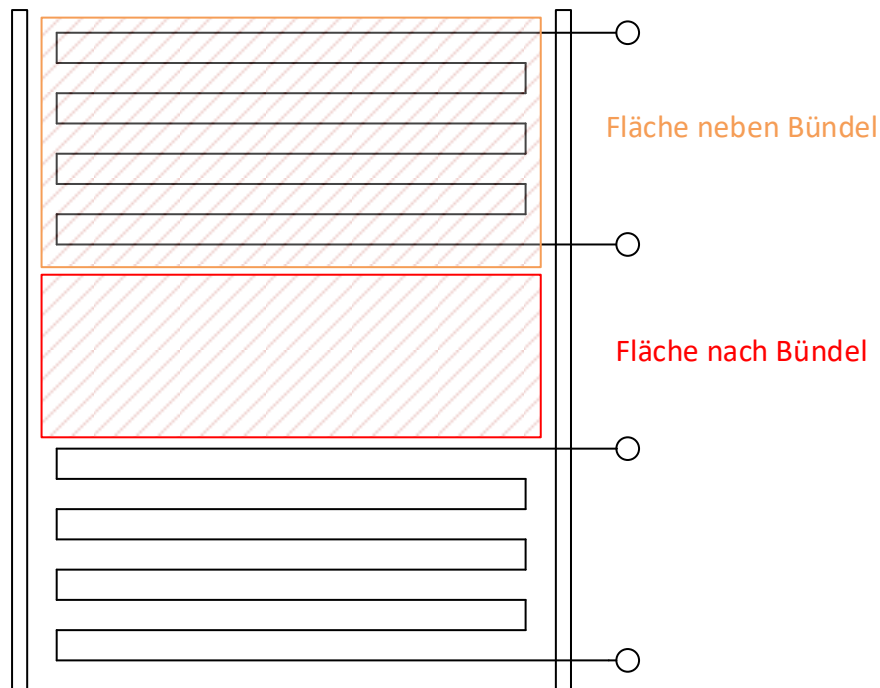


Abbildung 3.3-7: Bestimmung der Wandheizflächen um die Bündel in PPSD

PPSD berechnet somit die Wandheizflächen um die Bündel aus der Geometrie der modellierten Bündel und einem zu wählenden Wert für die Länge des leeren Abschnitts nach einem Bündel. Was aus der Vorberechnung bekannt war, war die Gesamtheizfläche der Wände des zweiten Zuges und dessen Querschnittsabmessungen. Im *PPSD*-Modell hatte man somit nur die Gesamtwandfläche des zweiten Zuges als Anhaltspunkt zur Modellierung. Diese deckt sich mit der Vorgabe. Für die Abstände zwischen bzw. nach den Bündeln wurde ein für Wartungszwecke üblicher Abstand gewählt. Daten über die Konstruktion der Heizbündel waren vorhanden so konnten diese relativ genau modelliert werden. Die resultierenden Heizflächen der Bündel in *PPSD* decken sich sehr gut mit den Werten aus der Vorberechnung. Lediglich der Abstand der Rohrbögen zur Wand konnte aus der Vorberechnung nicht entnommen werden. Dieser wurde anhand von Dispositionszeichnungen geschätzt.

Rauchgas-Luvos

Die Wärmeleistungen der Rauchgas-Luvos decken sich nahezu mit den Werten der Vorberechnung (vgl. Tabelle 3.3-10). Hier war eine exakte Modellierung der Konstruktion entsprechend der Vorberechnung möglich. Außerdem wird die gesamte Wärme hier von den Luvos übertragen. Es gibt kein anderes Heizelement, welches die Aufteilung der übertragenen Wärme beeinflusst.

Dritter Zug

Im dritten Zug wurde ein Wert aus der *EVN*-Berechnung korrigiert. Dabei handelte es sich um die Wärmeleistung des Economiser 2 (ECO2) (vgl. Tabelle 3.3-11). Dort wurde eine unverhältnismäßig große Abweichung festgestellt (>100%), welche auch in Absprache mit Verantwortlichen der *EVN* und aufgrund nachfolgender Begründung als Fehler eingestuft wurde.

Zum einen entspricht der ECO2 konstruktiv und funktionell exakt Economiser 1 (ECO1), dessen Wärmeleistung sehr gut dem Wert der *EVN*-Berechnung entspricht. Auch die Rauchgasgeschwindigkeiten decken sich sehr gut mit jenen aus der Vorberechnung. Somit kann auch der Einfluss dieses wichtigen Parameters auf diesen Fehler ausgeschlossen werden. Es ist zu erwähnen, dass sich die Rauchgasgeschwindigkeiten über den gesamten Rauchgasweg der Anlage im Wesentlichen mit jenen aus der Vorberechnung decken. Auch der Temperaturverlauf der Rauchgastemperaturen im dritten Zug deckt sich sehr gut mit den vorberechneten Werten (vgl. Diagramm 3.3-1 und Tabelle 3.3-8).

Infolge dieser Analogien wurde ein korrigierter Wert für die Wärmeleistung des ECO2 berechnet. Dafür wurde der Wärmestrom mittels Temperaturdifferenz, spez. Wärmekapazität und Massenstrom des Wassers im Bündel berechnet (vgl. Gleichung (5)). Bei den Werten für Temperaturdifferenz ΔT_W und Massenstrom m°_W des Wassers handelte es sich um Werte aus der *EVN*-Berechnung. Die Werte für die spezifische Wärmekapazität c_{pW} wurden mittels eines Wasser-Dampf-Berechnungstools ermittelt. Die Plausibilität dieser Vorgehensweise wurde geprüft, indem diese Berechnung auch für den ECO1 durchgeführt wurde. Der so berechnete Wert wurde mit der Wärmeleistung des ECO1 aus der *EVN*-Berechnung verglichen

Tabelle 3.3-12 zeigt die mittels Gleichung (5) ermittelten Werte, als auch den Vergleich der Werte des ECO1. Da die Abweichung im Fall des ECO1 sehr gering ausfällt wurde der berechnete Wert für den ECO2 als plausibel angenommen und zum Vergleich in Tabelle 3.3-11 herangezogen.

$$Q^{\circ} = m^{\circ}_W * c_{pW} * \Delta T_W \quad (5)$$

| | | |
|-------------------------------|------|-----|
| Q_{ECO2} berechnet | [kW] | 763 |
| Q°_{ECO1} berechnet | [kW] | 717 |
| Q°_{ECO1} laut EVN | [kW] | 730 |
| Abweichung Q°_{ECO1} | [%] | 1.8 |

Tabelle 3.3-12: Berechnung der korrigierten Wärmeleistung für ECO2, VL

3.3.4.3 Teillast (TL), Rauchgasseite

Nachfolgend sollen auch die wichtigsten Ergebnisse aus der Berechnung für den Teillastfall gegenübergestellt und diskutiert werden. Die Auflistung erfolgt wiederum in tabellarischer Form.

