



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

Entwicklung und Parametrierung eines digitalen Zwillings für eine Sondermüllverbrennungsanlage

AUSGEFÜHRT ZUM ZWECKE DER ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES EINES
„DIPLOM-INGENIEUR“

UNTER DER LEITUNG VON

UNIV.PROF.I.R.DIPL.-ING.DR.TECHN. HERMANN HOFBAUER

INSTITUT FÜR VERFAHRENSTECHNIK, UMWELTTECHNIK UND TECHNISCHE
BIOWISSENSCHAFTEN

BETREUUNG:

ING.DIPL.-ING.DR.TECHN. STEFAN MÜLLER

DIPL.-ING. MARTIN HAMMERSCHMID

VON

JAKOB NEMETH, BSC

MATR.-Nr. 01526498

WIEN AM 26. JULI 2023

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung
Diplomarbeit
nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht. Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, 26. Juli 2023

Unterschrift

Jakob Nemeth

I

Vorwort

Sehr großer Dank gilt meinem über das übliche Maß hinaus motivierten Betreuer Dipl.-Ing. Martin Hammerschmid, der mich von Beginn an tatkräftig unterstützt hat. Auch gilt ein großes Dankeschön Ing. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Müller für die Möglichkeit diese Arbeit am Institut zu verfassen und Herrn Univ.Prof.I.R. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Hofbauer für die Leitung dieser Diplomarbeit. Auch möchte ich mich hier für die Möglichkeit einer Verschiebung des Abgabetermins aufgrund privater Verwerfungen bedanken.

Ich möchte mich auch vielfach bei meiner Familie und meinem engen Umfeld für die Unterstützung bedanken. Auch, wenn sich ein paar Familienmitglieder vorsorglich ans andere Ende der Welt abgesetzt haben. Besonderer Dank ergeht hierbei auch an Ana und Blake für die moralische Unterstützung und an Sebastian für die literarische Betreuung.

Ein weiterer Dank ergeht an das Team der Wien Energie am Standort Simmeringer Haide und das Team des Projektes Thermal Twin 4.0 für die zur Verfügung gestellten Prozessdaten, ohne die eine aussagekräftige Berechnung nicht möglich gewesen wäre.

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit befasst sich mit der Müllverbrennung im Allgemeinen am Beispiel Österreichs und erläutert dabei die technischen Herausforderungen, sowie die verschiedenen Typen der Müll- und Sondermüllverbrennung. Darüber hinaus wird erklärt, was sich hinter einem digitalen Zwilling verbirgt und ein Blick auf die Anfänge der digitalen Zwillinge sowie deren aktuelle Einsatzmöglichkeiten, insbesondere mit Blick auf die Industrie und die Kraftwerkstechnik, geworfen. Anschließend werden verschiedene Softwareumgebungen und kommerzielle Simulationsprogramme miteinander verglichen, um herauszufinden, welches Programm für das Erstellen eines Modells in diesem Bereich am geeignetsten erscheint. Danach wird anhand einer realen Sondermüllverbrennungsanlage ein vereinfachter digitaler Zwilling erstellt und überprüft, inwiefern die Möglichkeit besteht, mithilfe eines digitalen Zwillings die Zusammensetzung unbekannter Brennstoffe zu berechnen, was als Ausgangspunkt für zukünftige Optimierungen in diesem Bereich gesehen werden kann. Abschließend werden die auf diese Art erhaltenen Ergebnisse ausgewertet und Verbesserungsmöglichkeiten für zukünftige Ansätze aufgezeigt.

Abstract

This thesis will take a look at the waste incineration in general and focus on the austrian perspective paired with explaining the technical challenges and different types of residential and harmful waste incineration. After that there will be an explanation of what a digital twin actually is and a brief history of the development of digital twins with a closer look on the usage in the industry and power plants. Following that there will be a comparison of different software environments that can be utilized to build a dynamic model of such kind of systems and also an explanation on why this exact commercial software was used in this thesis. In the second part there will be the building of a digital twin and it is checked, if it is possible to calculate the composition of an unknown fuel, which can be seen as a starting point for future improvements. In the end there will be a presentation of the results gathered in this simulations and potential improvements for the future.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Thermische Behandlung von Abfällen und Reststoffen in Österreich	2
2.1	Abfallbehandlung in Österreich	2
2.2	Müllverbrennungsanlage	6
2.3	Sondermüllverbrennungsanlage Wien Simmeringer Haide	16
3	Methodik des digitalen Zwillinges	22
3.1	Definition eines digitalen Zwillinges	22
3.2	5-D-Modell	23
3.3	Arten von digitalen Zwillingen	24
3.4	Stand der Technik	25
3.5	Aktuelle Herausforderungen im Umgang mit digitalen Zwillingen	28
3.6	Die virtuelle Sicherheit des digitalen Zwillinges	28
3.7	Digitaler Zwilling und Big Data	29
3.8	Simulationsumgebung des digitalen Zwillinges	30
4	Simulationsumgebung IPSEpro Dynamics	32
4.1	Eingabe sich zeitlich ändernder Parameter	33
4.2	Erstellung eines instationären Objekts	35
4.3	Verweilzeit	37
4.4	Fehlersuche	38
5	Architektur des digitalen Modells	39
5.1	Die physische Anlage	40
5.2	Das Simulationsmodell	41
5.2.1	Submodelle	41
5.2.2	Gesamtmodell	43
5.2.3	Modelltestung	44
5.2.4	Parametrierung	45
5.3	Die Anwendungen	52
5.4	Das Datenmanagement	54
5.5	Die Datenkommunikation	57
6	Einsatz des digitalen Modells	57
6.1	Solverparameter	58
6.2	Energieströme im Drehrohrofen	58
6.3	Bestimmung einer unbekanntes Brennstoffzusammensetzung	59
6.4	Optimierungsmöglichkeiten durch das digitale Modell	74
7	Conclusio	76
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	76
7.2	Verbesserungsmöglichkeiten für zukünftige Modelle	77

1 Einleitung

Den Anstoß zu dieser Arbeit gab das Projekt „Thermal Twin 4.0“ der Wien Energie. Ziel des Projektes ist es, einen digitalen Zwilling der Sondermüllverbrennungsanlage in der Simmeringer Haide zu erstellen, um damit eine Optimierung der Anlage hinsichtlich Energieeffizienz und Verringerung des CO₂-Ausstoßes zu erreichen. Zusätzlich wurde in einer vorangegangenen Abschlussarbeit[1] eine statische Simulation der Sondermüllverbrennungsanlage durchgeführt. Eine dynamische Simulationsmöglichkeit unter Zuhilfenahme eines digitalen Zwillings ist somit noch ausständig. Ein solcher soll in dieser Diplomarbeit erstellt werden. Gerade im Bereich der Sondermüllverbrennung ist der laufende Betrieb eine Gratwanderung zwischen höchstmöglicher Effizienz und gesicherter Einhaltung der vorgegebenen Abgasgrenzwerte. So wird zum Beispiel die Effizienz des Verbrennungsprozesses durch einen erhöhten Luftüberschuss vermindert, gleichzeitig ist aber ein gewisser Spielraum bis zum Erreichen von lokalem Sauerstoffmangel im Brennraum vorhanden, mit dem wiederum Lastspitzen abgefangen werden können. Das Auftreten der besagten Lastspitzen lässt sich aber nur mit einer ausreichenden Datenlage in Bezug auf den eingesetzten Brennstoff und dessen Dosierbarkeit vorhersagen. Da aber die zu verbrennenden Stoffen mitunter gefährliche Abfälle sind, ist eine ausreichende Beprobung nicht hinreichend möglich. Die sehr heterogenen Sondermüllfraktionen werden in 7 unterschiedlichen Aufgabeschienen aufgegeben und thermisch verwertet. Somit sind bei der Regelung von Sondermüllverbrennungsanlagen die Anlagenfahrer besonders gefordert, um rechtzeitig einzugreifen, und eine passende Regelung des Verbrennungsvorganges sicherzustellen. Um diese Anlagen bei den gegebenen Bedingungen in Zukunft effizienter bedienen und mitunter auch neue Anlagen besser auslegen zu können, wird notwendig sein, möglichst viele Informationen über die Zusammensetzung des Brennstoffes zu haben. Hierzu soll eine Brennstoffdatenbank mit den Zusammensetzungen der einzelnen Einsatzstoffe aufgebaut werden. Darauf aufbauend kann das Verbrennungsverhalten wiederkehrender Einsatzstoffe auf Basis der Brennstoffdatenbank prädiziert werden. Der Einsatz einer solchen Datenbank bietet die Möglichkeit, den Anlagenbetrieb und infolgedessen auch die Brennstofflogistik zu optimieren. Für den Aufbau einer solchen Brennstoffdatenbank müssen anhand der gemessenen historischen Daten der realen Sondermüllverbrennungsanlage Rückschlüsse auf die Zusammensetzung der Einsatzstoffe gezogen werden können. Dazu wird ein dynamisches Modell der Anlage eingesetzt, welches in der Lage ist, mit den gegebenen und sich beständig ändernden Inputmöglichkeiten umzugehen. Durch wiederkehrende Simulationen mit angepassten Brennstoffzusammensetzungen kann auf diese Art ein Fehlerminimum in den Abweichungen zu den realen Sensordaten gefunden werden, welches auf die vermutliche Zusammensetzung des Einsatzstoffes schließen lässt. Das in dieser Arbeit entwickelte Modell soll die Möglichkeit bieten, eine Lösung für das beschriebene Problem zu finden. Dazu sollen in dieser Diplomarbeit folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Wie sieht der Stand der Technik hinsichtlich der Entwicklung von digitalen

Zwillingen im vorliegenden Anwendungsbereich aus?

- Welche Soft- und Hardware-Umgebung ist für die Erstellung des digitalen Zwillings der Sondermüllverbrennungsanlage am besten geeignet?
- Welche Einsparungen hinsichtlich CO₂-Emissionen lassen sich durch den Einsatz des digitalen Zwillings erzielen?
- Welche Einsatzmöglichkeiten ergeben sich durch die Entwicklung des digitalen Zwillings zur Optimierung der Sondermüllverbrennungsanlage?

Dazu soll ein digitaler Zwilling einer Sondermüllverbrennungsanlage entwickelt werden, dessen Modell anhand historischer Prozessdaten einer realen Anlage validiert wird, und der im Anschluss zur Bewertung von Optimierungsmöglichkeiten herangezogen werden kann. Um dies zu erreichen wird zu Beginn eine Literaturrecherche bezüglich des aktuellen Standes digitaler Zwillinge und deren momentaner Einsatzmöglichkeiten in der Industrie durchgeführt. Zusätzlich wird das Konzept des digitalen Zwillings näher beleuchtet, um mehr Informationen über die Möglichkeiten des praktischen Einsatzes zu bekommen. Mit den hierbei gewonnenen Ergebnissen wird die passende Softwareumgebung für die Entwicklung und die angestrebten Simulationen mit dem digitalen Zwilling ausgewählt. Mit dem Modell soll danach mit Simulationen geprüft werden, inwieweit eine Bestimmung der Brennstoffzusammensetzung realer Einsatzstoffe auf Basis historischer Messdaten der realen Anlage möglich ist. In Zukunft könnte damit, beispielsweise durch einen verringerten Sauerstoffüberschuss, die Gesamteffizienz der Anlage in Bezug auf die eingesetzte Energiemenge erhöht werden. Dies wiederum würde eine optimierte Anlagenführung benötigen. Dafür kann die angesprochene Brennstoffdatenbank eingesetzt werden. Um ein besseres Verständnis für die in der Sondermüllverbrennungsanlage eingesetzten Materialien zu bekommen wird zunächst auf die Abfallthematik am Beispiel Österreichs genauer eingegangen.

2 Thermische Behandlung von Abfällen und Reststoffen in Österreich

Nicht jeder anfallende Abfall kann verbrannt werden. Deutlich wird dies am Beispiel des Abfallaufkommens in Österreich.

2.1 Abfallbehandlung in Österreich

Der beste Abfall ist jener, der gar nicht erst entsteht. Laut einem Bericht des Bundesministerium für Klimaschutz aus dem Jahr 2019 sind in Österreich in Summe rund 71 261 900 t Abfall entstanden [2, vgl.S.14]. Davon sind rund 2,82 Mio. t sogenannte Sekundärabfälle, also beispielsweise zurückgebliebene Asche aus der Müllverbrennung [2, vgl.S.9]. Unter den Begriff Abfall bzw. Müll fallen in diesem

Bericht sämtliche Arten von Abfall. Also von Siedlungsabfällen aus Haushalten über Klärschlamm, Bauabfall und Aushubmaterial bis hin zu Grünabfall, aber auch medizinische Abfälle und Altfahrzeuge, um nur ein paar Beispiele zu nennen [2, vgl.S.10ff].

Abbildung 1 gibt einen Überblick, wie die in Österreich anfallenden Abfälle weiter verwertet werden. Da die Menge an Aushubmaterial aufgrund großer Bauvorhaben wie etwa des Brenner- oder Semmering-Basistunnels in den letzten Jahren deutlich zugenommen hat, und diese Abfallmengen größtenteils deponiert werden, sind sie in Abbildung 1 nicht inkludiert [2, vgl.S11,S79].

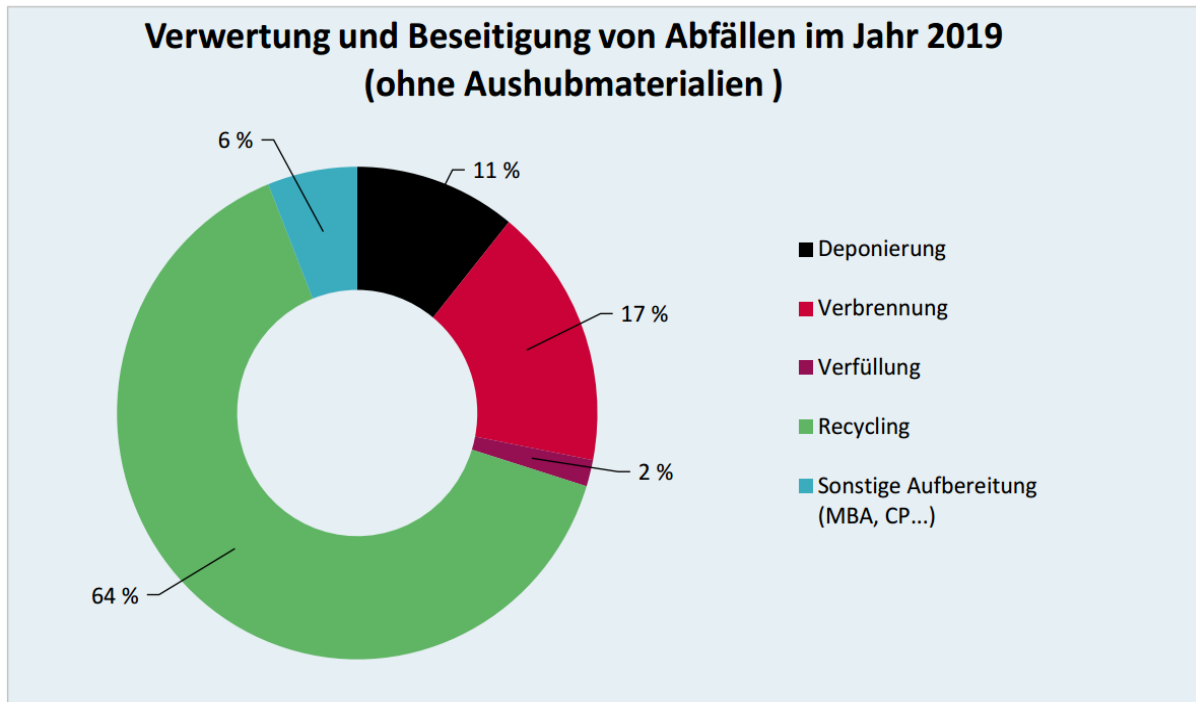


Abbildung 1: Verwertung und Beseitigung von Abfällen 2019 ohne Aushubmaterial [2, S.16]

In Abbildung 1 ist zu sehen, dass der Großteil des Abfalls in Österreich dem Recycling zugeführt wird. Den Großteil hierbei machten 2019 die Almetalle (3 926 679 t/a), Altpapier und -kartonagen (2 989 287 t/a) und Altholz (1 767 975 t/a) aus. Weit abgeschlagen folgten danach Altglas, Altkunststoffe und Altspesiefette. Recycling bezeichnet die Wiederverwertung von Altstoffen. Zur Verwertung von getrennt erfassten Altstoffen stehen in Österreich 89 Anlagen zur Verfügung [2, vgl.S.144f]. Sonstige Abfälle werden z.B. in der Zementindustrie, Ziegelindustrie oder bei der Herstellung von Baustoffen stofflich verwertet [2, vgl.S.147].

Bei der Deponierung lässt sich allgemein sagen, dass es sich bei „Deponien um Einrichtungen handelt, die über einen Ablagerungsbereich verfügen, in dem Abfälle auf unbegrenzte Zeit gelagert werden“ [3, vgl.S.710]. Diese unterscheiden sich im Volumen,

der Art des aufgenommenen Abfalls, ob der Abfall vor Einbau vorbehandelt wird, oder in der Art, wie der Abfall deponiert wird, also ob dieser etwa lose oder in Form von Ballen gestapelt wird [3, vgl.S.710]. Gefährliche Abfälle dürfen allerdings nur in Untertagedeponien abgelagert werden [4, vgl.S.15]. In Österreich existierten Stand 2019 1 068 Deponien mit einer im Jahr 2019 eingelagerten Masse von 33,6 Mio t [2, vgl.S.149]. Dabei ist zu erwähnen, dass in Österreich seit dem 1.1.2009 das Verbot besteht, Abfälle mit mehr als 5 % organisch gebundenem Kohlenstoff unbehandelt zu deponieren. Somit müssen Restmüll und Rückstände aus der kommunalen Abwasserreinigung vor der Deponierung behandelt werden [4, vgl.S.14].

Da die Verbrennung von Abfällen für diese Diplomarbeit die größte Relevanz aufweist, wird auf diese Art der Abfallbeseitigung genauer eingegangen. Für die thermische Behandlung von Siedlungsabfällen stehen in Österreich 11 Anlagen mit einer Kapazität von 2,6 Mio t/a [2, vgl.S.111] sowie 47 Anlagen zur thermischen Behandlung von anderen Abfällen zur Verfügung [2, vgl.S.17]. Unter Anlagen zur thermischen Behandlung von anderen Abfällen fallen nicht nur reine Müllverbrennungsanlagen, sondern auch sogenannte Mitverbrennungsanlagen. Damit sind zum Beispiel Betriebe in der Zementindustrie gemeint, in denen Abfälle als Regel- und auch als Zusatzbrennstoff eingesetzt werden [2, vgl.S.113].

Die thermische Abfallbehandlung ist auch auf Deponien angewiesen, da im Verbrennungsprozess Rückstände wie Asche oder Schlacke übrig bleiben, die wiederum deponiert werden müssen. Jedoch lässt sich die Menge an zu deponierendem Material durch die vorhergehende Verbrennung deutlich verringern. Die Müllverbrennung hat das Ziel, das zu deponierende Abfallvolumen zu verringern. Ohne Schlackenverwertung liegt die Reduktion bei ca. 80%, mit bei bis zu 95%. Bei der Verbrennung verliert der Müll 60-70 % seines Gewichtes [5, vgl.S.412]. Von im Jahr 2019 verbrannten 2,6 Mio t Siedlungsabfall blieben 650 000 t Sekundärabfälle zurück [2, vgl.S.112]. Zum Vergleich: In thermischen Behandlungsanlagen für sonstige Abfälle wurden 1,6 Mio t Abfallstoffe verbrannt [2, vgl.S.113]. Unter dem Gesichtspunkt, dass insgesamt 4,5 Mio t Siedlungsabfälle anfielen, wird schnell ersichtlich, dass davon gut die Hälfte thermisch verwertet wird [2, vgl.S.19].

Damit die angesprochene thermische Verwertung nicht in ungeregeltem Emissionsausstoß mündet, sind vom Gesetzgeber Grenzwerte festgelegt worden, die nicht überschritten werden dürfen. Diese Grenzwerte sind in der Abfallverbrennungsverordnung (AVV) festgelegt, und in Abbildung 2 dargestellt. Bevor die Müllverbrennung genauer diskutiert wird, empfiehlt sich eine kurze Begriffsabgrenzung durchzuführen. Laut einer EU-Richtlinie über Abfälle werden diese folgendermaßen unterteilt:

- Abfall: Damit ist jeder Stoff oder Gegenstand gemeint, dessen sich sein Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss [6, vgl.S.3].
- Gefährlicher Abfall: Darunter fällt jener Abfall, der eine oder mehrere gefährliche Eigenschaften aufweist [6, vgl.S.3] wie z.B. explosiv, brandfördernd und entzündlich, [6, vgl.S.44f], aber auch karzinogen und akut toxisch [6, vgl.S.47f].

Umgemünzt auf die übliche Bezeichnung Müll bedeutet das, dass sich hinter dem umgangssprachlich genutzten Begriff Sondermüll gefährliche Abfälle mit bestimmten Gefährdungen verbergen. Dementsprechend wird in den nächsten Kapiteln zwischen Müllverbrennungsanlagen und Sondermüllverbrennungsanlagen unterschieden. Dass eigene Anlagen für den Umgang mit gefährlichen Abfällen notwendig sind belegen die Zahlen: 1,26 Mio t gefährliche Abfälle fielen 2019 an [2, vgl.S.12].

Abgasgrenzwerte für Verbrennungsanlagen gemäß Anlage 1 AVV

Parameter	Emissionsgrenzwert (in mg/m ³ , bezogen auf Normbedingungen und 11% Sauerstoff)	
	Halbstundenmittelwert	Tagesmittelwert
staubförmige Emissionen	10	10
organisch gebundener Kohlenstoff	10	10
Chlorwasserstoff	10	10
Fluorwasserstoff	0,7	0,5
Schwefeldioxid	50	50
Stickstoffoxide bei einer Nennkapazität		
• bis 2 t Abfall/h	300	200
• 2 bis 6 t Abfall/h	200	150
• mehr als 6 t Abfall/h		
- für Neuanlagen	100	70
- für bestehende Anlagen		100
Kohlenstoffmonoxid	100	50
Quecksilber	0,05	0,05
	Mittelwert über 0,5 bis 8 Stunden	
Cadmium und Thallium		0,05
Summe der Elemente Antimon, Arsen, Blei, Chrom, Kobalt, Kupfer, Mangan, Nickel, Vanadium, Zinn		0,5
Ammoniak		5
	Mittelwert über 6 bis 8 Stunden (in ng TE/m³)	
Dioxine und Furane		0,1

Abbildung 2: Abgasgrenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen gemäß Abfallverbrennungsverordnung (AVV) [4, S.108]

2.2 Müllverbrennungsanlage

Wenn von Müllverbrennung im Allgemeinen gesprochen wird, fällt oft der Begriff „Thermische Abfallverwertung“. Dies umfasst alle Prozesse und Verfahren, die unter deutlich erhöhten Temperaturen thermisch induzierte Umsetzungsprozesse des kohlenstoffhaltigen Anteils der Abfälle zum Ziel haben [3, vgl.S.621]. Dementsprechend sind mit dieser Definition allerdings nicht nur Verbrennungsanlagen gemeint, sondern auch unter anderem Vergasungs- oder Pyrolyseanlagen. Die diversen Verfahren werden anhand der Prozessparameter und Reaktionsprodukte charakterisiert. Mit einem Volumen von rund 255 Millionen Tonnen Abfall der pro Jahr in ca. 2200 Anlagen weltweit verbrannt wird, kommt der Verbrennung in der Praxis eine besondere Bedeutung zu. Hierbei wird die Möglichkeit der energetischen Nutzung der Abfallstoffe mit der Umwandlung in einen lagerfähigen Zustand mit reduziertem Volumen verbunden. Darüber hinaus besteht die Option, die im Prozess anfallenden Aschen und Schlacken weiter zu verwerten [3, vgl.S.621].

Welche Technologie letztendlich bei der Verbrennung zum Einsatz kommt, hängt in hohem Maß von dem vorliegenden Abfall ab. Die Zusammensetzung und die Art des Abfalls, also ob etwa Siedlungsabfälle, entwässerte Klärschlämme oder aber gefährliche Abfallstoffe vorliegen, bestimmt hierbei das Verfahren maßgeblich [3, vgl.S.621-623]. Um die verschiedenen technischen Verfahren der Müllverbrennung aufzuzeigen, werden die einzelnen Bestandteile einer solchen Müllverbrennungsanlage aufgelistet, und auf die möglichen Bauarten eingegangen.

- **Materialanlieferung und Speicherung**

Das angelieferte Material wird am Werksgelände in an die Abfallstoffe angepassten Lagereinrichtungen bis zur Verbrennung zwischengelagert. Hier können Sichtkontrollen oder etwaige Vorbehandlungen, also z.B. Vermischungen oder Zerkleinerungen, stattfinden.

Feste Abfälle werden in Bunkern aufbewahrt, die als Schnittstelle zwischen der kontinuierlich ablaufenden Verbrennung und der diskontinuierlichen Anlieferung dienen. Die Bunker sind der Größe jener Zeiträume angepasst, die ohne zusätzliche Materialanlieferungen überbrückt werden müssen. Dazu zählen Feiertage oder Wochenenden. Auch besteht die Notwendigkeit, die einzelnen angelieferten Chargen mithilfe von z.B. dem Aufgabekran durchmischen zu können. Beim Bunkermanagement ist darauf zu achten, dass die Verweilzeiten der einzelnen Lieferungen keine unerwünschten Prozesse wie Gärung, Gasbildung oder Selbstentzündung zulassen. Dementsprechend sollte auch genug Platz im Bunker vorhanden sein, um ein geregeltes Ein- und Ausstapeln zu ermöglichen. Brennstoffe die flüssig oder pastös vorliegen werden in Tanks gelagert [3, vgl.S.624f].

- **Materialaufgabe**

Die Aufgabe- und Beschickungssysteme befördern die im Bunker und Tanks zwischengelagerten Brennstoffe in den Ofen. Feste, stückige Abfälle werden über einen kranbeschickten Aufgabetrichter mit Schacht zugeführt, flüssige und

pumpfähige pastöse Stoffe über Düsen [3, vgl.S.626]. Da die Beschickungssysteme an die jeweiligen Brennstoffe angepasst sind, gibt es, falls notwendig, in Sondermüllverbrennungsanlagen auch die Möglichkeit beispielsweise mit gefährlichen Abfallstoffen gefüllte Fässer als Ganzes dem Verbrennungsprozess zuzuführen.

- **Verbrennungsofen**

In Tabelle 1 ist eine kurze Gegenüberstellung verschiedener Feuerungssysteme und deren Einsatzgüte bei verschiedenen Brennstoffen zusammengefasst. Auf alle drei Systeme wird anschließend genauer eingegangen. Bei einem Vergleich der Systeme ist der Drehrohrofen mit Nachbrennkammer bei allen Brennstoffen der Wirbelschichtfeuerung und der Rostfeuerung mindestens ebenbürtig, meist sogar überlegen. Dadurch ist die große Bandbreite an Brennstoffen, für die sich der Drehrohrofen aus feuerungstechnischer Sicht eignet, gut abgebildet. Aus wirtschaftlichen Gründen ist der Drehrohrofen aber bei der Einschränkung auf wenige Brennstoffe mit ähnlichen Eigenschaften den anderen beiden angeführten Systemen nachzureihen.

Tabelle 1: Einsatzmöglichkeiten verschiedener Ofenkonstruktionen im Bezug auf unterschiedliche Abfallarten [7, vgl.S.24]

	Wirbelschicht	Rostfeuerung	Drehror m. Nachbrennkammer
Gase	+	-	+
Flüssige Abfälle: org. Lösemittel org. Halogenverb. org. bel. Wasser öhlhaltige Rückstände	+	-	++
pastöse Abfälle mit hoher Zähigkeit	+	-	++
Schlämme (wässrig, org. belastet)	++	-	++
Feste Abfälle: (organische Abfälle m. niedrig schmelzender Asche)	+	-	++
körnige, stückige Abfälle (aschereich)	++	-	++
sperrige Abfälle	-	++	++
Abfälle in Fässern u. Gebinden	-	+	++

Für Siedlungsabfälle kommen beinahe zur Gänze Rostfeuerungen zum Einsatz. Diese Art der Feuerung ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt [3, vgl.S.627f].

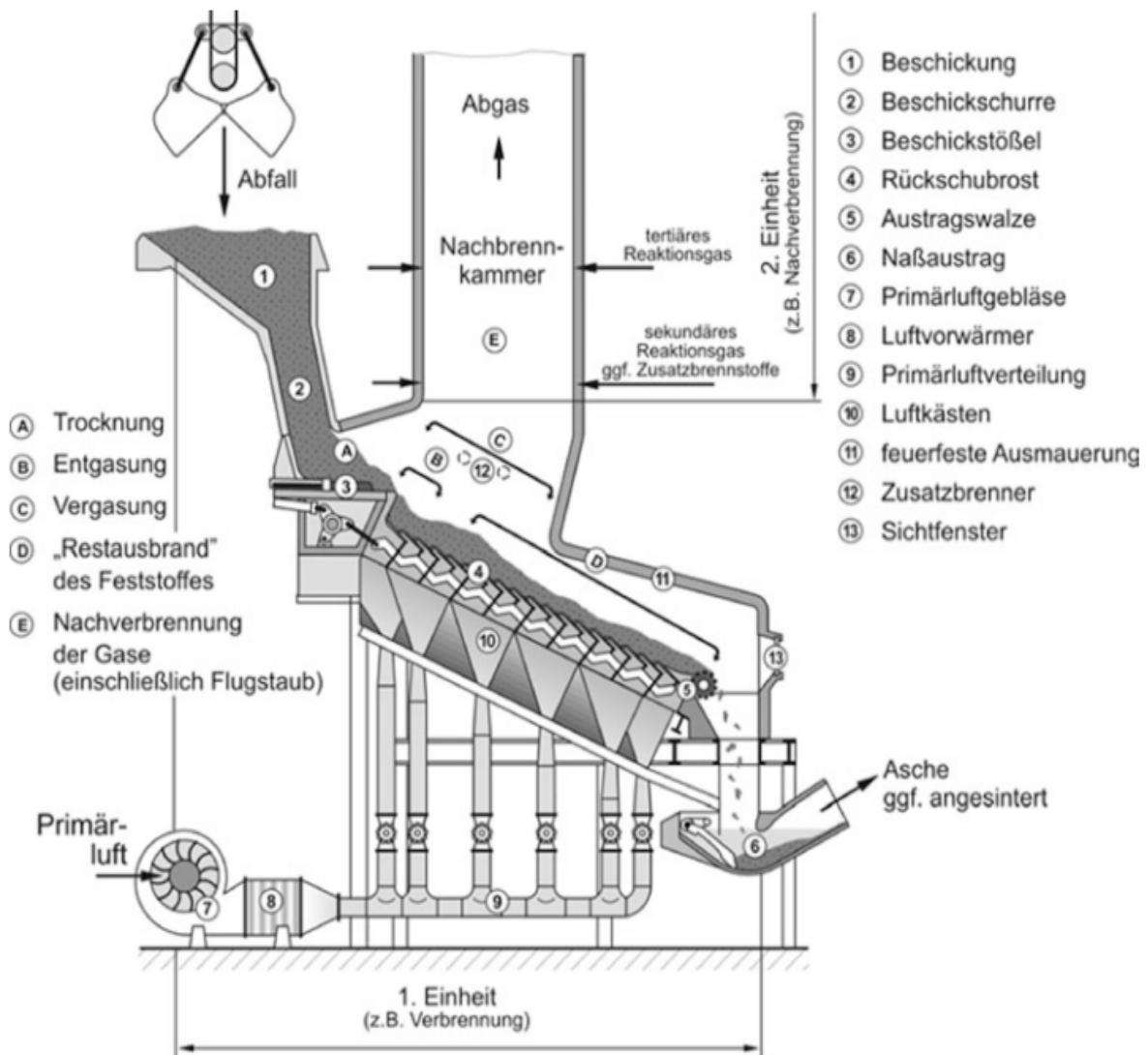


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Rückschubrosts mit Gegenstromfeuerungsanlage [3, S.628]

Bei diesen Systemen wird der Abfall mit dem Rost in den Feuerraum transportiert. Dabei wird der Müll geschürt und die Verbrennungsluft von unten durch Luftöffnungen ins Brennstoffbett eingebracht, sowie die Rostasche zum Entascher gebracht. Zusammengefasst übernimmt also in diesem Fall der Rost die Aufgaben des Drehrohres, indem dadurch die zugeführte Luftmenge sowie der Brennstoffmassenstrom gesteuert wird, der Brennstoff geschürt wird, und die Verbrennungsrückstände ausgetragen werden. Der Brennstoff kann dabei

kontinuierlich mit einem Wander- oder Walzenrost, oder diskontinuierlich mit einem Schubrost transportiert werden. Bei einem Wanderrost geschieht dies ähnlich wie bei einem Förderband, während bei einem Walzenrost einzelne sich drehende Walzen für die Vorwärtsbewegung sorgen. Sich abwechselnd bewegende und nicht bewegende Roststäbe sorgen hingegen bei einem Schubrost dafür, dass sich der Brennstoff weiterbewegt. Der Rost selbst wird dabei, sollte die Luftkühlung nicht ausreichen, noch zusätzlich wassergekühlt ausgeführt [3, vgl.S.627f].

Eine weitere, vor allem bei gemischten Siedlungsabfällen beliebte Konstruktion ist der Rückschubrost, der den Abfall bei einer im Verhältnis zu den anderen Methoden größeren Steigung rückwärts entgegen der Schwerkraft bewegt. Durch Abrollen bzw. Abstürzen des Brennstoffes bewegt sich dieser weiter nach vorne. Dadurch, dass der Rost bei dieser Variante ständig mit Abfall oder Schlacke bzw. Asche bedeckt ist, ist keine zusätzliche Kühlung notwendig, da dieser durch diesen Belag gegen thermische Belastung geschützt ist. Die Verbrennungsluft kann, bezogen auf die Bewegungsrichtung des Brennstoffes, im Gleich-, Mittel- oder Gegenstrom geführt werden [3, vgl.S.627f]. Beispiele für Rostfeuerungen wären in Österreich etwa die Müllverbrennungsanlage Wien Spittelau, sowie Wien Flötzersteig und Dürnrohr [2, vgl.S.111].