3.3.4.3.1 Leistungsdaten

| Bilanzzone | PPSD | | Berechnung EVN | Abweichung PPSD | |
|---------------------------|-------------|------------|----------------|-----------------|------------|
| | Regelung IA | Regelung A | | Regelung IA | Regelung A |
| | [%] | | | | |
| Nutzleistung [MW] | 8.09 | 8.09 | 8.16 | -0.9 | -0.9 |
| Wirkungsgrad indirekt [%] | 74.52 | 74.49 | 76 | -1.9 | -2.0 |

Tabelle 3.3-13: Nutzleistung und Wirkungsgrad, TL

Die resultierende Nutzleistung ist auch im Teillastfall in *PPSD* etwas geringer als in der Vorberechnung (vgl. Tabelle 3.3-13). Die Ursachen dafür wurden bereits in Abschnitt 3.3.4.2.1 behandelt. Auffällig ist, dass sich die Werte des *PPSD*-Modells im geregelten und ungeregelten Fall decken. In diesem Fall dürfte das Verhältnis der einzelnen Teilströme von Rezirkulationsgas und der sonstigen spezifischen Luftströme besser korrelieren. Die Frischdampfparameter werden im geregelten und ungeregelten Fall erreicht.

3.3.4.3.2 Rauchgasmassen- bzw. Volumenstrom

| Bilanzzone | PPSD | | Berechnung EVN | Abweichung PPSD | |
|--|-------------|------------|----------------|-----------------|------------|
| | Regelung IA | Regelung A | | Regelung IA | Regelung A |
| | [%] | | | | |
| Rauchgasmassenstrom m°_{RG} [kg/s] | 10.49 | 10.48 | 10.48 | 0.10 | 0.00 |
| Rauchgasvolumenstrom V°_{RG} [nm ³ /h] | 32966 | 32953 | 32974 | -0.03 | -0.06 |

Tabelle 3.3-14: Rauchgasmassen- bzw. Volumenstrom, TL

Die Rauchgasmassen- bzw. Volumenströme decken sich im Teillastfall nahezu exakt mit den Werten der Vorberechnung (vgl. Tabelle 3.3-14). Hier dürften die eingestellten Ströme von Rezirkulationsgas bzw. sonstiger Luft und deren Aufteilung sehr gut der Auslegung aus der Vorberechnung entsprechen.

3.3.4.3.3 Rauchgastemperaturen

Auch der Verlauf der Rauchgastemperaturen soll nachfolgend noch einmal für den Teillastfall verglichen werden; wiederum in die Züge unterteilt und auf die Austrittstemperaturen aus den jeweiligen Abschnitten bezogen.

| Bilanzzone | PPSD | | Berechnung EVN | Abweichung PPSD | |
|--------------------------------|-------------|------------|----------------|-----------------|------------|
| | Regelung IA | Regelung A | | Regelung IA | Regelung A |
| | [°C] | | | [%] | |
| Austritt Wirbelbett | 771 | 780 | 780 | -1.2 | 0 |
| Freiraum vor SL / Freeboard | 811 | 816 | 873 | -7.1 | -6.5 |
| Austritt Nabchrennkammer (NBK) | 888 | 886 | 888 | 0.0 | -0.2 |

Tabelle 3.3-15: Rauchgastemperaturen für den ersten Zug, TL

| Bilanzzone | PPSD | | Berechnung EVN | Abweichung PPSD | |
|-----------------------------------|-------------|------------|----------------|-----------------|------------|
| | Regelung IA | Regelung A | | Regelung IA | Regelung A |
| | [°C] | | | [%] | |
| Austritt Übergangskanal | 884 | 882 | 882 | 0.2 | 0.0 |
| Austritt Strahlraum | 798 | 797 | 795 | 0.4 | 0.3 |
| Austritt Verdampferbündel 1 (VD1) | 729 | 728 | 715 | 2.0 | 1.8 |
| Austritt Verdampferbündel 2 (VD2) | 596 | 595 | 585 | 1.9 | 1.7 |
| Austritt Überhitzer 2 (ÜH2) | 543 | 542 | 525 | 3.4 | 3.2 |
| Austritt Überhitzer 1 (ÜH1) | 454 | 454 | 445 | 2.0 | 2.0 |

Tabelle 3.3-16: Rauchgastemperaturen für den zweiten Zug, TL

| Bilanzzone | PPSD | | Berechnung EVN | Abweichung PPSD | |
|-----------------|-------------|------------|----------------|-----------------|------------|
| | Regelung IA | Regelung A | | Regelung IA | Regelung A |
| | [°C] | | | [%] | |
| Austritt Luvo 1 | 354 | 355 | 350 | 1.1 | 1.4 |
| Austritt Luvo 2 | 314 | 317 | 311 | 1.0 | 1.9 |

Tabelle 3.3-17: Rauchgastemperaturen der Luvos, TL

| Bilanzzone | PPSD | | Berechnung EVN | Abweichung PPSD | |
|-----------------------------------|-------------|------------|----------------|-----------------|------------|
| | Regelung IA | Regelung A | | Regelung IA | Regelung A |
| | [°C] | | | [%] | |
| Austritt Verdampferbündel 3 (VD3) | 282 | 283 | 281 | 0.4 | 0.7 |
| Austritt ECO 2 | 238 | 239 | 240 | -0.8 | -0.4 |
| Austritt ECO 1 | 194 | 195 | 199 | -2.5 | -2.0 |

Tabelle 3.3-18: Rauchgastemperaturen des dritten Zuges, TL

Auch im Teillastfall deckt sich der Temperaturverlauf des *PPSD*-Modells sehr gut mit den zuvor berechneten Ergebnissen der *EVN*. Ausnahme bildet wiederum die Temperaturabweichung im bzw. aus dem Freeboard (vgl. Tabelle 3.3-15 und Diagramm 3.2-2), deren Ursache bereits in Abschnitt 3.3.4.4.1 erläutert wurde.

In Diagramm 3.2-2 sind die Temperaturverläufe für den Teillastfall von *PPSD* jenen der Vorberechnung gegenübergestellt.