Wie in Tabelle 1 zu sehen ist, eignet sich die Rostfeuerung nur für sperrige Abfälle, sowie Fässer und Gebinde. Für die Verbrennung von beispielsweise Schlämmen oder körnigen, stückigen Abfällen bietet sich eine Wirbelschichtfeuerung an. Diese Art der Feuerung ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt. Das Prinzip dahinter ist, dass die durch einen Düsenboden eingebrachte Verbrennungsluft das aus Quarzsand und festen Verbrennungsrückständen bestehende Bettmaterial fluidisiert. In dieses werden die festen Brennstoffe eingebracht. Der Vorteil dabei ist, dass in dem Wirbelbett gleichmäßige Reaktions- und Temperaturbedingungen vorherrschen, die wiederum gegen kurzzeitige Heizwertänderungen weitgehend immun sind, und so die Verbrennungsbedingungen stabilisieren. Unverbrannte Bestandteile verlassen zu einem Teil den Feuerraum über den Gasweg und werden im Nachgang, meist mit Zyklonen, abgetrennt. Ein weiterer Vorteil der Wirbelschicht ist die Möglichkeit, durch Additive die zugegeben werden, primäre Emissionsminderungsmaßnahmen zu realisieren. Dies hat jedoch mitunter Auswirkungen auf die Eigenschaften des Bettmaterials. Diese Feuerungsart kann entweder stationär oder zirkulierend ausgeführt sein. Der Unterschied besteht darin, dass bei einer stationären Wirbelschicht das Bettmaterial zwar auch fluidisiert, aber nur im unteren Bereich des Feuerraums in Schwebe gehalten wird, und den Feuerraum dementsprechend nicht verlässt. Bei der zirkulierenden Wirbelschicht ist der gesamte Feuerraum mit fluidisiertem Bettmaterial gefüllt und das Bett wird mit ausgetragen. Dieses wird in einem nachgeschalteten Zyklon abgeschieden und rückgeführt. Diese Feuerungsart ermöglicht die Verfeuerung von biogenen Brennstoffen wie Hackschnitzel, Abfallstoffen aus der Papierindustrie oder Klärschlämmen. Auch der Einsatz von rein mechanisch entwässertem Klärschlamm ist möglich, jedoch

kann dabei die Notwendigkeit bestehen, die zugeführte Luft vorzuwärmen. Eine Stützfeuerung mit Öl oder Gas ist ebenfalls möglich [3, vgl.S.630f].

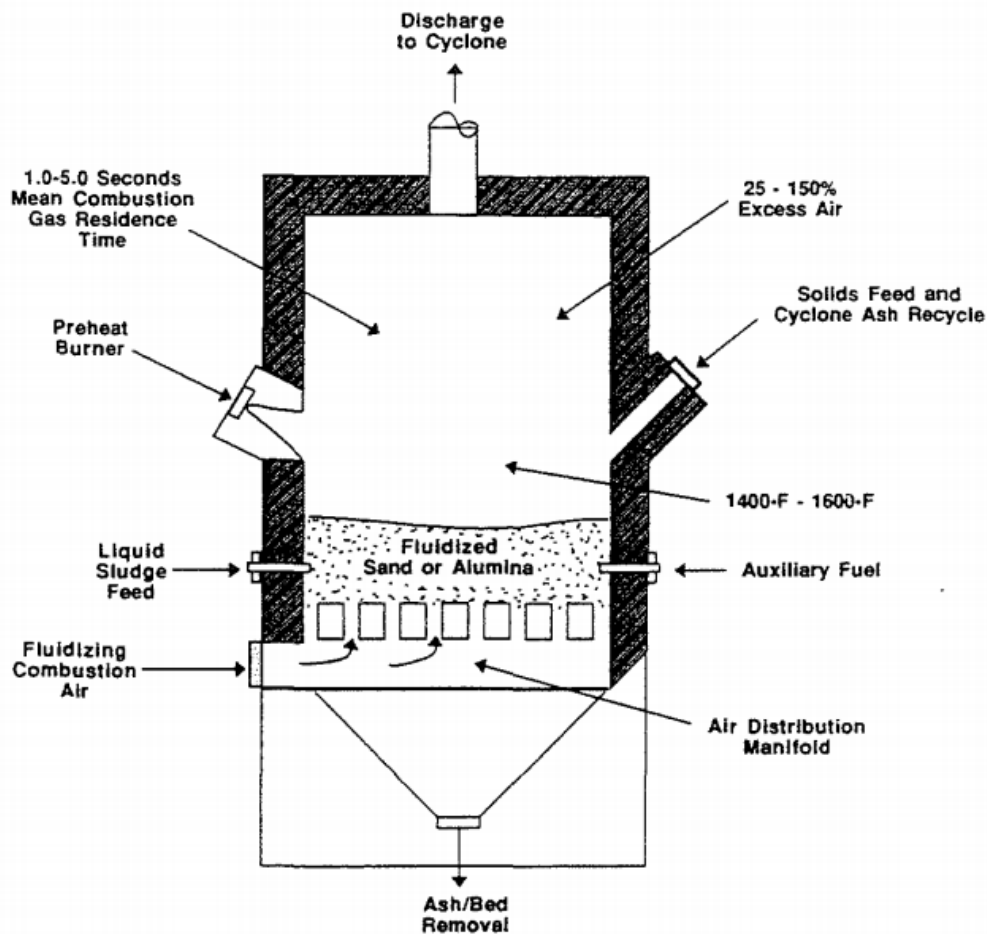


Abbildung 4: Schematische Darstellung einer Wirbelschichtfeuerung [7, S.16]

Ein weiterer Blick in Tabelle 1 macht deutlich, dass die Rost- und Wirbelschichtfeuerung zwar in ihrem jeweiligen Bereich gut eingesetzt werden, jedoch nur eine sehr spezifische Brennstoffbeschaffenheit verarbeiten können. Der Drehrohrofen bietet eine Möglichkeit beide Bereiche abzudecken. Eine schematische Darstellung dieses Systems ist in Abbildung 5 zu sehen. Dabei hat sich gezeigt, dass für den Großteil der Sonderabfälle die Drehrohrofenfeuerung ein geeignetes Verfahren darstellt.

Dieses System ist einerseits überaus robust, andererseits kann beinahe jede Form und Konsistenz von Abfall aufgegeben werden. Dementsprechend ist auch eine Verbrennung von flüssigen und pastösen Abfällen möglich. Im Drehrohr herrschen Temperaturen über 850°C und die Verweilzeit des Abfalls im Rohr wird durch die Drehzahl (0,1 - 1 U/min) und die Längsneigung ($1 - 3^{\circ}$) bestimmt,

wobei sie bei den Feststoffen zwischen 1/2 und 2h beträgt. Je nach Zustand im Rohr liegt die Schlacke am Ende entweder trocken oder flüssig, also geschmolzen, vor und wird abgezogen. Die Brenngase und nicht vollständig verbrannte gasförmige Bestandteile strömen in die Nachbrennkammer die an das Ofenrohr anschließt [3, vgl.S.629f].

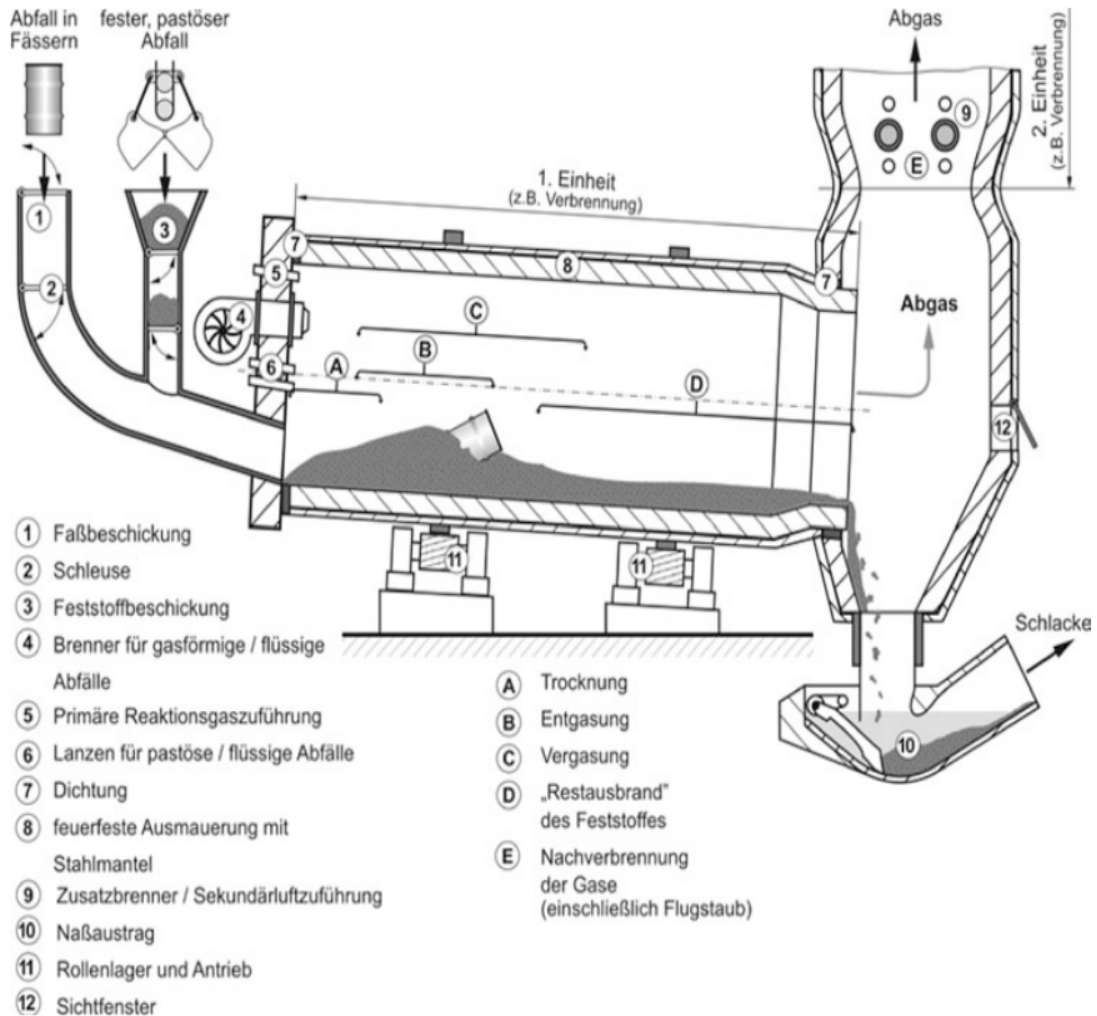


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Drehrohrofens mit den Reaktionsbereichen [3, S.629]

Das Rohr ist meist zwischen 10 und 12 m lang mit einem freien Innendurchmesser von 3-4 m, wobei sich an der Innenseite noch eine feuerfeste Ausmauerung zum Schutz des Stahlmantels vor sowohl hohen Temperaturen, als auch mechanischer Beanspruchung durch zum Beispiel im ganzen aufgegebene Fässer befindet. Auch bildet diese Schicht einen Schutz vor unter Umständen auftretender Korrosion durch den aufgegebenen Brennstoff, wobei hier Fluor und Chlor als aggressive Bestandteile zu nennen sind. Ein aus erstarrter Schlacke bestehender

„Schlackepelz“ kann hierbei einen zusätzlichen Schutz für die Innenseite des Rohres bieten. Befeuert werden diese Öfen an der Stirnseite [3, vgl.S.629f].

- **Entascher / Entschlacker**

Für dieses Bauteil kommen zwei verschiedene Ausführungen in Frage: Eine nasse und eine trockene Entschlackung. Bei der Nassentschlackung wird von einem wassergefüllten länglichen Auffangbehälter mit einem schrägen Boden gesprochen, der sich unterhalb des Auswurfs befindet. Das Wasser, mit dem der Behälter gefüllt ist, dient gleichzeitig als Luftabschluss des Feuerraums nach außen. Das abgekühlte Material wird mittels Hydraulikstößel oder Kratzband aus dem Auffangbehälter entfernt. Der bei der Abkühlung entstehende Wasserdampf steigt auf und wird über das Abgas aus dem Feuerraum mit ausgetragen. Eine Nassentschlackung wird auch als Schlackebad bezeichnet [3, vgl.S.631f].

Eine weitere, wenngleich technologisch aufwendigere, Variante die Verbrennungsrückstände zu entfernen, ist die trockene Entschlackung. Die Kühlung erfolgt hierbei mit Luft. Darüber hinaus sind weitere Einbauten notwendig, um sowohl den Luftabschluss des Feuerraums nach außen hin, als auch die Staubentwicklung bei den trockenen Rückständen in den Griff zu bekommen [3, vgl.S.632].

- **Dampferzeuger**

Die bei der Verbrennung freigesetzte Wärme wird durch eine Abgaskühlung zurückgewonnen, indem sie zur Dampferzeugung und zur Strom- und Wärmeproduktion eingesetzt wird. Über Wärmetauscher, die beispielsweise als Rohrbündel realisiert werden, wird dem Abgas die Wärme entzogen und dem Wasser, welches im Inneren der Rohre unter Druck steht, zugeführt. Der Dampferzeuger wird auch Kessel genannt. Der Kessel wird so ausgelegt, dass bei gleichzeitig guten Reinigungsmöglichkeiten und geringen Falschlufteinträgen auch eine hohe Betriebssicherheit mit geringem Verschleiß und eine Aufrechterhaltung des Betriebs bei schwankenden Heizwerten aufgewiesen wird. Daraus ergibt sich, dass bei diesen Feuerungen oftmals Dampferzeuger mit Naturumlaufsystemen eingesetzt werden. Zwangumlauf- sowie Zwangdurchlaufsysteme kommen nur in Ausnahmefällen zum Einsatz.

Um die Verschmutzung der Wärmeüberträgerflächen gering zu halten, bietet sich die Möglichkeit an Leerzüge einzubauen, um das Abgas unter die Erweichungstemperatur des Staubes abzukühlen, wenngleich dadurch ein Anbacken sowie Ablagerungen nicht vollständig vermieden werden können. Eine periodische Reinigung ist somit notwendig. Der im Kessel gewonnene Dampf wird durch eine entsprechende konstruktive Anordnung in Überhitzern noch weiter erwärmt, ehe dieser in einer Turbine entspannt und somit zur Stromproduktion eingesetzt wird. Abschließend wird der entspannte Dampf weiter abgekühlt und in kondensierter Form wieder dem Kessel und damit dem Kreislauf zugeführt. Oftmals kommen Turbinen zum Einsatz, die für eine Kraft-Wärme-Kopplung geeignet sind [3, vgl.S.632f].

- **Gasreinigung**

Bei der Gasreinigung ist zu erwähnen, dass durch eine angepasste Betriebsweise bereits eine Minderung der Emissionen im Vorfeld der Abgasreinigungsanlage stattfindet. Dies geschieht z.B. durch einen guten Abgas-Ausbrand [3, vgl.S.633]. Nachfolgend wird auf bestimmte Emissionsarten und deren Reinigung genauer eingegangen.

- Staubemission

Das Ziel bei dieser Reinigung ist es, die Partikel in eine Relativbewegung zum Gasstrom zu bringen, um das Gas vom Staub zu separieren. Hierfür werden üblicherweise 4 Verfahren zum Einsatz gebracht:

- * **Schwerkraftabscheidung und Zentrifugalkraftabscheidung:** Während bei der Schwerkraftabscheidung eine Querschnittserweiterung zu einem Abfallen der Strömungsgeschwindigkeit, und somit zu einem entsprechenden Absinken der schwereren Partikel führt, wird bei der Zentrifugalkraftabscheidung das Abgas in einen Zyklon eingeleitet und dort die Partikel durch die Zentrifugalkraft an die Außenwand gelenkt und abgeschieden [3, vgl.S.633].
- * **Filtration:** Hier ist der Einfluss der Partikelgröße auf das Trennergebnis weniger groß, da das Gas durch ein poröses Medium geleitet wird, in dem die ab zu trennenden Staubteilchen zurückbleiben. Dabei kommen verschiedene Arten von Filtern wie etwa Gewebefilter und Schüttschichtfilter zum Einsatz, wobei in diesem Anwendungsfall Gewebefilter bevorzugt werden [3, vgl.S.633f].
- * **Elektroentstaubung:** Bei dieser Methode werden die feinen Teilchen durch ein starkes elektrisches Feld negativ aufgeladen und anschließend abgezogen. Dieses Feld wird durch eine Sprühelektrode gebildet, die ihrerseits als Draht oder Band ausgeführt sein kann [3, vgl.S.634].
- * **Nassentstaubung:** Dabei werden die Partikel mit einer Waschflüssigkeit in Kontakt gebracht, um sie darin zu binden und somit abzuschneiden. Diese Art der Gasreinigung kann in Form von Füllkörperkolonnen, Rotations- oder Wirbelwäschern und ähnlichen Bauformen zum Einsatz kommen [3, vgl.S.634].