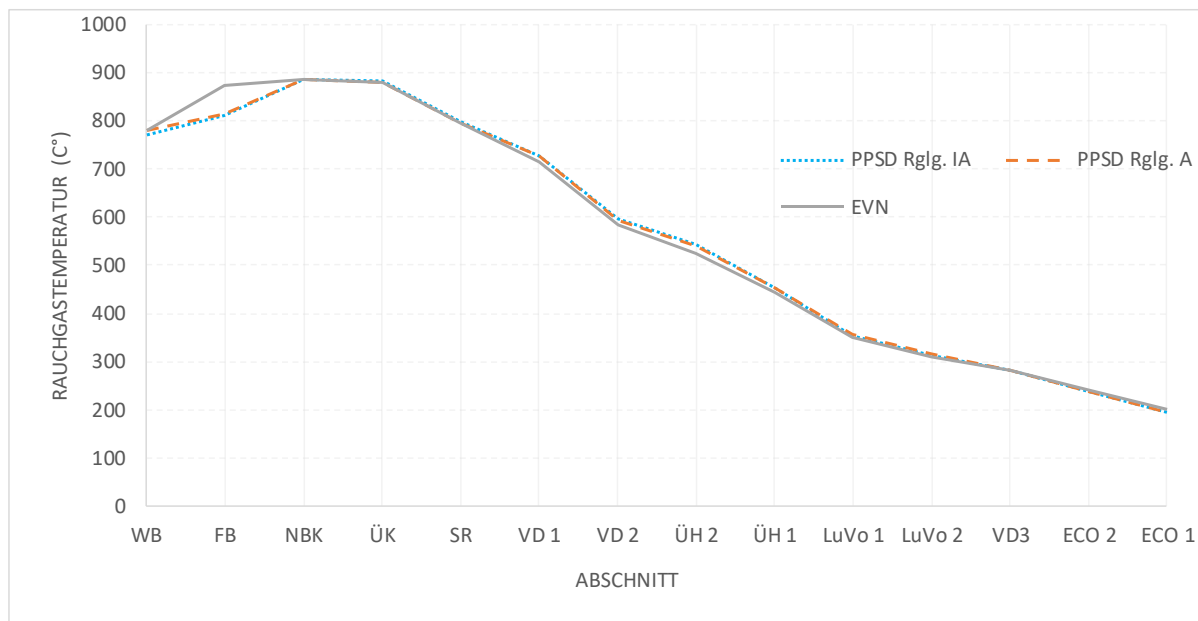


Diagramm 3.3-2: Temperaturprofile Rauchgas TL

3.3.4.3.4 Wärmeleistungen

Auch für den Teillastfall wurden die Wärmeleistungen der Heizelemente in bzw. zwischen zweitem und drittem Zug noch einmal ausgewertet (vgl. nachfolgende Tabellen).

| Bilanzzone | PPSD-Modell | Berechnung EVN | Abweichung |
|-------------------------|--------------------|----------------|-------------|
| | Wärmeleistung (kW) | | % |
| Flossenwände Strahlraum | 1352 | 1410 | -4.1 |
| VD 1 Wand | 1058 | 1267 | -16.5 |
| VD 2 Wand | 2013 | 2021 | -0.4 |
| ÜH 2 Wand | 779 | 831 | -6.2 |
| ÜH 1 Wand | 1235 | 1175 | 5.1 |
| Gesamt | 6438.26 | 6704 | -4.0 |

Tabelle 3.3-19: Wärmeleistungen des zweiten Zuges, TL

| Bilanzzone | PPSD-Modell | Berechnung EVN | Abweichung |
|------------|--------------------|----------------|------------|
| | Wärmeleistung (kW) | | % |
| LuVo 1 | 1441 | 1360 | 6.0 |
| LuVo 2 | 552 | 537 | 2.8 |

Tabelle 3.3-20: Wärmeleistungen der Luvos, TL

| Bilanzzone | PPSD-Modell | Berechnung EVN | Abweichung |
|---------------|--------------------|----------------|------------|
| | Wärmeleistung (kW) | | % |
| VD 3 | 441 | 418 | 5.5 |
| ECO 2 | 585 | 553 (korr.) | 5.8 |
| ECO 1 | 580 | 555 | 4.5 |
| Gesamt | 1606 | 1526 | 5.2 |

Tabelle 3.3-21: Wärmeleistungen des dritten Zuges, TL

Die Wärmeleistungen der Heizflächen folgen auch im Teillastfall den Charakteristiken des Volllastfalles (vgl. Abschnitt 3.3.4.2.4). Im Wesentlichen stimmen die Gesamtwärmeleistungen vom zweiten Zug, als auch den Luvos mit den von *EVN* berechneten Werten überein. Auch die Charakteristik der Abweichungen der Wärmeleistungen deckt sich mit den Ergebnissen aus dem Volllastfall (vgl. Abschnitt 3.3.4.3.4).

Beim Wert für den ECO 2 der *EVN*-Berechnung wurde wiederum ein Fehler festgestellt (vgl. Abschnitt 3.3.4.3.4) Deswegen wurde auch hier ein korrigierter, berechneter Wert (vgl. Gleichung (5)) verwendet.

3.3.4.4 Volllast (VL), Wasserseite

In diesem Abschnitt sollen die resultierenden Parameter der Wasserseite aus dem *PPSD*-Modell mit den Werten aus der Vorberechnung verglichen werden. Die Leistungen der Heizflächen wurden in Abschnitt 3.3.4.3.4 bereits mittels deaktivierter Regelung validiert. Deswegen werden in diesem Abschnitt nur mehr die Ergebnisse mit aktiver Regelung aus *PPSD* zum Vergleich herangezogen.

3.3.4.4.1 Temperaturen

In Tabelle 3.3-22 sind die Temperaturen des Wassers von der Speisewasserpumpe bis zum Frischdampfaustritt gelistet. Die Temperaturen beziehen sich, mit Ausnahme des Verdampfersystems, wieder auf den Austritt aus dem jeweiligen Abschnitt.

| Bilanzzone | PPSD Regelung A | Berechnung EVN | Abweichung |
|-----------------------------|--------------------|----------------|------------|
| | [°C] | | [%] |
| Austritt Speisewasserpumpe | 130 | 130 | 0.0 |
| Austritt ECO 1 | 179 | 176 | 1.5 |
| Austritt ECO 2 | 228 | 223 | 2.2 |
| Verdampfersystem | 251 | 253 | -0.6 |
| Austritt ÜH 1 | 398 | 374 | 6.4 |
| Austritt EK | 307 | 310 | -0.8 |
| Austritt ÜH 2 (Frischdampf) | 400 | 400 | 0.0 |

Tabelle 3.3-22: Wassertemperaturen, VL

Die Wasser- bzw. Dampftemperaturen decken sich sehr gut mit den Ergebnissen der Vorberechnung, was aufgrund der gut übereinstimmenden Wärmeleistungen (vgl. Abschnitt 3.3.4.2.4) durchaus zu erwarten war. Die größte Abweichung besteht bei der Austrittstemperatur aus ÜH 1. Die höhere Austrittstemperatur im *PPSD*-Modell resultiert aus der höheren Wärmeleistung dieses Bündels. Die Temperatur im Verdampfersystem ist im *PPSD*-Modell etwas geringer als in der Vorberechnung. Grund dafür ist die - in Summe -

etwas geringere Wärmeleistung der Verdampferheizelemente des *PPSD*-Modells (vgl. Abschnitt 3.3.4.2.4).

3.3.4.4.2 Drücke/Druckverluste

Tabelle 3.3-23 zeigt die Drücke bzw. Druckverluste wichtiger Abschnitte im Wasser-Dampf-System.

| Bilanzzone | PPSD Regelung A | Berechnung EVN | Abweichung |
|-----------------------------------|--------------------|----------------|------------|
| | [bar] | | [%] |
| Druck Austritt Speisewasserpumpe | 54.7 | 57.7 | -5.2 |
| Druck Eintritt ECO 1 | 41.7 | 45.3 | -7.9 |
| Druck Austritt ECO 2 | 41.3 | k.A. | k.A. |
| Druck Verdampfersystem | 40.4 | 41.5 | -2.7 |
| Druck Austritt ÜH 1 | 40.2 | 41.2 | -2.4 |
| Druck Austritt EK | 40.2 | 40.8 | -1.5 |
| Druck Austritt ÜH 2 (Frischdampf) | 40 | 40 | 0.0 |
| Druckverlust Gesamtsystem | 14.7 | 17.7 | -16.9 |

Tabelle 3.3-23: Wasser - bzw. Dampfdrücke

Wie bereits in Abschnitt 3.3.3.3 erwähnt, ist der wasserseitige Druckverlust im *PPSD*-Modell wesentlich geringer als in der Vorberechnung von *EVN* (vgl. Tabelle 3.3-23). Mögliche Ursachen dafür sind u.a. mangelnde Kenntnis über die Geometrien der Rohrleitungen, welche für die Druckverlustrechnung notwendig wären. Außerdem sind in *PPSD* in Rohrleitungen und Heizelementen die geodätischen Höhendifferenzen festzulegen, welche das Wasser bzw. der Dampf überwinden muss. Auch diese Höhendifferenzen waren aus der Vorberechnung nicht bekannt. Aus diesem Grund wurden Rohrlängen und geodätische Höhendifferenzen wiederum anhand der vorliegenden Dispositionszeichnungen abgeschätzt. Außerdem bestand keine Kenntnis über Rohrwiderstandsbeiwerte und deren Berücksichtigung seitens *EVN*-Vorberechnung. Diese wurden in *PPSD* standardmäßig laut „Help-files“ eingestellt. Ein weiterer Einflussfaktor ist, dass im *PPSD*-Modell kein Druckverlust im Einspritzkühler stattfindet; in der Vorberechnung jedoch schon. Für diesen Umstand lag zu wenig Kenntnis über das Verhalten bzgl. Druckverlusten von Einspritzkühlern vor. Der Druckverlust, welcher zwischen Speisewasserpumpe und ECO 1 stattfindet, wurde in *PPSD* gemäß der Vorberechnung festgelegt.

Es ist zu erwähnen, dass in den Unterlagen der Vorberechnung ein Zahlensturz passiert sein dürfte. Dort waren bei einigen Heizelementen eindeutig falsche Zahlenwerte für die Drücke hinterlegt (z.B. ECO 1 Austritt, ECO 2 Ein-, Austritt). Somit waren die Druckverluste dieser einzelnen Heizelemente schwer zu vergleichen (vgl. Tabelle 3.3-23).

3.3.4.5 Q-t-Diagramm

Anhand eines Q-t-Diagrammes lässt sich die Funktion, als auch die Schaltung der Heizelemente in einem Dampferzeuger ablesen. Im Zuge dieser Modellierung dient es auch dazu, die Plausibilität des Modells zu überprüfen. Diagramm 3.3-3 stellt das Q-t-Diagramm für den Vollastfall dar. Es wurde automatisch von *PPSD* erstellt.