- HCl, HF, SO₂

Um unerwünschte Komponenten, die gasförmig vorliegen, aus dem Abgas zu entfernen, besteht die Möglichkeit, diese entweder durch Adsorption an einen Feststoff oder durch Absorption in einer Flüssigkeit zu binden. Dementsprechend liegen die Produkte als feste oder flüssige Komponenten vor. Unterteilt werden die angewendeten Verfahren allerdings in drei Kategorien: Trocken, konditioniert trocken und nass. Während die beiden erstgenannten Verfahren aus einem Reaktionsraum bzw. einer Reaktionsstrecke mit Additivzugabe bestehen, denen ein Staubabscheider folgt, so finden die nassen Verfahren in Wäschern statt. Ein weiterer Begriff

ist „quasitrocken“. Damit ist häufig das Sprühadsorptionsverfahren gemeint, bei dem Kalkmilch im Abgasstrom versprüht wird. Diese Methode wird auch als Trockensorptionsverfahren bezeichnet, bei dem chemische Reaktionen als Gas-Feststoff-Reaktion ablaufen, womit eine deutlich geringere Reaktionsgeschwindigkeit einhergeht. Typischerweise werden dabei als Reagenzien Kalkstein, Kalkhydrat oder Natriumhydrogenkarbonat eingesetzt [3, vgl.S.634].

– Stickoxide

Um die Stickoxid-Emissionen im Abgas zu verringern, werden zumeist zwei Verfahren eingesetzt: Einerseits die selektiv katalytische Reduktion (SCR) und andererseits die selektive nicht katalytische Reduktion (SNCR). Das SNCR-Verfahren wird meist noch vor dem Kessel im Anschluss an den Feuerraum in einem Temperaturbereich von 850-1000 °C eingesetzt und oft zum Beispiel mit einer Luftstufung kombiniert verwendet. Als Reduktionsmittel dienen hierbei Ammoniak oder Harnstoff, wobei mitunter vorteilhaft ist, das Ammoniak als Ammoniakwasser zu verwenden, da dies besser lagerbar ist. Um einen guten Prozessablauf zu gewährleisten sind eine gute Vermischung der zugesetzten Mittel mit dem Abgas, sowie ein geeignetes Temperaturprofil notwendig. Bei kühleren Temperaturen ist außerdem eine längere Verweilzeit erforderlich. Auch wenn bei diesem Verfahren ein kleiner Ammoniakverlust besteht, besteht die Möglichkeit, dass Emissionswerte von 150 mg/m³ vor Kamin eingehalten werden können. Im Vergleich dazu ist beim SCR-Verfahren eine deutlich tiefere Temperatur zwischen 180 und 230 °C möglich, da die für die Reduktionsreaktion notwendige Aktivierungsenergie durch einen Katalysator herabgesetzt wird. Bei den eingesetzten Katalysatorstoffen wie etwa TiO₂, V₂O₅ oder WO₃ sind außerdem Standzeiten von deutlich über 10 000 h bei unwesentlich verringerter Aktivität möglich, eine regelmäßige Reinigung, um das Versalzen zu verhindern, vorausgesetzt. Auch ist die Position bei dieser Methode begrenzt variabel: Meist befindet sich die SCR-Einheit am Ende der Rauchgasreinigung um den Katalysator zu schützen. Hierbei wird auch von der Tail-End-Schaltung gesprochen. Sollte das Gas an dieser Stelle allerdings bereits zu kühl sein, muss dieses extra erwärmt werden, wodurch ein zusätzlicher Energieaufwand entsteht. Dies kann durch einen früheren Einbau der katalytischen Reaktion im sogenannten High-Dust-Bereich verhindert werden. Allerdings ist hier die auftretende Verschmutzung deutlich größer.

Seit einiger Zeit wird auch verstärkt auf eine Reduktion der Stickoxid - Emissionen durch geänderte feuerungstechnische Maßnahmen gesetzt. Dazu zählen eine Abgasrezirkulation, eine Luftstufung oder eine gezielte Vermischung der Gasphase im Feuerraum. Mithilfe der Abgasrezirkulation wird eine Temperaturkontrolle und ein verminderter Sauerstoffgehalt erreicht, während die Luftstufung eine Reduktionszone im Feuerraum

etablieren soll, und die Vermischung im Feuerraum intern gebildete Anteile von Ammoniak, Cyanwasserstoff oder Kohlenwasserstoffen für eine In-situ-Reduktion verwenden soll [3, vgl.S.634ff].

- Unverbrannter Kohlenstoff
Um sowohl Kohlenmonoxid, als auch organischen Kohlenstoff vollständig umzusetzen, ist die richtige Feuerungsführung wichtig, um dies über einen optimalen Ausbrand zu gewährleisten. Die dabei zu erwähnenden feuerungstechnischen Parameter sind z.B. Verbrennungsluftzufuhr, Feuerraumgeometrie und Gasdurchmischung. Weiters sind die Feuchte des Brennstoffes und die Schütthöhe auf dem Rost wichtige Parameter. Spezielle Nachbehandlungen des Rauchgases, um Kohlenstoffreste und Kohlenmonoxid zu entfernen, sind bei Abfallverbrennungsanlagen meist nicht verbaut [3, vgl.S.636].
- Weitere Schadstoffe
Hiermit sind beispielsweise organische Spurenstoffe und Schwermetalle gemeint. Erstere sind polychlorierte Biphenyle (PCB), Chlorbenzole, Chlorphenole sowie polychlorierte Dibenzop-dioxine (PCDD) und Dibenzofurane (PCDF). Diese Stoffe bilden sich während des Abbrands der festen Stoffe und werden bei rund zwei Sekunden Verweilzeit und Temperaturen von über 800 °C zerstört. Allerdings können sie sich in abgekühltem Abgas aus partikulärem Kohlenstoff mithilfe von Metallkatalysatoren wie etwa Kupfer oder Eisen aus Flugascheablagerungen bei Temperaturen zwischen 200 und 500 °C erneut bilden. Dieser Mechanismus wird auch als De-novo-Synthese bezeichnet. Eine Möglichkeit, diesem Phänomen entgegen zu wirken, ist der effiziente Ausbrand des Gases sowie Flugascheablagerungen im Kessel in Bereichen, in denen die Temperatur zwischen 200 und 500°C liegt, durch entsprechende Reinigung möglichst zu vermeiden. Zusätzlich zu diesen Primärmaßnahmen existieren Sekundärmaßnahmen, wie etwa die Abscheidung von adsorbierten PCDD/F-Emissionen mit Filtern wobei die Temperaturen möglichst unter 200°C gehalten werden sollten, um eine Neubildung zu verhindern. Auch eine Adsorption dieser Stoffe an feindisperse, ins Abgas eingedüste Aktivkohle wäre eine Möglichkeit [3, vgl.S.636f].
Bei den Schwermetallen die in diesem Zusammenhang vorkommen besteht bis auf Quecksilber bei allen eine hohe Bindung an feste Partikel, wodurch sie mit den bereits erwähnten Methoden aus dem Abgas entfernt werden können. Leichter flüchtige Metalle wie Cadmium, Arsen oder Blei verdampfen bei der Verbrennung teilweise und kondensieren im weiteren Verlauf auf den Partikeln im Abgas, womit für deren Abscheidung auch auf die entsprechende Temperatur geachtet werden muss. Da Quecksilber vollständig verdampft und auf Partikeln nur teilweise kondensiert, ist hier eine spezielle Vorgehensweise nötig: Quecksilber liegt sowohl in oxidierte als auch in elementarer Form vor, wobei die oxidierte Form mit

Nasswaschverfahren aufgefangen werden kann. Daher wird versucht die elementare Form in die oxidierte Form zu überführen, beispielsweise durch Mitverbrennung halogenhaltiger Substanzen. Beim Waschen der Abgase kann diese Überführung durch die Zugabe von Wasserstoffperoxid oder Natriumhypochlorit erfolgen. Aktivkohle eignet sich sowohl zur Abscheidung der elementaren als auch der oxidierten Form [3, vgl.S.637f].

2.3 Sondermüllverbrennungsanlage Wien Simmeringer Haide

Am Standort Simmeringer Haide der Wien Energie werden zwei Drehrohröfen zur Sondermüllverbrennung betrieben. Sie dienen in dieser Arbeit als reale Objekte die im digitalen Zwilling abgebildet werden sollen. Die Daten zur Parametrierung des digitalen Zwillings sind die realen Daten dieser beiden Öfen der letzten Jahre. Einer dieser Öfen wird in diesem Kapitel beispielhaft beschrieben. Abbildung 6 stellt eine Sondermüllverbrennungsanlage mit Drehrohröfen schematisch dar. Die folgenden Unterpunkte beschreiben den Ablauf in der Sondermüllverbrennungsanlage Simmeringer Haide.

- **Beschickung des Drehrohröfens**

Aufs Gelände der Anlage werden verschiedene feste, flüssige und pastöse Abfälle gebracht. Die festen Abfälle müssen noch unterschieden werden in Fässer, Bunkermüll und Spitalmüll. Die Fässer können entweder ganz bleiben oder im Abfallbehandlungssystem (ABS) geschreddert und mit Bunkermüll vermengt werden. Dieser Mischung können zusätzlich flüssige oder pastöse Abfälle bzw. Brennstoffe beigemischt werden. Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, existieren zusätzlich noch flüssige Brennstoffe bzw. Abfall in Form von Heizöl extraleicht (HEL), Heizöl schwer (HS), Altöl (AÖ) oder pastösen Abfällen sowie Abwasser. In den Drehrohröfen können ganze Fässer direkt, sowie Bunkermüll alleine und bereits mit Brennstoff vermengter Abfall aus dem ABS zugegeben werden. Auch der Spitalmüll wird direkt in den Ofen befördert, da dieser gesundheitsgefährdend sein kann. Dies geschieht an der Stirnseite des Ofens. Zusätzlich können über Lanzen die flüssigen und pastösen Abfälle bzw. Brennstoffe zugegeben werden. Diese werden mit Wasserdampf beim Eintritt in den Ofen fein zerstäubt.

Schematisch ist ein Drehrohröfen in Abbildung 5 dargestellt.

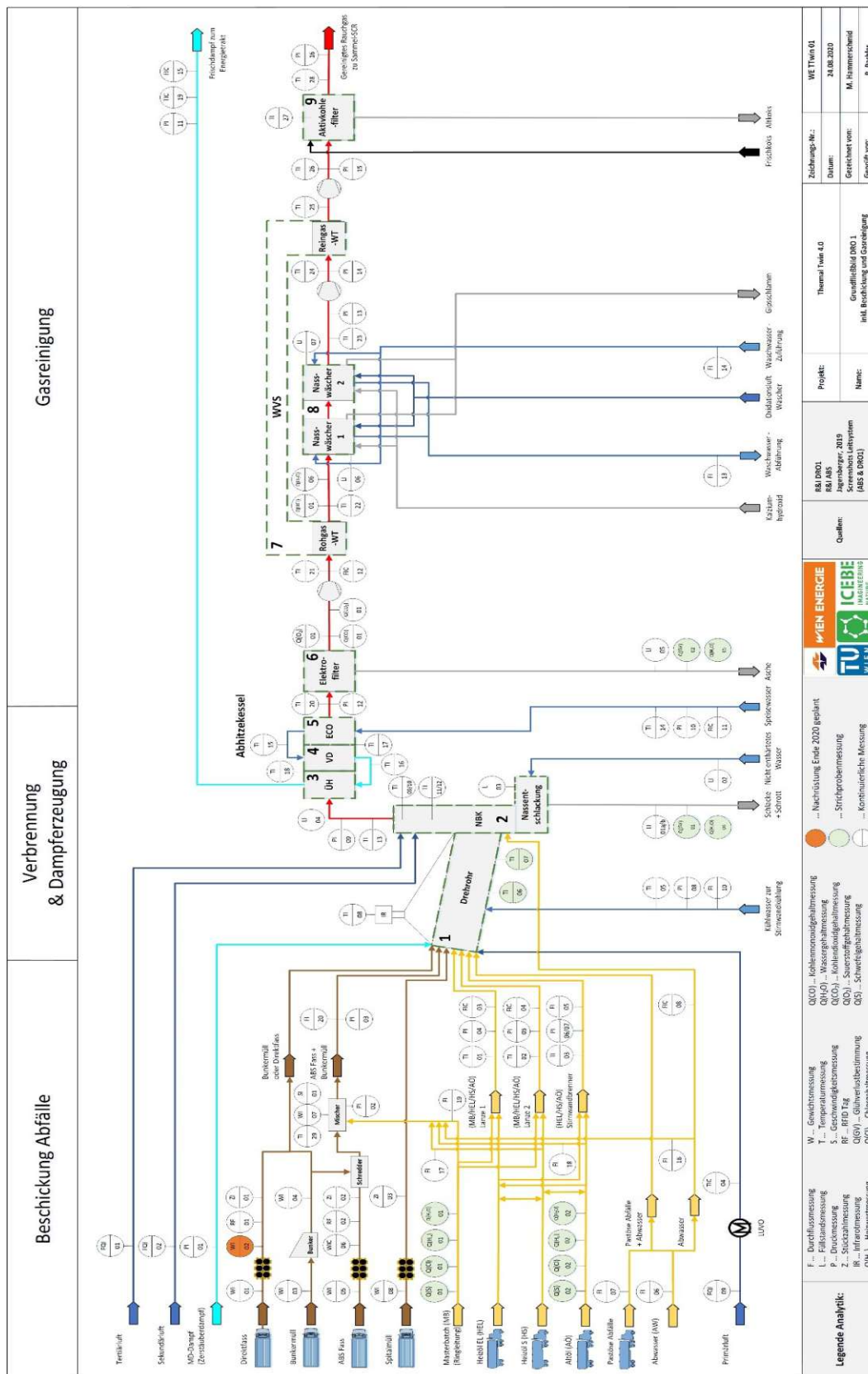


Abbildung 6: Grundfließbild der Sondermüllverbrennungsanlage [8, S.2]

- **Der Drehrohrofen**

Der betrachtete Drehrohrofen ist in zweifacher Ausführung für die Verbrennungslinien 1 und 2 in der Anlage vorhanden und wurde im Jahr 1980 in Betrieb genommen. Mit einer Länge von 12 m und einem Außendurchmesser von 4,5 m ergibt sich ein Abfalldurchsatz von 19,5 t/h. Die genehmigte Brennstoffwärmeleistung beträgt 61,5 MW. [9, vgl.S.130]. Im Inneren schützt eine feuerfeste Ausmauerung den Stahlmantel. Die Stirnwand des Drehrohres ist zusätzlich wassergekühlt. An ihr befindet sich auf der Innenseite außerdem ein Brenner.

- **Nachbrennkammer**

Unmittelbar an das Drehrohr ist eine Nachbrennkammer angeschlossen, in der unter Zugabe von Sekundär- und Tertiärluft übrige unverbrannte Bestandteile des Rauchgases zur Umsetzung gelangen. Am unteren Ende der Nachbrennkammer befindet sich die Nassentschlackung in der Schlacke und Schrott entfernt werden.

- **Dampferzeuger**

In Abbildung 7 ist der zum Einsatz kommende Dampferzeuger schematisch dargestellt.

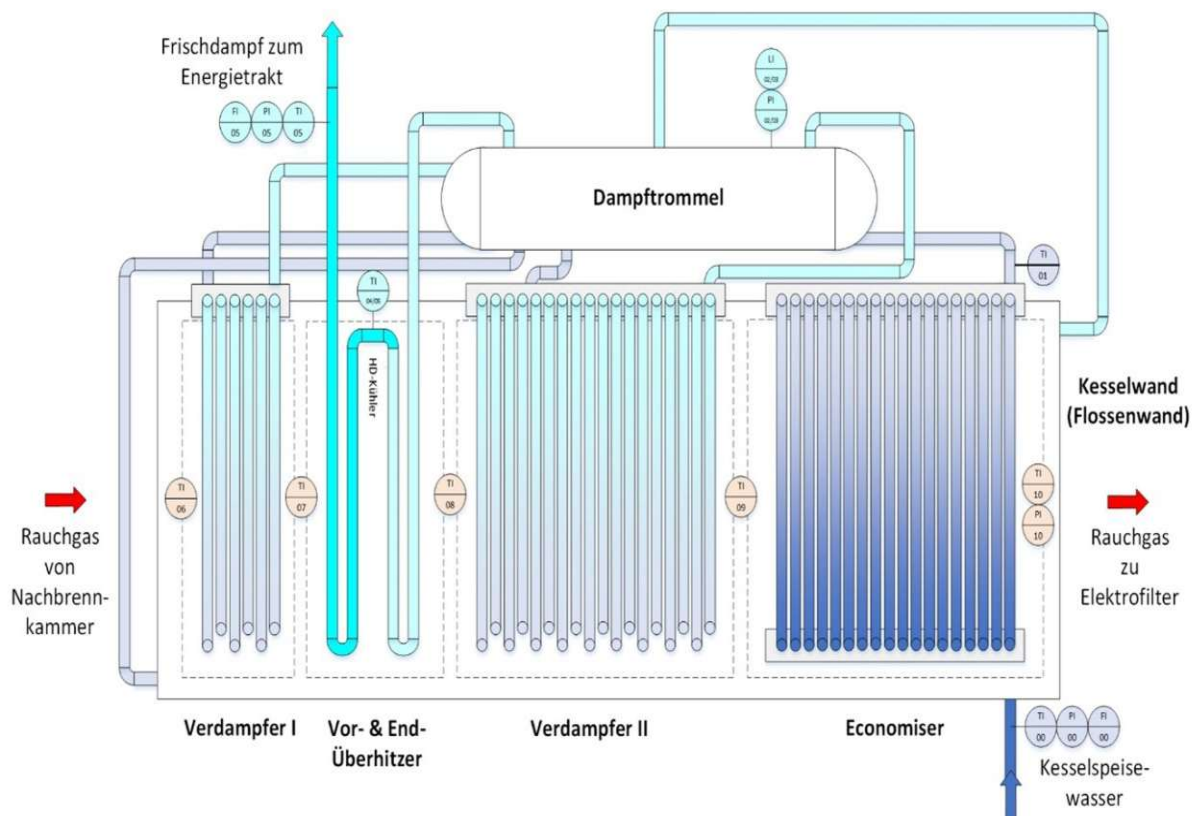


Abbildung 7: Schema des Dampfkessels inklusive Subeinheiten [8, S.3]

Der eingesetzte Dampferzeuger ist ein Dampferzeuger mit Naturumlaufsystem und einer sich über dem Rauchgaszug befindenden Dampftrommel. Der Dampfkessel besteht aus mehreren Submodulen die sich in Rauchgasrichtung wie folgt aneinanderreihen:

- Verdampfer I: Im Verdampfer wird siedendes Wasser aus der Dampftrommel in Dampf umgewandelt. Dies geschieht innerhalb der Rohrbündel, da beide Verdampfer Rohrbündelverdampfer sind. Der dabei entstehende Dampf strömt zurück in die Dampftrommel, wo dieser von Restwasser befreit wird. Die dafür nötige thermische Energie wird dem zwischen den Rohren hindurchströmenden Rauchgas entzogen.
- Endüberhitzer: Das aus dem ersten Verdampfer ausströmende Abgas tritt in den Endüberhitzer ein und erwärmt dort den bereits im Vorüberhitzer überhitzten Dampf aus der Dampftrommel.
- Einspritzkühler: Zwischen dem Vor- und dem Endüberhitzer befindet sich der Einspritzkühler. In diesem wird im Vollastbetrieb der Dampf durch eingespritztes Speisewasser, welches vor dem Economiser abgezweigt wird, abgekühlt, um am Austritt des Endüberhitzers konstante Dampfparameter für die Turbine zu erhalten.
- Vorüberhitzer: Der Vorüberhitzer ist wie der Endüberhitzer ebenfalls ein Rohrbündelwärmetauscher.
- Verdampfer II: Um die Dampferzeugerleistung zu erhöhen, existiert ein zusätzlicher Verdampfer, welcher ebenfalls als Rohrbündel ausgeführt ist.
- Economiser: Als letztes durchströmt das Rauchgas den Economiser. In diesem wird das frische Speisewasser mit der Restwärme im Abgas vorgewärmt, um eine bessere energetische Nutzung des Rauchgases zu erzielen. Die Temperatur des aus dem Economiser in die Dampftrommel austretenden Speisewassers ist dabei unterhalb der Siedetemperatur. Diese Temperaturdifferenz ist gewünscht, um im Economiser keine Dampfblasen zu erzeugen und wird auch als „Subcooling“ bezeichnet.

Die Dampftrommel befindet sich oberhalb des Rauchgaszugs. Sie ist das Bindeglied im Dampfkessel, indem sie die beiden Verdampfer mit den Überhitzern und einer Speisewasserzufuhr sowie einer Abschlammung verbindet. Die Abschlammung dient dazu, die sich im flüssigen Teil der Dampftrommel ansammelnden Salze und weitere in der Dampfphase schwer lösliche Verbindungen zu entfernen, um so das System vor Verunreinigungen zu schützen.

• Rauchgasreinigung

Für die Rauchgasreinigung stehen Elektrofilter, Gaswäscher und Aktivkohlefilter in selbiger Reihenfolge zur Verfügung [9, vgl.S.132].

- Elektrofilter: Im ersten Schritt werden die anfallenden Aschepartikel im Rauchgas auf 10-30 mg/Nm³ vermindert [9, vgl.S.132]. Eine schematische Darstellung des Elektrofilters ist in Abbildung 8 zu sehen.

- Gaswäscher: Die Nasswäsche ist zweistufig aufgebaut. Hierbei werden saure, leicht wasserlösliche Gase und Staub sowie Schwermetalle abgeschieden. [9, vgl.S.132]. Schematisch sind die Wäscher in Abbildung 9 dargestellt.
- Aktivkohlefilter: Bevor das Abgas die Anlage verlässt, muss dieses noch die Aktivkohlefilter, welche als Polzeifilter fungieren, passieren. Jedes einzelne Modul ist mit 15 t Adsorbens gefüllt, wobei die Adsorber jeweils aus 8 einzelnen Modulen bestehen. Im oberen Teil wird ständig Koks aufgegeben und am unteren Ende abgezogen. Ein solcher Aktivkohlefilter ist in Abbildung 10 zu sehen.
- SCR-Anlage: Als letzter Schritt nach dem Aktivkohlefilter folgt noch eine Sammel-SCR-Anlage [9, vgl.S.132].

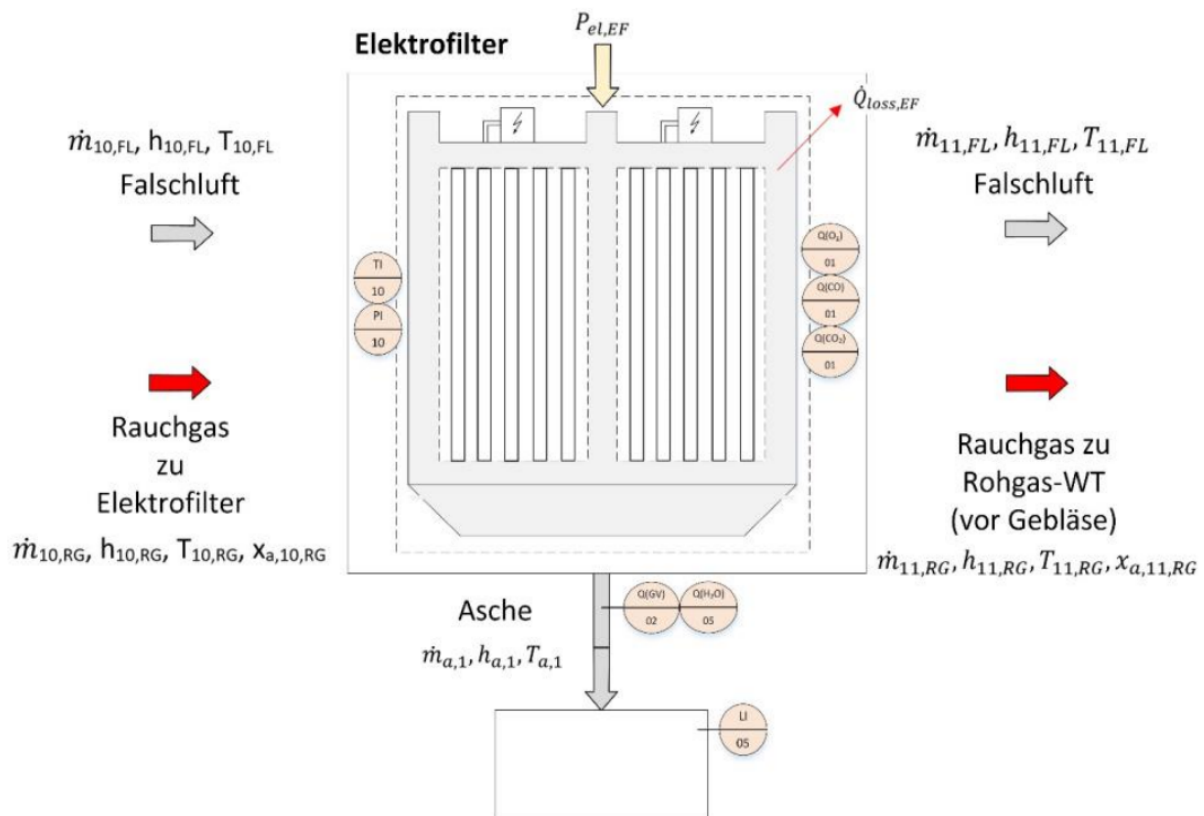


Abbildung 8: Schema des Elektrofilters [8, S.38]

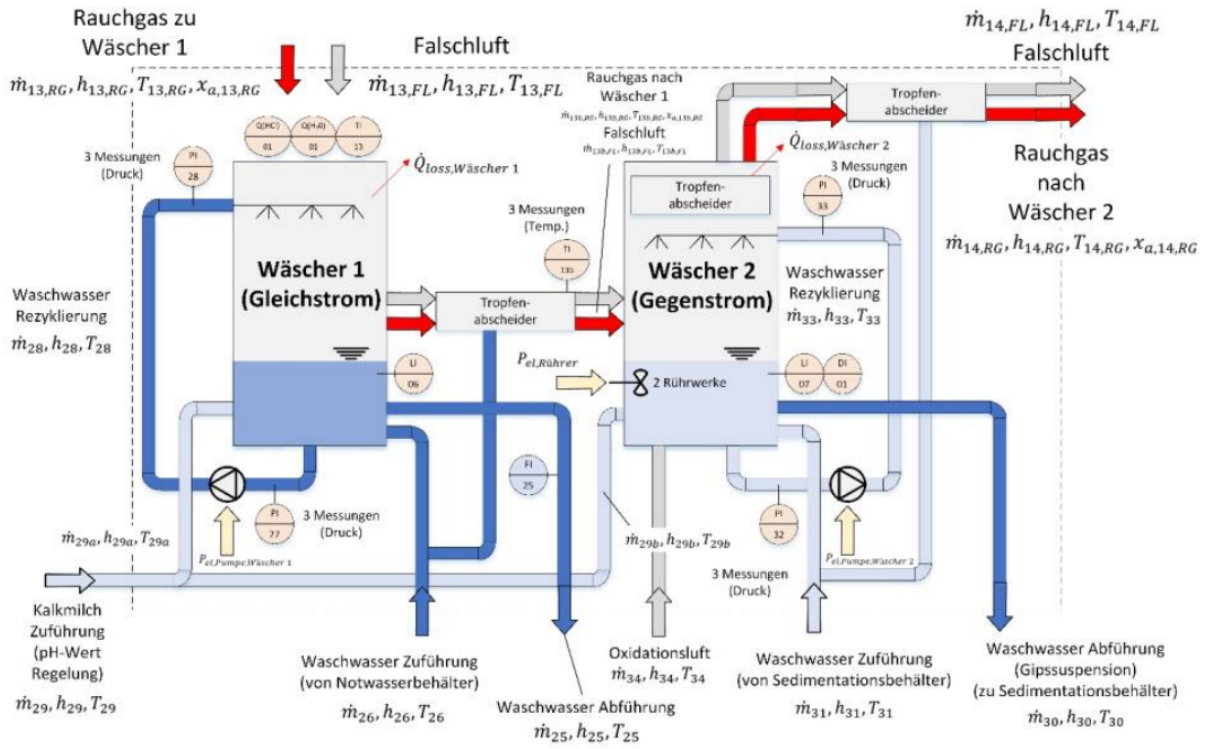


Abbildung 9: Schema des Gaswäschers [8, S.48]

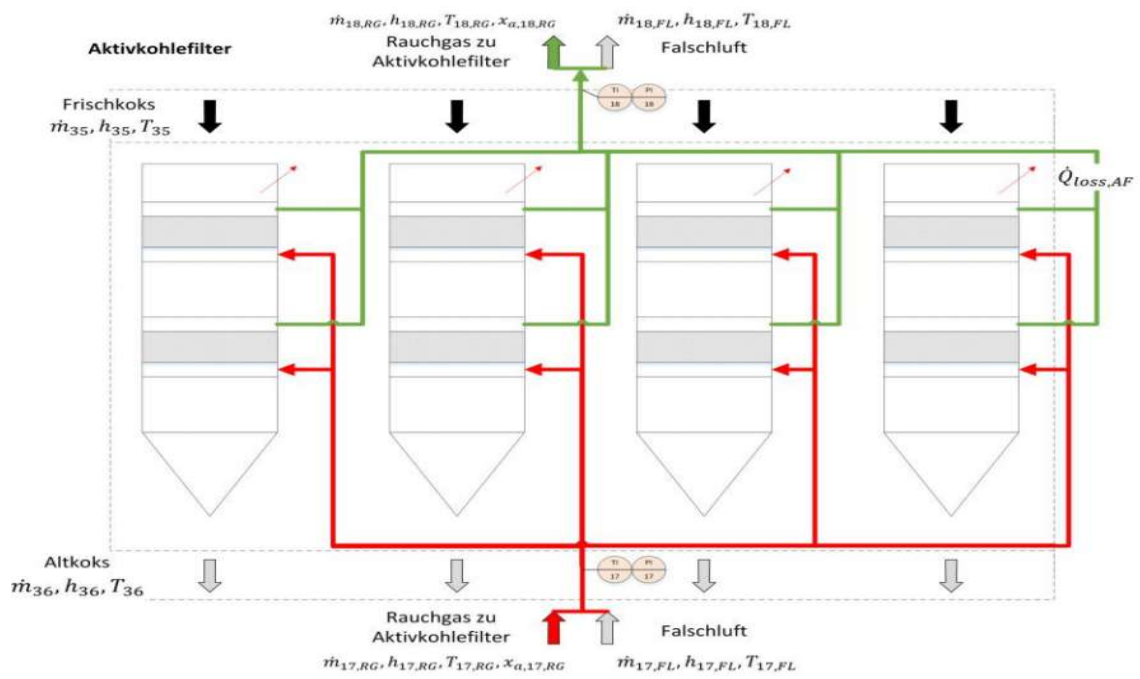


Abbildung 10: Schema des Aktivkohlefilters [8, S.53]

- Wärmeverschubsystem:** Das Wärmeverschubsystem dient dazu, das in den Wäschern abgekühlte Gas wieder zu erwärmen. Die Temperaturstufung erfolgt insofern, als dass die Temperaturen dem jeweiligen Reinigungsschritt angepasst werden. Dazu wird dem Gas vor den Wäschern in einem Rohgas-Wärmetauscher Wärme entzogen und ihm hinterher über einen Reingas-Wärmetauscher wieder zugeführt [9, vgl.S.132]. In der anschließend dargestellten Abbildung 11 ist ein Schema des Wärmeverschubsystems abgebildet.

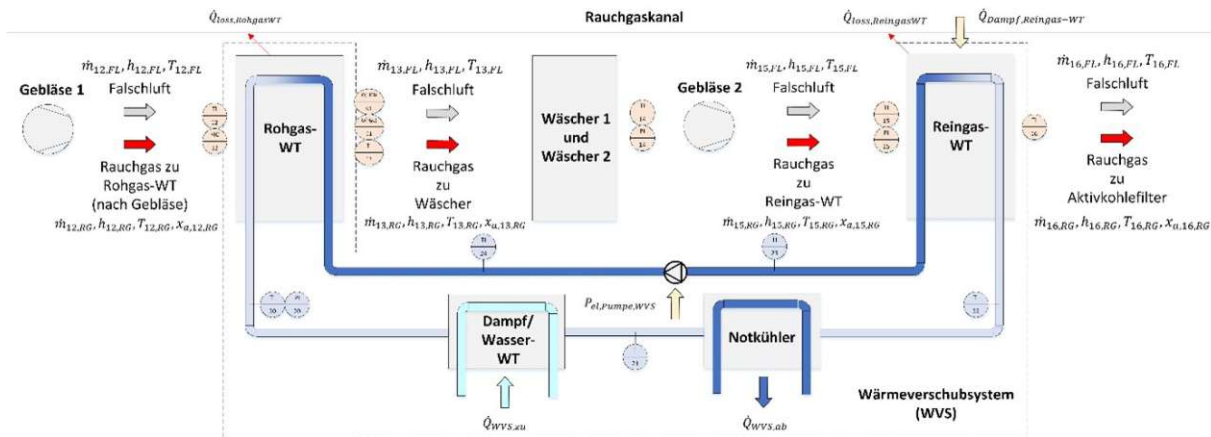


Abbildung 11: Schema des Wärmeverschubsystems [8, S.43]

Nach der Beschreibung der unterschiedlichen Varianten der Müllverbrennung, sowohl im Hinblick auf zu verbrennende Stoffe, als auch auf Verfahren und Bauarten der Anlagen, wird im folgenden Kapitel auf die Umsetzungsmöglichkeit von Simulationsverfahren und Anlagenunterstützung mithilfe von digitalen Zwillingen näher eingegangen.

3 Methodik des digitalen Zwillings

Der Begriff „digitaler Zwilling“ ist aus dem Umfeld der „Industrie 4.0“ und des „Internet of things (IoT)“ nicht mehr wegzudenken. Zur Anwendung kommt der digitale Zwilling beispielsweise im laufenden Betrieb, bei der Wartungsplanung oder aber auch schon in der Prozessentwicklung und der Design-Phase [10, vgl.S.3591f].

3.1 Definition eines digitalen Zwillings

Für den Begriff digitaler Zwilling existieren je nach Aufgabenstellung auch verschiedene im Umlauf befindliche Definitionen. In der Grundidee sprechen sie jedoch alle vom selben Objekt.