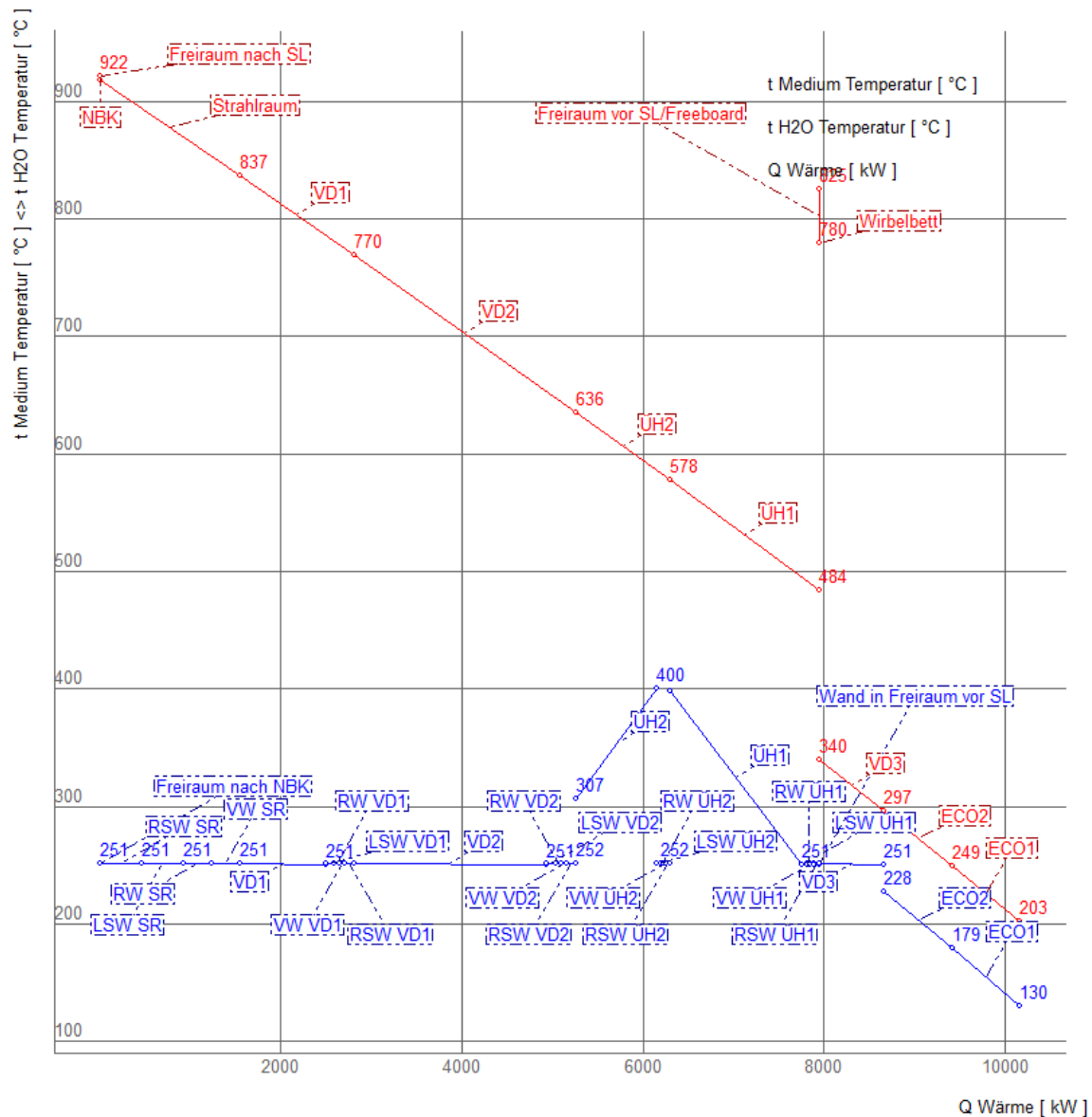


Diagramm 3.3-3: Q-t Diagramm für den Vollastfall

Der Temperaturverlauf des Rauchgases ist sehr klar erkennbar (rote, durchgehende Linien). Insbesondere im Bereich von VD1, VD2, ÜH1, ÜH2 ist der stetige Verlauf der Rauchgastemperatur ein Indiz für die realitätsnahe Modellierung der Bündel samt der umliegenden Flossenwände. Dadurch, dass das Rauchgas die Wärme in diesem Bereich gleichzeitig an Bündel und Wände abgibt, ergeben sich keine Sprünge im

Temperaturverlauf. Der deutliche Temperatursprung von 484°C auf 340°C kennzeichnet die Rauchgasabkühlung durch die Luvos.

Der Verlauf der blauen, durchgehenden Linien kennzeichnet sehr gut wo das Rauchgas Wärme an das Wasser-Dampf-System abgibt. Die waagrechten Verläufe zeigen die Wärmeabgabe an verdampfende Elemente. Es fällt auf, dass diese waagrechten Verläufe in sehr viele, kleine Abschnitte geteilt sind. Grund dafür ist, dass die Flossenwände in jedem Abschnitt in Vorder- und Rückwand bzw. linke und rechte Seitenwand unterteilt sind. Deswegen ist jede dieser Wände im Diagramm als eigene Heizfläche eingezeichnet. Die Verläufe mit positiver oder negativer Steigung kennzeichnen die Wärmeaufnahme bzw. Temperaturerhöhung in Überhitzern bzw. Economisern.

Die kurzen, senkrechten, roten Linien kennzeichnen das Rauchgas im ersten Zug (Wirbelbett, Freeboard, NBK, Freiraum nach SL). Wie bereits in Abschnitt 3.3.3.1 beschrieben wurde, wurden der Funktion halber, Wasser-Dampf-Heizflächen (Strahlräume) in den ersten Zug eingefügt. Da der erste Zug aber adiabat sein sollte, wurden diese mit entsprechenden Einstellungen derart gestaltet, dass sie keine Wärme aufnehmen. Dass diese Einstellungen funktionieren und keine Wärme übertragen wird, wird durch den senkrechten Verlauf bestätigt. Da *PPSD* diese Heizflächen bzw. auch die Brennkammerelemente jedoch im Verdampfer-System erkennt bzw. diese dem Verdampfer-System zuordnet, sind sie im Diagramm eingezeichnet.

3.3.4.6 Abschätzung des Anlagengewichtes

Seitens *EVN* wurde auch nach einer Abschätzung des Anlagengewichtes verlangt. Diese Abschätzung erfolgte anhand von *PPSD* berechneter Gewichte einzelner Elemente. Dabei handelte es sich ausschließlich um Heizflächen und Komponenten im Wasser-Dampf-System.

Die zu verwendenden Werkstoffe dieser Elemente waren seitens *EVN* bekannt. Dementsprechend wurden sie auch in den Modell-Einstellungen gewählt. Wie bereits in Abschnitt 3.1.2 erwähnt, verfügt *PPSD* u.a. über eine umfangreiche Datenbank an Werkstoffen.

In *PPSD* wurden folgende Elemente für die Berechnung des Anlagengewichtes berücksichtigt: Dampftrommel, Verdampfer, Economiser, Überhitzerbündel, Primär-, Sekundärluftvorwärmer, Rohrleitungen.

Die Rohrleitungen umfassen alle modellierten Rohrleitungen im Wasser-Dampf-System. Auch Eintritts- und Austritts-Sammler wurden in *PPSD* mittels Rohrleitungen modelliert.

Somit ergab sich laut *PPSD*-Auswertung ein Anlagengewicht von 88,3 Tonnen.

4 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit konnten zwei funktionierende Modelle mit den Programmen *IPSEpro* und *KED PPSD* für die Simulation einer Klärschlammmonoverbrennungsanlage erstellt werden.