Ein digitaler Zwilling besitzt ein virtuelles dynamisches Modell, welches eine exakte digitale Abbildung eines realen Objektes darstellt. Dieses Modell verfügt über die

Gleichungen die das physikalische Objekt beschreiben, sowie über Messwerte und weitere Daten, wie etwa Geometrien, des Originals. Mithilfe dieser digitalen Nachbildung können unterschiedliche Zustände simuliert, sowie daraus resultierende abweichende Belastungen und Verhaltensweisen bestimmt werden [11, vgl.S.597]. Eine Möglichkeit der Definition ist jene der „National Aeronautics and Space Administration (NASA)“. Dieser zufolge ist ein digitaler Zwilling eine multiphysikalische, skalierbare, wahrscheinliche, übermäßig genaue Simulation die zeitnah den Zustand des zugehörigen Objektes widerspiegelt, in Anbetracht historischer Daten, aktueller Sensordaten und dem physikalischen Modell [12, vgl.S.2406].

Damit besteht ein digitaler Zwilling im Grunde aus drei Teilen [13, vgl. S. 417]:

- Dem physischen Objekt bzw. der Anlage,
- dem virtuellen Modell und
- dem Datenaustausch zwischen diesen beiden Bestandteilen.

Darüber hinaus wird diese Liste oftmals um die Punkte „Datenmanagement“ und „Anwendung“ erweitert, um den digitalen Zwilling im sogenannten 5-D-Modell zu repräsentieren [12, vgl.S.2406].

3.2 5-D-Modell

Die zuvor erwähnte, auf fünf Punkte erweiterte, Liste bildet die Grundlage für das 5-D-Modell von denen alle Dimensionen als gleich gewichtet zu betrachten sind [12, vgl.S.2406f]. Abbildung 12 skizziert die Beziehungen dieser 5 Dimensionen zueinander. Das 5-D-Modell besteht im Einzelnen aus folgenden Dimensionen:

- 1. Der physischen Anlage, also dem realen Objekt, welches dem digitalen Zwilling zugrunde liegt. Schematisch vereinfacht dargestellt ist hierfür in Abbildung 12 eine Sondermüllverbrennungsanlage.
- 2. Dem virtuellen Abbild des realen Objektes, in Abbildung 12 durch ein Fließbild in einer Simulationsumgebung repräsentiert.
- 3. Der möglichen Anwendung, beispielsweise die Möglichkeit einer intelligenten Steuerung des realen Objektes oder einer automatisierten Überwachung.
- 4. Das für den Datenaustausch erforderliche Datenmanagement. Im Datenmanagement werden historische Daten oder Echtzeitdaten aufbereitet und zwischengespeichert.
- 5. Dem Datenaustausch zwischen den einzelnen Abschnitten, zum Beispiel durch die direkte Anbindung an die Messtechnik des realen Objektes, um die physische Anlage und das Datenmanagement zu verbinden.

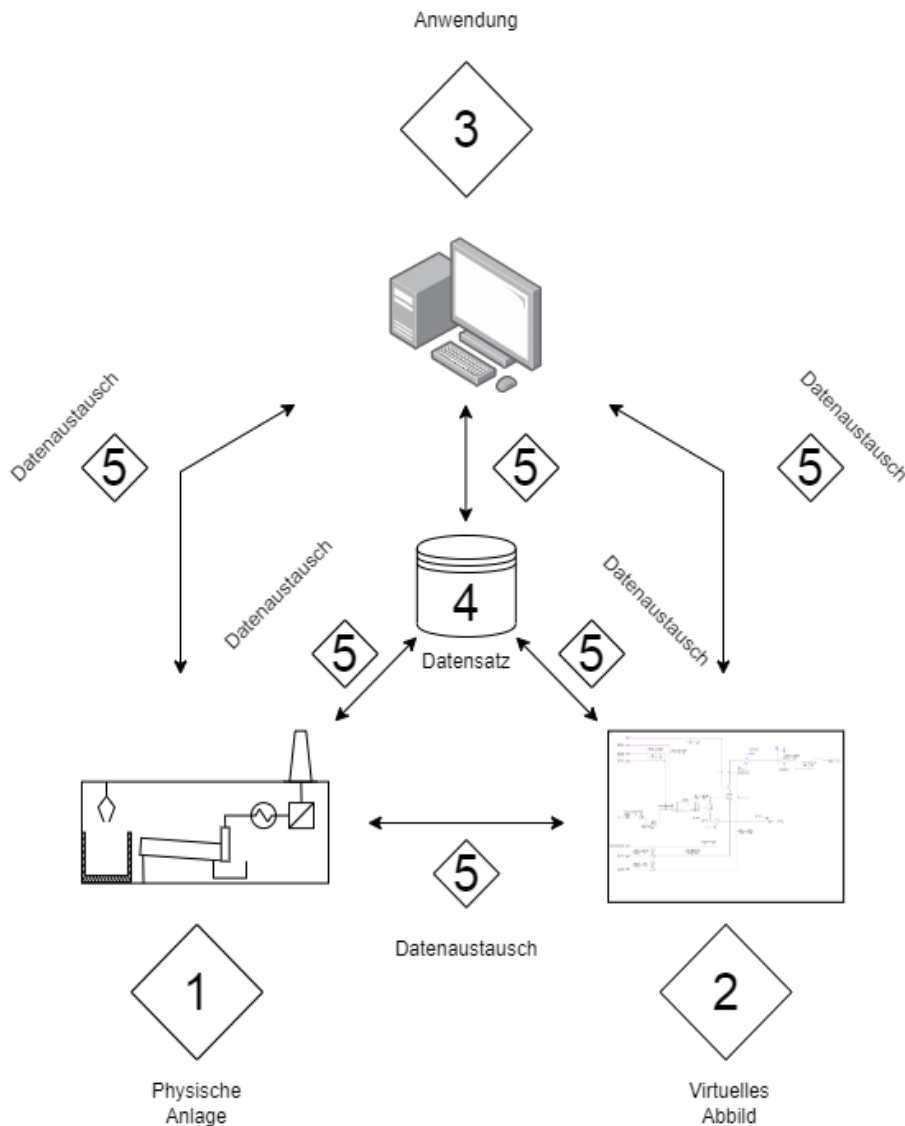


Abbildung 12: Visualisierung des 5-D-Modells [12, vgl.S.2406]

3.3 Arten von digitalen Zwillingen

In diversen Medien werden oftmals verschiedene Synonyme für den Begriff „digitaler Zwilling“ verwendet. In der nachfolgenden Grafik ist eine kurze Auflistung verschiedener Möglichkeiten des Einsatzes digitaler Modelle ohne Anspruch auf Vollständigkeit dargestellt. Die Unterscheidung der virtuellen Repräsentationen bezieht sich auf unterschiedliche Datenintegrationslevel.

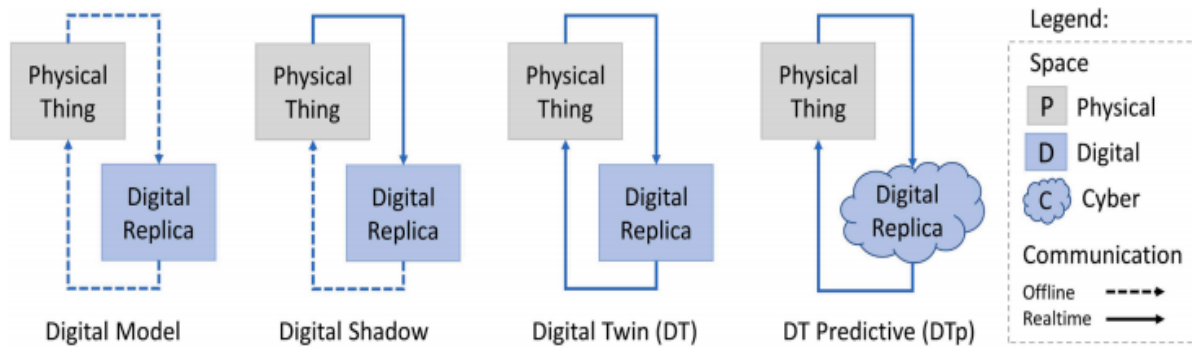


Abbildung 13: Integrationslevel digitaler Zwillinge[14, S.7]

- Digital Model: Ein digital Model (digitales Modell) liegt vor, wenn lediglich ein offline Datenaustausch zwischen physischem und virtuellem Abbild erfolgt [14, vgl.S.6f].
- Digital Shadow: Im Unterschied zum Digital Model führt beim Digital Shadow (digitaler Schatten) eine Änderung von Zustandsparametern des realen Objekts direkt zu einer Anpassung der Daten im Modell. Somit charakterisiert sich ein Digital Shadow durch den einseitigen Echtzeit-Datenaustausch zwischen physischem und virtuellem Abbild [14, vgl.S.6f].
- Digital Twin: Liegt ein Echtzeit-Datenaustausch sowohl vom realen Objekt zum Digital Model als auch vice versa vor, so ist dies ein Digital Twin (digitaler Zwilling) [14, vgl.S.6f].
- Digital Twin Predictive: Wird auch noch die Möglichkeit vorausgesetzt, mit dem digitalen Modell Vorhersagen über die zukünftigen Zustände des realen Modells treffen zu können, so entspricht dies der höchsten Ausbaustufe, einem sogenannten Digital Twin Predictive (vorhersagender digitaler Zwilling) [14, vgl.S.6f].

3.4 Stand der Technik

Der Beginn der Geschichte des digitalen Zwillings wird auf eine Präsentation im Jahr 2003 zurückgeführt. Von 2003 bis 2011 wurden zwar nur wenige Artikel zu dem Thema veröffentlicht, jedoch führte die rasch fortschreitende technologische Entwicklung in diesem Zeitrahmen, vor allem im Bereich der Kommunikationstechnologie, des Internets und der Sensortechnologie dazu, dass die Forschungen in diese Richtung im Jahr 2012 an Fahrt gewannen. Diese technologische Entwicklung brachte auch das Konzept des digitalen Zwillings voran [12, vgl.S.2407].

Wie der allgemeine Einsatz von digitalen Zwillingen eingeteilt werden kann, ist in Abbildung 14 dargestellt. An die Position von „Intelligent Control“ ist in diesem Fall

der digitale Zwilling einzusetzen. Die Unterscheidung erfolgt nach der Art und Weise in der der digitale Zwilling eingebunden wird.

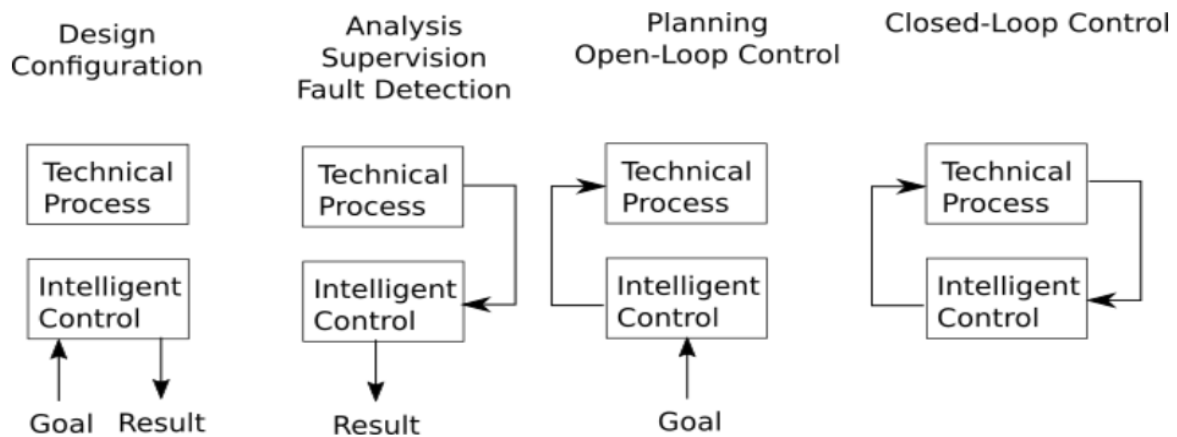


Abbildung 14: Einsatzmöglichkeiten intelligenter Steuerung [15, S.4]

Die erste Möglichkeit des Einsatzes ist es, den digitalen Zwilling vom Prozess abzukoppeln und ihn rein für Auslegungen und Konfigurationen zu nutzen. Bei der zweiten Möglichkeit ist der Zwilling dem Prozess nachgeschaltet und kann in dieser Konfiguration zur Kontrolle, Analyse oder Fehlersuche eingesetzt werden. Die dritte Option lässt sich sowohl für die Planung als auch bei der Regelung einsetzen, indem die Steuerung des Prozesses dem digitalen Zwilling überlassen wird. Hier ist jedoch keine Rückkopplung und somit keine Regelung möglich. Dieses Problem lässt sich mit der vierten Möglichkeit, der geschlossenen Schleife, lösen, indem der Zwilling sowohl die Anlage steuert, als auch eine Rückmeldung vom Prozess erhält und somit bei Abweichungen vom Sollwert eingreifen kann.

Nach der allgemeinen Abgrenzung wird in der Folge auf einige praktische Anwendungsbeispiele eingegangen.

- **Digitaler Zwilling im Engineering**

Eine Möglichkeit, die erhöhte Verbreitung von digitalen Zwillingen in Industrieprozessen zu nutzen, ist die Verwendung der Feedback-Daten bei der Entwicklung neuer Produkte oder Folgeprodukte. Auch können mithilfe der Simulation Fallanalysen schon während der Designphase durchgeführt werden [12, vgl.S.2409]. Basierend auf der allgemeinen Einteilung in vier Kategorien (Abb. 13), ist dies ein Beispiel für die Kategorie des digitalen Modells.

- **Digitaler Zwilling im Anlagenbetrieb**

In der Produktion können digitale Zwillinge sowohl den Menschen als Bediener unterstützen, als auch aufgrund der vorliegenden Daten die Prozesse optimieren und dadurch z.B. anfallenden Müll verringern. Da der Zwilling im Prozess sowohl Zugriff auf die Daten des realen Objektes, als auch auf Umgebungsdaten hat, ist auch im laufenden Betrieb die Möglichkeit gegeben, mithilfe von Simulationen,

die Produktion an die vorherrschenden Umfeldbedingungen anzupassen [12, vgl.S.2409f].

- **Digitaler Zwilling in der Wartung**

Für die Planung der Wartung des physischen Objekts besteht die Notwendigkeit, den Gesundheitszustand jedes Einzelteils des Objektes zu kennen. Dies wird durch den Einsatz eines digitalen Zwillings möglich [13, vgl. S.417].

Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Formen von digitalen Zwillingen ist ein allgemein anwendbares Konzept nur schwer möglich. Der hier behandelte Versuch basiert auf drei Schritten: Als erstes wird ein Modell des dynamischen und kinetischen Verhaltens des Objektes erstellt. Damit ist vorwiegend gemeint, jene Teile des realen Objektes zu ermitteln, die abgebildet werden sollen und welchen Belastungen diese ausgesetzt sind. Je nachdem, wie viele Daten zur Verfügung stehen, eignen sich dafür unterschiedliche Modelle. Die hier getroffene Auswahl wirkt sich bereits auf den Aufwand bzw. die benötigte Rechenzeit aus [13, vgl.S.418f].

Danach steht die Entwicklung eines virtuellen Sensorkonzeptes an, um die erforderlichen Messwerte zu bekommen. Das virtuelle Sensornetz soll jene Daten liefern, die zwar benötigt, aber nicht von physischen Sensoren gemessen werden bzw. gemessen werden können [13, vgl.S.419].

Im dritten Schritt stehen jene Datensätze, die aktualisiert werden müssen, um sicherzustellen, dass das Simulationsmodell auch weiterhin den realen Zustand des Objektes abbildet. Dabei findet eine Reihung der Parameter nach Wichtigkeit statt, also nach dem Einfluss den sie bei einem Ausfall beispielsweise auf die Leistungsfähigkeit des realen Objektes hätten [13, vgl.S.419f]. Im laufenden Betrieb sind die berechneten Parameter regelmäßig mit den realen Daten abzugleichen, um ein Abdriften des Modells aufgrund von Modellfehlern zu beheben und somit eine bestmöglich validierte Simulation zu erhalten [13, vgl.S.421]. Auch dieses Beispiel fällt in die Kategorie der vorausschauenden digitalen Zwillinge.

- **Digitaler Zwilling in weiteren Anwendungsbereichen**

Ein weiteres großes Thema in der heutigen Industrie ist das Konzept der autonomen Fahrzeuge und immer besser werdender Assistenzsysteme. Gerade im zweiten Bereich existieren Konzepte, digitale Zwillinge einzusetzen, um die Komplexität der Simulation herabzusetzen und gleichzeitig die Flexibilität der Systeme zu erhöhen. Doch auch außerhalb der Automatisierung sind digitale Zwillinge breit einsetzbar. Sie eignen sich beispielsweise auch für die Schulung von Anlagenfahrern, die Fabriks- und Kraftwerksplanung sowie die Prozessentwicklung. Doch auch abseits rein technischer Anwendungen können sie eingesetzt werden, etwa bei kollaborativen Geschäftsmodellen [12, vgl.S.2410].

3.5 Aktuelle Herausforderungen im Umgang mit digitalen Zwillingen

Beim digitalen Zwilling ist der Grad der Genauigkeit ein heikles Thema. Der Detaillierungsgrad stellt in der Praxis immer einen Kompromiss aus praktikabler Implementierung, auch im Hinblick auf Erstellung und brauchbare Rechenzeit, und einer möglichst hohen Modellgenauigkeit, um Fehler zu vermeiden, dar [13, vgl.S.418]. Obwohl die Modellierung eines digitalen Zwillings eigentlich immer eine große Rolle spielt, ist bis jetzt kein allgemeiner Leitfaden für die Modellbildung entstanden. Vielmehr haben sich verschiedene Modelle etabliert, wie etwa fünf- oder dreistufige Ansätze [12, vgl.S.2412].

Da dies ein eher neues Forschungsgebiet ist, sind bei der Modellierung und der Verknüpfung des Modells mit dem realen Objekt noch keine einheitlichen Standards entstanden. So existieren zum Beispiel noch keine einheitlichen Schnittstellen und Kommunikationsprotokolle [12, vgl.S.2412]. In dem Review Paper von Hammerschmid et al. wird erstmalig eine Methodik aufgezeigt, wie bereits in der Prozessentwicklung von Energietechnologien möglichst breit anwendbare digitale Zwillinge mitentwickelt werden können [16, vgl.]. Auch das Thema Sicherheit in Bezug auf ungewollten Zugriff ist ein nicht zu vernachlässigendes Thema, weshalb dieses im nachfolgenden Kapitel extra behandelt wird.

3.6 Die virtuelle Sicherheit des digitalen Zwillings

Um sich über die Sicherheitslage des digitalen Zwillings im Klaren zu sein und somit Schwachpunkte identifizieren zu können, existieren verschiedene Bedrohungsanalysen. Eine Möglichkeit diese durchzuführen, ist anhand der S.T.R.I.D.E-Methode von Microsoft: Die Abkürzung steht für die verschiedenen Kategorien in die die Bedrohungen eingeordnet werden:

- Spoofing - Authentifizierung
- Tampering - Integrität
- Repudiation - Nicht-Abstreitbarkeit
- Information Disclosure - Vertraulichkeit
- Denial of Service - Verfügbarkeit
- Elevation of Privilege - Autorisierung

Nach dieser Methode ergeben sich für digitale Zwillinge verschiedene Bedrohungsszenarien, wie etwa das Einschleusen von Schadsoftware. Dies würde unter die Kategorie „Tampering“ fallen. Auch das Abgreifen von Daten wird nach dieser Methode erkannt und wäre sowohl durch „Repudiation“ als auch durch „Spoofing“ erfasst. Ein weiteres Beispiel wäre die Manipulation des realen Modells mithilfe

geänderter Daten im digitalen Modell, was wiederum der Kategorie „Elevation of Privilege“ zuzuordnen wäre. Durch die Abkapselung einzelner Teilbereiche der Systeme und die Verwendung von gesicherten Kommunikationsprotokollen sowie Authentifizierung jener Personen, die über wichtige Zugriffsrechte verfügen, kann ein Schutz vor Angriffen durch Schadsoftware und ungewollten Zugriff aufgebaut werden. Sofern drahtlose Kommunikation zwischen dem realen Objekt und dem Modell eingesetzt wird, ist auch dieser Abschnitt eigens abzusichern. Für die Gewährleistung der Sicherheit von digitalen Zwillingen existieren mittlerweile Security Frameworks [17, vgl.S.14ff].

3.7 Digitaler Zwilling und Big Data

Im Zusammenhang mit den Schlagworten „Industrie 4.0“ und „Internet of things (IoT)“ fällt neben dem digitalen Zwilling häufig ein weiterer Begriff: „Big Data“.

Mit Beiden lassen sich beispielsweise Probleme vorhersagen oder Echtzeit-Monitoring durchführen, was darin resultiert, dass mit beiden Kostenersparnisse erreicht und Prozessoptimierungen vorgenommen werden können. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, beide Technologien zu kombinieren um ein besseres Ergebnis zu erzielen [10, vgl.S.3589].

Obwohl auch hier keine scharfe Definition generelle Gültigkeit hat, lässt sich sagen, dass unter den Begriff „Big Data“ große Datenmengen fallen, die strukturiert, halb strukturiert oder aber auch komplett unstrukturiert vorliegen. Hierbei werden Datenmengen von einigen PB (1000 TB) bis hin zu ZB (1 000 000 000 TB) genannt. Andererseits ist damit der Wert der Datenmengen gemeint, also jene Aussagen, die sich durch Aufbereiten und Analysieren ebenjener großen Datenmengen gewinnen lassen. Darüber hinaus lässt sich der Begriff auch definieren durch die Datenmenge, die Unterschiedlichkeit, die Geschwindigkeit und den Wert. Mit Unterschiedlichkeit sind die Größe, der Inhalt sowie das Format und die Anwendungen der Daten gemeint. Die Geschwindigkeit bezieht sich auf das Tempo, mit dem die Daten verarbeitet werden müssen und mit Wert sind jene Daten gemeint, die sich aus der großen Datenmenge mithilfe komplexer Algorithmen herauslesen lassen [10, vgl.S.3586].

Durch eine Verknüpfung von digitalem Zwilling und Big Data lassen sich Probleme früher erkennen und besser beheben. Moderne Anlagen generieren im laufenden Betrieb eine Vielzahl an Messdaten, wobei hier keine Rolle spielt in welcher Form (strukturiert, unstrukturiert) diese Daten vorliegen, sondern rein die Menge. Mithilfe von Big Data lassen sich Veränderungen in großen Datenmengen schnell und präzise erkennen und lokalisieren. Mit diesen gefundenen Daten kann der digitale Zwilling versorgt werden, der wiederum, basierend auf seiner Simulation, den realen Prozess zeitnah und vor allem die richtigen Parameter anpassen kann. Dadurch können ungewollte Situationen früh erkannt und schnell behoben werden [10, vgl.S.3591].

Ein weiteres Vorteil, der hier allerdings nicht näher behandelt werden soll, ist folgender: Die Kooperation aus Big Data und digitalem Zwilling lässt sich nicht nur während des laufenden Betriebs vorteilhaft einsetzen. Auch ein Einsatz in der Designphase kann durchaus zielführend sein. So können etwa die relevanten

Objekteigenschaften und Kundenanforderungen aus großen vorliegenden Datensätzen mithilfe von Big Data identifiziert und mithilfe des digitalen Zwillings virtuell realisiert und geprüft werden [10, vgl.S.3592f].

3.8 Simulationsumgebung des digitalen Zwillings

Bei der Erstellung eines digitalen Zwillings ist eine passende Softwareumgebung unverzichtbar. Die Entscheidung kann sich stark auf den Arbeits- und Zeitaufwand auswirken. Da eine ausreichende Kenntnis der Materie als Grundvoraussetzung für die Erstellung eines korrekt funktionierenden digitalen Modells vorausgesetzt werden kann, wäre eine Möglichkeit, das virtuelle Modell des digitalen Zwillings komplett von Null weg selbst zu programmieren. Diese Methode bietet maximale Freiheit bei vermeintlich maximiertem Arbeitsaufwand und ist somit vor allem bei steigender Komplexität des realen Objektes nur in bestimmten Fällen zu empfehlen. Um das geplante Ziel im vorgesehenen Zeitrahmen erreichen zu können, wird in dieser Diplomarbeit auf die komplette direkte Programmierung verzichtet und ein kommerzielles Fließschemasimulationsprogramm eingesetzt. Für die Auswahl des geeigneten Programms besteht die Notwendigkeit, deren Eigenschaften zu kennen. Sie unterscheiden sich hauptsächlich in folgenden Punkten:

- **Lösungsmethodik**

Hierbei werden zwei grundsätzliche Ansätze unterschieden: Bei gleichungsorientierten Programmen wird zuerst ein großes Gleichungssystem aus sämtlichen Gleichungen des Modells gebildet und dieses dann auf einmal gelöst. Im Gegensatz dazu werden bei sequentiellen Programmen mehrere kleinere Gleichungssysteme hintereinander gelöst, wobei jeweils die Lösung des vorangehenden Systems die Eingangswerte für das nachfolgende System darstellen.

Während Erstere den Vorteil haben, dass sie in der Regel schneller zu lösen sind, müssen aber bei gleichungsorientierten Programmen gute Startwerte gefunden werden, da ansonsten vor allem bei Modellen mit Rückführungen Probleme bei der Konvergenz auftreten können. Sequentielle Programme können problemlos iterativ gelöst werden. Auch die Startwerte können für jedes Gleichungssystem einzeln vorgegeben werden [18, vgl.S.26].

- **Programmiersprache**

Hier sind als Beispiele Fortran, C, C++ und PASCAL zu nennen. Die Auswahl der verwendeten Programmiersprache wirkt sich auf die Rechengeschwindigkeit aus. Direkt mit der Programmiersprache hat der Nutzer nur dann zu tun, wenn eigene Komponenten erstellt werden. Dafür stellen die meisten Programme jedoch eigene Umgebungen zur Verfügung [18, vgl.S.26f].

- **Stoffdaten**

Da die Qualität der Simulationsergebnisse maßgeblich von den Stoffdaten abhängig ist, und auch die Belastbarkeit der Ergebnisse unter Abweichungen der

verwendeten zu den realen Stoffdaten leidet, spielen diese eine wichtige Rolle. Jedoch wird die Rechengeschwindigkeit auch durch den Genauigkeitsgrad der für die Stoffdaten verwendeten Modelle beeinflusst und im Einzelfall ist abzuwägen, ob hochpräzise Modelle überhaupt benötigt werden. Für den jeweiligen Anwendungsbereich verfügen die Programme ohnehin meist über passende Modelle [18, vgl.S.27f].

Darüber hinaus wird unterschieden zwischen Programmen die stationäre Betriebszustände lösen, und solchen, die instationäre, also zeitabhängige, Aufgaben lösen können. Eine Übersicht über Programme, die stationäre Problemstellungen lösen können, ist in Tabelle 2 zu sehen.

Tabelle 2: Simulationsprogramme zur Bilanzierung von Anlagen in stationären Betriebszuständen und Programmmerkmale [18, vgl.S. 28]

Programm	Fokus	Programmiersprache	Lösungsmethodik
Aspen Plus	Raffinerietechnik	Fortran	Sequentiell
Chemcad	Raffinerietechnik	C++	Sequentiell (teilweise gleichungsorientiert)
EBSILON	Kraftwerkstechnik	PASCAL	Gleichungsorientiert
IPSEpro	Kraftwerkstechnik	C++	Gleichungsorientiert
Prosim	Raffinerietechnik	Visual Basic	Sequentiell / gleichungsorientiert

In der nachfolgenden Tabelle 3 sind Programme angeführt, die mit instationären Betriebszuständen rechnen können.

Tabelle 3: Simulationsprogramme zur Bilanzierung von Anlagen in instationären Betriebszuständen und Programmmerkmale [18, vgl.S. 29]

Programm	Fokus	Programmiersprache	Lösungsmethodik
Aspen Dynamics	Raffinerietechnik	Fortran	Gleichungsorientiert
gPROMS	Raffinerietechnik	Spezialcode	Gleichungsorientiert
IPSEpro Dynamics	Kraftwerkstechnik	C++	Gleichungsorientiert

Da am Institut für Verfahrenstechnik an der TU Wien die meiste Expertise mit IPSEpro vorhanden und auch eine Lizenz für die dynamische Modellierung verfügbar ist, wird IPSEpro Dynamics für den digitalen Zwillings in dieser Diplomarbeit eingesetzt. Diese Entscheidung wird dadurch untermauert, dass die Software den Fokus auf Kraftwerkstechnik legt. Bei einem Blick in die Literatur wird zudem ersichtlich, dass sich IPSEpro anbietet, wenn ein Tool zur thermischen Anlagensimulation gesucht wird [19, vgl.].

Nachdem nun sowohl die Anlagen, als auch das Thema digitaler Zwilling selbst hinlänglich beschrieben wurden, wird im nächsten Abschnitt näher auf das verwendete IPSEpro Dynamics eingegangen.

4 Simulationsumgebung IPSEpro Dynamics

Die Softwaregruppe IPSEpro von Simtech beinhaltet verschiedene Simulationstools zur Bilanzierung unterschiedlicher Problemstellungen. Je nach zu lösender Problemstellung stellt sich die Frage, ob ein quasi-statisches oder ein dynamisches Modell eingesetzt wird. Dies hängt nicht zwingend von den zur Verfügung stehenden Daten ab, da bei beiden Varianten von denselben Ausgangsparametern und Eingabewerten ausgegangen werden kann. Somit können also beide Modell-Ansätze mit denselben Daten genutzt werden, wobei sich jedoch aufgrund des unterschiedlichen Modellverhaltens im Regelfall unterschiedliche Möglichkeiten des Erkenntnisgewinns ergeben.

Bei einer quasi-statischen Modellierung werden in jedem Zeitschritt, also bei jeder Änderung mindestens eines Eingabewertes, die Prozessparameter solange berechnet, bis sich ein stationärer Zustand einstellt. Dabei wird somit jeder Zeitschritt für sich so behandelt, als wäre dieser eine abgeschlossene Aufgabe ohne Beeinflussung durch vorhergehende Betriebszustände. Die einzelnen Zeitschritte werden also bei gleichen Ausgangsdaten für sich genommen immer dieselben Ergebnisse liefern. Diese Art der Simulation reiht somit eine beliebige Anzahl stationärer Betriebszustände aneinander, ohne, dass diese sich gegenseitig beeinflussen würden. Inwiefern die dabei gewonnenen Ergebnisse die realen Prozesse sinnvoll abbilden können, hängt somit sehr stark davon ab, wie der physikalische Prozess abläuft. Sind eher gleichmäßig ablaufende Prozesse ohne signifikante Sprünge der Eingabewerte, die nennenswerte Sprungantworten des realen physikalischen Systems zur Folge haben würden, zu erwarten, können mit diesem Ansatz durchaus verwertbare Rechenergebnisse erzielt werden. Dies betrifft unter anderem Systeme, die über sehr große Speichermassen im Vergleich zu den sich ändernden Eingabewerten verfügen.

Liegt allerdings ein System mit zumindest einer sehr dynamischen Komponente und durchaus nennenswerten Veränderungen bei den Prozessführungs-Parametern vor, besteht unter Umständen die Notwendigkeit, ein dynamisches Modell anzusetzen. Hierbei hat mitunter eine Sprungantwort eines vorhergehenden Zeitschritts sehr wohl einen Einfluss auf die aktuellen Berechnungen. Somit ist auch die Abbildung physikalischer Vorgänge, die sich nicht innerhalb eines Zeitschrittes abspielen, sondern länger andauern, möglich. Werden beispielsweise einem System im vorangegangenen Zeitschritt sehr große Brennstoffmengen zugegeben, die nicht innerhalb der Zeitschrittlänge zur vollständigen Umsetzung und erneuten Annäherungen von etwa Temperaturkurven zum Eingangswert führen, so muss bedacht werden, dass sich kein stationärer Zustand einstellt und die Annahme eines solchen zu einer beträchtlichen Abweichung vom realen Verhalten führen kann.

Unter Berücksichtigung der oberhalb angeführten Betrachtungsweisen wurde bei dem im Nachgang behandelten Modell auf das dynamische Softwaretool IPSEpro Dynamics

zurückgegriffen, da sich damit die reale Arbeitsweise eines Drehrohrofens in der Sondermüllverbrennung abbilden lässt.

Die für die Modellierung des digitalen Zwillings zum Einsatz gekommenen Software ist, wie zuvor erwähnt, eine Variante, die instationäre Zustände berücksichtigen kann. Infolge dessen besteht die Möglichkeit, ein dynamisches Modell einzusetzen, welches die realen physikalischen Zustände deutlich akkurater abbilden kann. Vor allem im Hinblick auf kurzzeitige Sprungantworten, die sich bei einer diskontinuierlichen Aufgabe der Müllfraktionen zwangsläufig einstellen.

Nachfolgend wird die Arbeitsweise mit dem Softwaretool IPSEpro Dynamics beschrieben.

4.1 Eingabe sich zeitlich ändernder Parameter

Wie bei den obigen Überlegungen bereits erwähnt, können die Datensätze für einen quasi-statischen und einen dynamischen Ansatz vollkommen ident sein. Dies ist auch relevant für das Setzen von Eingabewerten in den Fließbildern der verwendeten Software. Um sich zeitlich ändernde Werte eingeben zu können, können wie in Abbildung 15 unter dem Punkt „forced“ Tabellen ausgewählt werden. Diese Option erscheint allerdings nur unter der Voraussetzung, dass der dynamische Solver ausgewählt wurde. Mit diesen Einstellungen lassen sich dennoch statische Fließbilder, die über keine dynamischen Modelle verfügen, lösen. Die Berechnung erfolgt in einem solchen Fall quasi-statisch. Die Auswahl des dynamischen Solvers unter dem Punkt „Use Dynamics“ ergibt somit die Optionen für das Berücksichtigen sich zeitlich ändernder Eingabewerte. Die genaue Art der zeitabhängigen Betrachtung ergibt sich infolge dessen aus der Art der eingesetzten Modelle.