In *IPSEpro* wurde ein Gesamtprozess zur Monoverbrennung von Klärschlamm modelliert. Dieser Gesamtprozess umfasst die vorgelagerte Trocknung des Schlammes, die Feuerung in einer stationären Wirbelschicht und einen nachgelagerten Dampfkraftprozess. In diesem Modell lag der Fokus auf der Wärmeintegration des Prozessdampfes, als auch auf der Modellierung der stationären Wirbelschichtfeuerung. Dafür wurden 2 separate Brennkammermodelle erstellt. In einem wurde das Wirbelbett mittels *IPSEpro*-Brennkammerelement dargestellt. Im anderen mittels *IPSEpro*-Vergaserelement. Der Vergleich der Simulationsergebnisse zeigte, dass die Verwendung des Vergaserelementes die Vorgänge im Wirbelbett einer Wirbelschichtfeuerung plausibler darstellt. Die Simulation des Gesamtprozess-Modells hat gezeigt, dass die benötigte Wärme für die internen Verbraucher, wie Trockner oder Luftvorwärmer, zur Gänze durch den Dampf nach der Turbine bereitgestellt werden kann.

Das *PPSD*-Modell wurde anhand konstruktiver Daten einer vorab von der *EVN* in Auftrag gegebenen Berechnung erstellt. Es umfasst die Darstellung einer stationären Wirbelschichtfeuerung von Klärschlamm und dem anschließenden Abhitze-Dampferzeuger. Die Simulation in diesem Modell bestätigte die Berechnungsergebnisse der Vorab-Berechnung weitestgehend. Der Abgleich erfolgte im Wesentlichen durch den Vergleich der Rauchgastemperaturprofile. In weiterer Folge wurden die Leistungen der Heizflächen verglichen. Dort wurden Abweichungen bei den Leistungen einzelner Heizflächen festgestellt. Diese Abweichungen lassen sich damit begründen, dass die Berechnungsmethoden von *PPSD* und der Vorberechnung für die Wärmeübertragung in den Rauchgaszügen nicht exakt verglichen bzw. aufeinander abgestimmt werden konnten. Die Modellierung der stationären zweistufigen Wirbelschichtfeuerung erfolgte dahingehend erfolgreich, als dass der im Wirbelbett stattfindende unterstöchiometrische Verbrennungsvorgang dargestellt werden konnte. Des Weiteren wurde eine Abschätzung des Anlagengewichtes durchgeführt. Diese berücksichtigt die Dampftrommel als auch alle Heizflächen und Rohrleitungen des Modells.

Anhang

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 2.1-1: Schema einer stationären und zirkulierenden WSF | 3 |
| Abbildung 2.1-2: Strömungszustände in einer stationären Wirbelschicht | 4 |
| Abbildung 2.1-3: Druckverlust in einer Wirbelschicht in Abhängigkeit der Fluidisierungsgeschwindigkeit | 4 |
| Abbildung 2.1-4: Existenzbereich der Wirbelschicht | 5 |
| Abbildung 2.1-5: Verhältnis von abzuführender Wärmemenge Q°_A zu freigesetzter Wärmemenge Q°_F in Abhängigkeit vom Heizwert | 6 |
| Abbildung 2.1-6: Temperaturprofile von Brennstoffen geordnet nach steigendem Anteil an flüchtigen Bestandteilen (v.l.n.r). Strichlierte Linie entspricht der Betthöhe | 7 |
| Abbildung 2.2-1: Schematische Darstellung eines Etagenofens | 11 |
| Abbildung 2.2-2: Schematische Darstellung eines Etagenwirblers | 12 |
| Abbildung 2.2-3: Vorgänge bei der Verbrennung von Klärschlamm-Pellets | 15 |
| Abbildung 2.2-4: Pyrolyseprodukte abhängig von der Temperatur | 16 |
| Abbildung 2.2-5: Einfluss gestufter Verbrennung auf NO_x - und N_2O -Emissionen von trockenem Klärschlammgranulat | 21 |
| Abbildung 2.2-6: Einfluss des Luftüberschusses auf die NO_x -Emissionen von trockenem und nassem, unbehandeltem Klärschlamm | 21 |
| Abbildung 2.2-7: Einfluss des Wassergehaltes auf die CO -Emissionen | 22 |
| Abbildung 2.2-8: Einfluss der Freeboard-Temperatur auf die CO -Emissionen | 22 |
| Abbildung 3.1-1: Struktur der IPSEpro-Module | 23 |
| Abbildung 3.2-1: Klärschlamm-trocknung im IPSEpro-Modell | 27 |
| Abbildung 3.2-2: Brennkammermodell mit Brennkammerelement zur Simulation des Wirbelbettes | 29 |
| Abbildung 3.2-3: Brennkammermodell mit Vergaserelement zur Simulation des Wirbelbettes | 29 |
| Abbildung 3.2-4: Darstellung des Dampferzeugers samt Feuerung des IPSEpro-Gesamtprozesses | 32 |
| Abbildung 3.2-5: Wasser-Dampf-Weg nach der Turbine im IPSEpro-Modell | 33 |
| Abbildung 3.2-6: Abbildung des Gesamtprozesses in IPSEpro | 36 |
| Abbildung 3.3-1: Schema der zu modellierenden Anlagenkonfiguration | 38 |
| Abbildung 3.3-2: PPSD-Modell Rauchgasseite | 41 |
| Abbildung 3.3-3: Brennkammer im PPSD-Modell | 43 |
| Abbildung 3.3-4: Zweiter und dritter Zug auf Rauchgasseite PPSD-Modell | 44 |
| Abbildung 3.3-5: Wasserseite des PPSD-Modells | 45 |
| Abbildung 3.3-6: Verdampfersystem im PPSD-Modell | 46 |
| Abbildung 3.3-7: Bestimmung der Wandheizflächen um die Bündel in PPSD | 54 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 2.2-1: Hauptkomponenten im Pyrolysegas von thermisch getrocknetem Klärschlamm | 16 |
| Tabelle 3.2-1: Luft und Rauchgasparameter für das Wirbelbett für beide Brennkammermodelle | 30 |
| Tabelle 3.2-2: Ergebnisse der Parametervariation | 34 |
| Tabelle 3.3-1: Gegebene Brennstoffeigenschaften | 40 |
| Tabelle 3.3-2: Eckdaten der Lastfälle | 49 |
| Tabelle 3.3-3: Nutzleistung und Wirkungsgrad, VL | 49 |
| Tabelle 3.3-4: Rauchgasmassen-/Volumenstrom des ersten und zweiten Zuges, VL | 50 |
| Tabelle 3.3-5: Rauchgastemperaturen des ersten Zuges, VL | 50 |
| Tabelle 3.3-6: Rauchgastemperaturen des zweiten Zuges, VL | 51 |
| Tabelle 3.3-7: Rauchgastemperaturen der Rauchgas-Luvos, VL | 51 |
| Tabelle 3.3-8: Rauchgastemperaturen des dritten Zuges, VL | 51 |
| Tabelle 3.3-9: Wärmeleistungen des zweiten Zuges, VL | 52 |
| Tabelle 3.3-10: Wärmeleistungen der Luvos, VL | 53 |
| Tabelle 3.3-11: Wärmeleistungen des dritten Zuges, VL | 53 |
| Tabelle 3.3-12: Berechnung der korrigierten Wärmeleistung für ECO ₂ , VL | 55 |
| Tabelle 3.3-13: Nutzleistung und Wirkungsgrad, TL | 56 |
| Tabelle 3.3-14: Rauchgasmassen- bzw. Volumenstrom, TL | 56 |
| Tabelle 3.3-15: Rauchgastemperaturen für den ersten Zug, TL | 57 |
| Tabelle 3.3-16: Rauchgastemperaturen für den zweiten Zug, TL | 57 |
| Tabelle 3.3-17: Rauchgastemperaturen der Luvos, TL | 57 |
| Tabelle 3.3-18: Rauchgastemperaturen des dritten Zuges, TL | 57 |
| Tabelle 3.3-19: Wärmeleistungen des zweiten Zuges, TL | 58 |
| Tabelle 3.3-20: Wärmeleistungen der Luvos, TL | 58 |
| Tabelle 3.3-21: Wärmeleistungen des dritten Zuges, TL | 58 |
| Tabelle 3.3-22: Wassertemperaturen, VL | 59 |
| Tabelle 3.3-23: Wasser - bzw. Dampfdrücke | 60 |

Diagrammverzeichnis

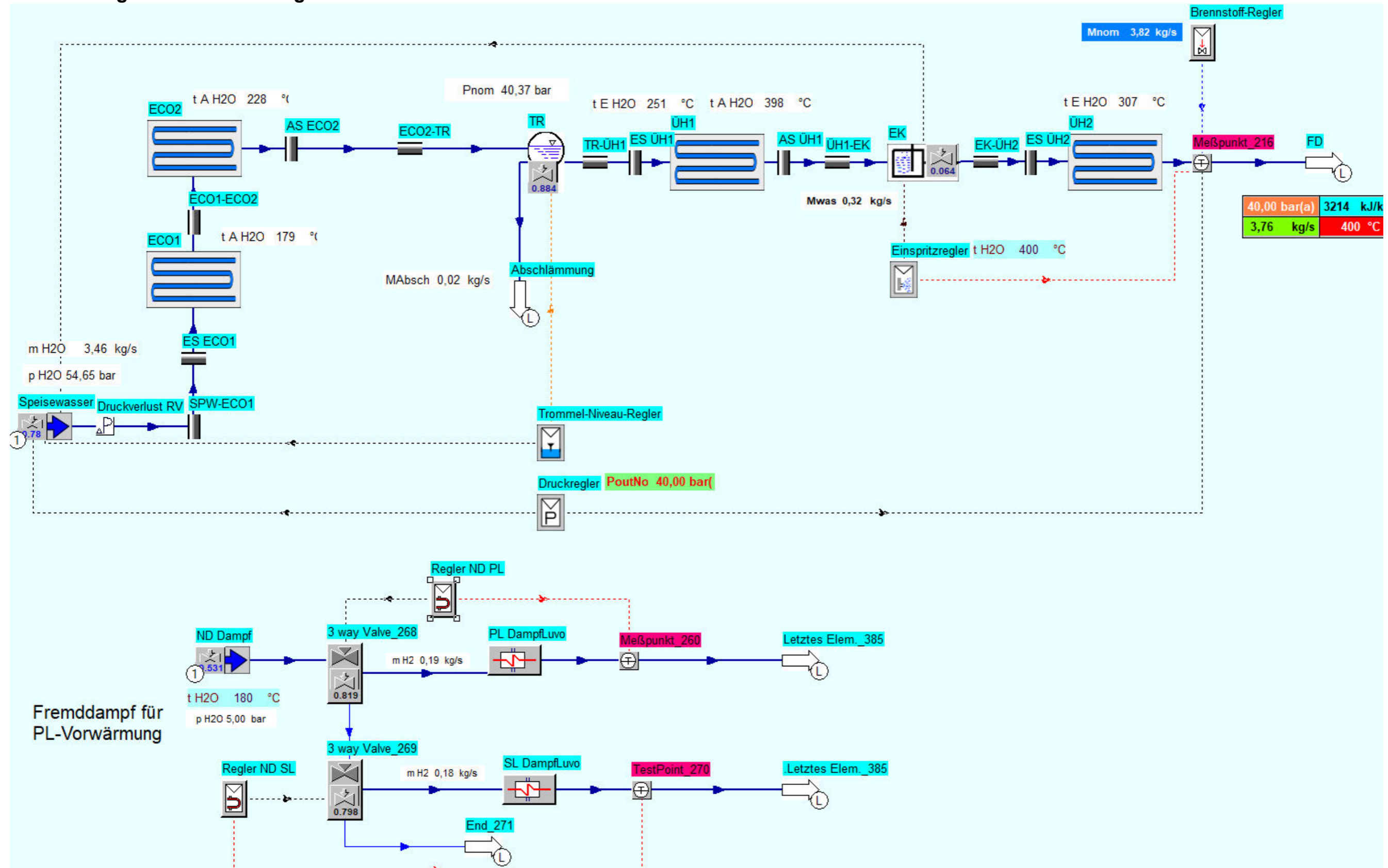
| | |
|--|----|
| Diagramm 3.2-1: Temperaturprofile Rauchgas VL | 52 |
| Diagramm 3.2-2: Temperaturprofile Rauchgas TL | 58 |
| Diagramm 3.2-3: Q-t Diagramm für den Vollastfall | 61 |

Literatur

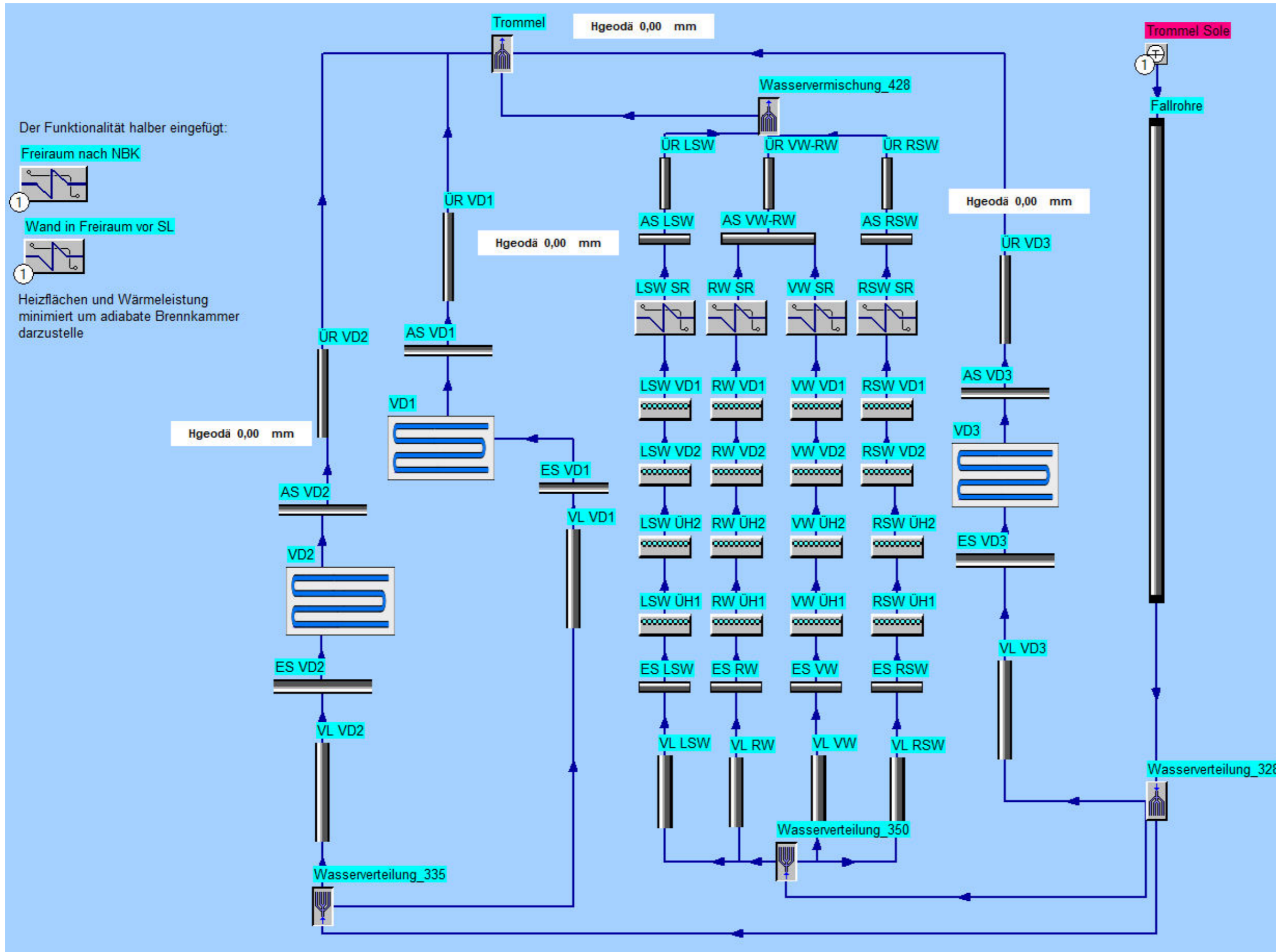
1. Effenberger H (2000). Dampferzeugung. VDI-Buch. Springer, Berlin. S.84-96, 205-239
2. Strauss K (2016). Kraftwerkstechnik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. S.172-181
3. Leckner B (2013). Atmospheric (non-circulating) fluidized bed (FB) combustion. Fluidized Bed Technologies for Near-Zero Emission Combustion and Gasification: S.641–668
4. Werther J, Ogada T (1999). Sewage sludge combustion. Progress in Energy and Combustion Science 25: S.55–116
5. Lehrmann F (2013). Überblick über die thermische Klärschlammbehandlung: Trocknung, Monoverbrennung und Mitverbrennung. Energie aus Abfall, Band 10. TK, Neuruppin. S.901-926
6. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2017). Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2017, Teil 1. Wien
7. Cui H, Ninomiya Y, Masui M, Mizukoshi H, Sakano T, Kanaoka C (2006). Fundamental Behaviors in Combustion of Raw Sewage Sludge. Energy Fuels 20(1): S.77–83
8. Turovskii IS, Mathai PK (2010). Wastewater sludge processing. Wiley-Interscience, Hoboken, N.J
9. Syed-Hassan SSA, Wang Y, Hu S, Su S, Xiang J (2017). Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: Fundamentals, challenges and considerations. Renewable and Sustainable Energy Reviews 80: S.888–913
10. Ogada T, Werther J (1996). Combustion characteristics of wet sludge in a fluidized bed: Release and combustion of the volatiles. Fuel 75(5): S.617–626
11. Hartman M, Svoboda K, Pohořelý M, Trnka O (2005). Combustion of Dried Sewage Sludge in a Fluidized-Bed Reactor. Ind. Eng. Chem. Res. 44(10): S.3432–3441
12. Kaltschmitt M, Hartmann H, Hofbauer H (2009). Energie aus Biomasse. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. S.416-426
13. Oladejo J, Shi K, Luo X, Yang G, Wu T (2019). A Review of Sludge-to-Energy Recovery Methods. Energies 12(1): S.60
14. Han X, Niu M, Jiang X, Liu J (2012). Combustion Characteristics of Sewage Sludge in a Fluidized Bed. Ind. Eng. Chem. Res. 51(32): S.10565–10570
15. Sängler M, Werther J, Ogada T (2001). NO_x and N₂O emission characteristics from fluidised bed combustion of semi-dried municipal sewage sludge. Fuel 80(2): S.167–177
16. SimTech GmbH (2019). Homepage der Simtech GmbH. unter <http://simtechnology.com/CMS/index.php/ipsepro>
17. SimTech GmbH IPSEpro Dokumentation. Manual Version 4.0.001
18. Kerntechnik Entwicklung Dynamik KED GmbH (2019) Homepage der KED GmbH. unter <http://www.ked.de>

-
19. Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (2013). VDI-Wärmeatlas. Mit 320 Tabellen, 11. Aufl. VDI-Buch: Springer Vieweg, Berlin. S. 23-33, 819-823, 825-836, 1115-1126, 1129-1137.

B: Vergrößerte Darstellung des PPSD-Modells auf Wasserseite



C: Vergrößerte Darstellung des Verdampfersystems im PPSD-Modell



D: Vergrößerte Darstellung des IPSEpro-Modell