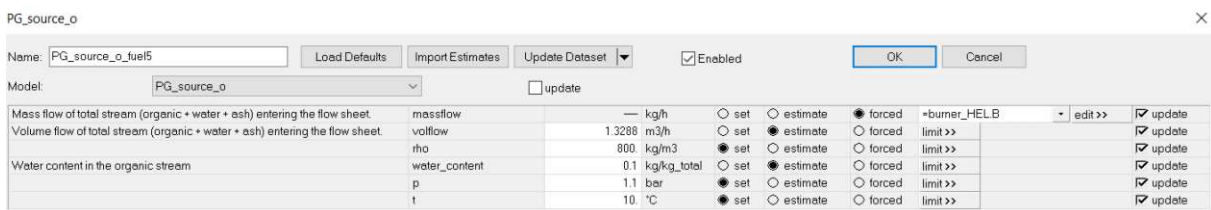
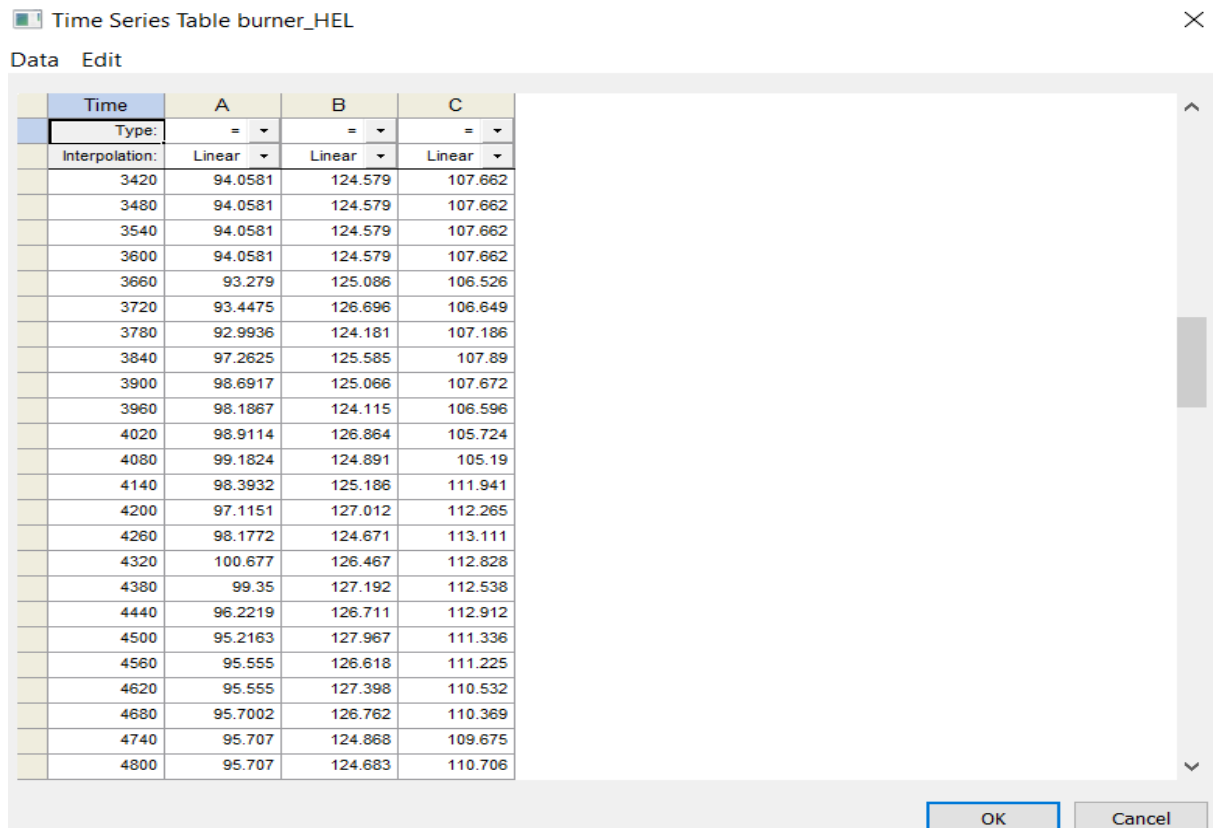


Abbildung 15: Setzen einiger Eingabewerte eines organischen Stoffstroms

Hinter dieser Auswahl werden sogenannte „Time Series Tables“ abgelegt, deren Aufbau in Abbildung 16 im Detail dargestellt ist. Wie in Abbildung 16 zu sehen ist, existiert eine Spalte „Time“, die den Zeitpunkt festlegt, ab welchem der neue Wert aus einer der rechten Spalten für den jeweiligen Parameter gesetzt wird. Ab diesem Zeitpunkt gilt der dabei gesetzte Wert bis zu einer erneuten Änderung. In diesem Fall werden die Zeitwerte in Sekunden dargestellt. Aufgrund der 60-sekündigen Sprünge sind dies dabei dementsprechend Eingabewerte die im Minutentakt aktualisiert werden sollen. Die Größe der Zeitschritte ist frei wählbar und variabel. Soll beispielsweise die erste Stunde mit konstanten Parametern gerechnet werden, kann zum Zeitpunkt 0 ein Wert festgesetzt und danach die erste Aktualisierung in der zweiten Zeile bei 3600

eingetragen werden. Ab dann kann direkt in 60-Sekunden Schritten fortgesetzt werden. Da die Time-Spalte also lediglich einen Zeitstempel ab dem Startpunkt darstellt, ist nicht zwingend erforderlich, Daten aufzubereiten, von denen nur die Änderungen zu einem entsprechenden Zeitschritt bekannt sind. Eine sogenannte „Forward-Fill“-Methode um eine vollständige Tabelle für alle Eingabewerte zu erstellen, wie sie für manche Softwarepakete notwendig ist, kann somit hierbei unter Umständen entfallen. Wie zwischen diesen Werten interpoliert werden soll, wird im Drop-Down-Menü „Interpolation“ festgelegt.



Time	A	B	C
Type:	=	=	=
Interpolation:	Linear	Linear	Linear
3420	94.0581	124.579	107.662
3480	94.0581	124.579	107.662
3540	94.0581	124.579	107.662
3600	94.0581	124.579	107.662
3660	93.279	125.086	106.526
3720	93.4475	126.696	106.649
3780	92.9936	124.181	107.186
3840	97.2625	125.585	107.89
3900	98.6917	125.066	107.672
3960	98.1867	124.115	106.596
4020	98.9114	126.864	105.724
4080	99.1824	124.891	105.19
4140	98.3932	125.186	111.941
4200	97.1151	127.012	112.265
4260	98.1772	124.671	113.111
4320	100.677	126.467	112.828
4380	99.35	127.192	112.538
4440	96.2219	126.711	112.912
4500	95.2163	127.967	111.336
4560	95.555	126.618	111.225
4620	95.555	127.398	110.532
4680	95.7002	126.762	110.369
4740	95.707	124.868	109.675
4800	95.707	124.683	110.706

Abbildung 16: Time Series Table „burner_HEL“

In Abbildung 15 ist zu sehen, dass die Spalte B gewählt wurde, da der unter „forced“ ausgewählte Titel „burner_HEL.B“ lautet. Auf diese Art kann schnell zwischen einzelnen zu berechnenden Zeitabschnitten umgeschaltet werden, ohne für jeden Zeitslot eigene Tabellen für die jeweiligen Eingabewerte erstellen zu müssen. Dies ist jedoch ohne vorgeschaltete Datenaufbereitung nur möglich, wenn die Änderungen immer zum selben Zeitpunkt erfolgen. Ein manuelles Ausbessern innerhalb dieser Tabellen direkt in IPSEpro Dynamics ist zwar durchaus möglich, abhängig von dem Umfang der zur Verfügung stehenden Datensätze jedoch nicht immer zwingend ratsam.

4.2 Erstellung eines instationären Objekts

Der Unterschied zwischen einem stationären und einem instationären Objekt liegt rein im Quellcode, bzw. den Formeln die das Verhalten des Objektes beschreiben. Um dies zu verdeutlichen ist nachfolgend in Abbildung 17 eine Grafik der Einstellungen der Variable „m_int_water_hot“ angefügt. Die Basiseinstellungen aller Variablen sind ident aufgebaut. Daher kann die anschließend abgebildete Variable sowohl von statischen als auch von dynamischen Modellen verwendet werden.

Variable Attributes: ✕

Variable Name:	<input type="text" value="m_int_water_hot"/>	<input type="button" value="OK"/>
Default Estimate:	<input type="text" value="1"/>	<input type="button" value="Cancel"/>
Minimum:	<input type="text" value="-1e+20"/>	<input type="checkbox"/> Load minimum and maximum when created
Maximum:	<input type="text" value="1e+20"/>	
Units:	<input checked="" type="radio"/> local <input type="text" value="kg"/> <input type="radio"/> predefined <input type="text" value=""/>	
Update Source:	<input type="text" value="m_int_water_hot"/>	
<input checked="" type="checkbox"/> Variable can be set <input type="checkbox"/> Set on load defaults		
Description	<input type="text" value="Amount of water that has been heated up to it's boiling point"/>	
Comment	<input type="text"/>	

Abbildung 17: Einstellungen einer statischen Variable die dynamisch verwendet wird

Während für die Lösung des Fließbildes mit rein stationären Objekten bisweilen unerheblich ist, welcher Solver zum Einsatz kommt, so ist ab dem Zeitpunkt, an dem ein instationäres Objekt eingesetzt wird, der dynamische Solver zu verwenden. IPSEpro Dynamics weist den Anwender zwar darauf hin, falls ein stationäres Fließbild mit dem dynamischen Solver gelöst werden soll, jedoch kann dies quittiert und die Berechnung ausgeführt werden. Im umgekehrten Fall ist dies nicht möglich. Basierend darauf existiert somit die Möglichkeit, einzelne Komponenten wie etwa den Drehrohren durch dynamische Einheiten zu ersetzen. Als Beispiel sei hierbei die Modellierung eines simplen Flüssigkeitsspeichers genannt. Dieser besteht aus einem

Einlass in den Speicher, einem Speichertank und einem Auslass aus ebendiesem. Da sich der Füllstand in Abhängigkeit vom ein- und ausströmenden Volumenstrom verändern kann, sollte ein dynamischer Speicher eingesetzt werden. Ein- und Auslass können jedoch für sich als stationär betrachtet und auch so modelliert werden. Dieser Umstand erleichtert die Verwendung bereits erstellter statischer Fließbilder um damit bereits zuvor durchgeführte stationäre Berechnungen mit entsprechenden Submodellen dynamisch oder quasi-statisch auszuführen.

Die angesprochene dynamische Variable „m_int_water_hot“ ist, wie in Abbildung 18 zu sehen, als Standard-Variable geführt. Die Bezeichnung „Standard“ soll verdeutlichen, dass bei der Erstellung der Variablen zwischen zeitabhängigen und stationären Parametern nicht unterschieden wird.

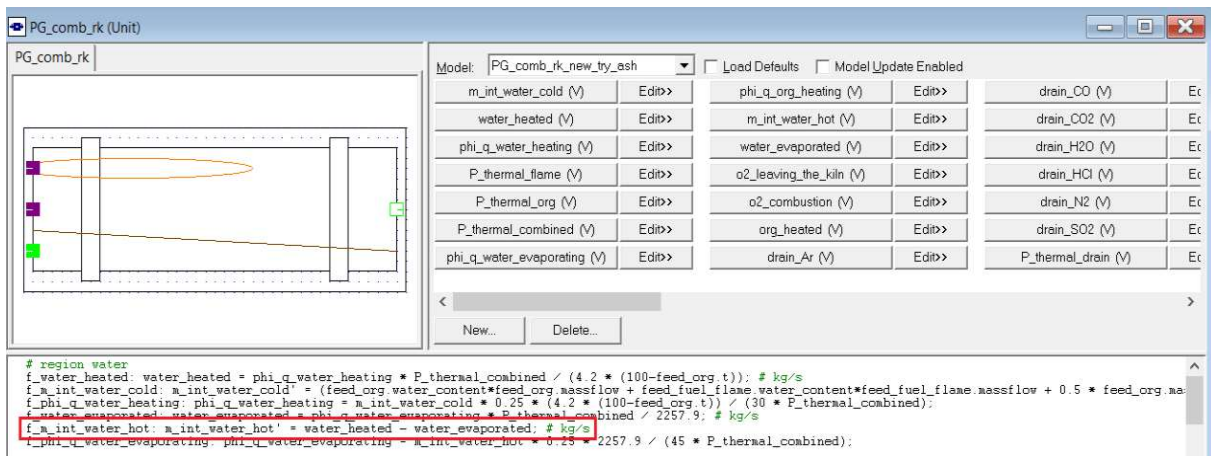


Abbildung 18: Beispiel eines dynamischen Modells

In Abbildung 18 ist zudem hervorgehoben, wie in der Gleichung im Quellcode eine zeitabhängige Variable zu benennen ist. Am bereits zuvor bemühten Beispiel „m_int_water_hot“ ist zu sehen, dass die zeitliche Abhängigkeit ganz klassisch mit einem Apostroph bezeichnet wird, also „m_int_water_hot““. In dieser Gleichung ist anzugeben, wie die Änderung zustande kommt. Bei dieser Variable durch die Differenz aus „water_heated“ und „water_evaporated“. Zeitabhängige Änderungen werden, wie im Kommentar hinter der Gleichung angemerkt, in Einheit pro Sekunde, in diesem Fall kg/s berechnet. Dies ist im Sinne einer Einheiten-Kontrolle zu berücksichtigen. Die Massenströme water_heated und water_evaporated liegen in diesem Fall deshalb auch in kg/s vor.

Sobald zumindest eine Variable zeitabhängig ist, zählt das Modell für das Programm als dynamisch, und das übergeordnete Fließbild, in dem diese Ausführung des Modells zum Einsatz kommt, kann nur noch mit dem dynamischen Solver gelöst werden. Daher empfiehlt sich, beim Umbau eines bereits vorhandenen statischen Modells eine Kopie davon zu erstellen und diese unter einem anderen Namen dynamisch umzubauen. Wird dies nicht durchgeführt, so wird dieses Modell in der Datenbank generell als dynamisch geführt, und alle Fließbilder, in denen dieses unter Zuhilfenahme dieser Datenbank eingesetzt wird, können nur noch dynamisch gelöst werden. Zwar können mit dem

dynamischen Solver auch statische Berechnungen durchgeführt werden, spezielle Anwendungen, wie der Einsatz des „Optimizer“, sind dadurch allerdings nicht mehr möglich.

4.3 Verweilzeit

Gerade am Beispiel des Drehrohrofens in der Sondermüllverbrennung ist intuitiv zu erwarten, dass verschiedene zugegebene Stoffe unterschiedlich lange im Inneren des Ofenrohres verbleiben. Somit muss, bei gewünschter differenzierter Betrachtung unterschiedlicher Komponenten, eine Summe verschiedener Verweilzeiten angesetzt werden. Soll eine Verweilzeit eines Stoffes implementiert werden, existieren mehrere Möglichkeiten. Zwei werden hier näher besprochen: Die Festlegung einer gewissen Abflussrate die in Abhängigkeit von der Stoffmenge eine schwankende Verweilzeit bedeutet, oder eine anteilige Umsetzungsmenge, berechnet aus der zur Verfügung stehenden Leistung und der Zeit die zum Beispiel bis zum Umsetzen von 50% des Stoffes vergehen soll. Dadurch können fixe Verweilzeiten festgelegt werden, zu deren Einhaltung andere Leistungsparameter angepasst werden. Anschließend wird dies anhand eines Beispiels näher beschrieben. Dabei wird die Verweilzeit von zugegebenem flüssigen Wasser in einem Drehrohrofen beschrieben.

Wird das Verhalten des Wassers betrachtet, so ist folgender Vorgang zu erwarten: Die Flüssigkeit erwärmt sich durch Energiezufuhr, ob nun über Strahlung, Konvektion oder beides, und verdampft, sobald der Siedepunkt erreicht ist. In dieser Simulation wird angenommen, dass dies innerhalb der Wassermenge homogen geschieht. Reale Effekte, wie beispielsweise das Benetzen heißer Oberflächen durch einen Teil des zugeführten Wassers mit direkter Verdampfung, werden nicht berücksichtigt. Die erste Möglichkeit Einfluss auf die Verweilzeit des Wassers zu nehmen ist, eine gewisse Energiemenge der durch die Verbrennung freigesetzten thermischen Energie in die Flüssigkeit einzubringen. Dies könnten z.B. 15% der thermischen Leistung sein. Abhängig von der Menge des Wassers und der Heizleistung ergeben sich auf diese Art unterschiedlich lange Verweilzeiten. Dies ist dem Verhalten in der Praxis zwar nicht unähnlich, jedoch ist nicht berücksichtigt, wie sich das Wasser im Ofen bewegt. Dieses kann sich sammeln, fein verteilen oder direkt verdampfen. Dies ist abhängig vom Zustand im Ofen im Allgemeinen. Da eine so fein aufgelöste Kenntnis der Zustände im Inneren eines Drehrohrofens in der Praxis nicht vorliegt, kann die festgelegte Energiemenge, auf verschiedene Betriebszeiträume angewandt, unterschiedlich gut passen.

Sollen nun aber Erfahrungswerte in Form von konkreten Zeiten als Verweilzeit für bestimmte Stoffe gesetzt werden können, so kann sich einer anderen Möglichkeit bedient werden: Abhängig von der aufgrund der Stoffmenge benötigten Energie wird ein Anteil an der freigesetzten Heizenergie festgelegt, der notwendig ist, um in zum Beispiel 20min 50% des Wassers zu verdampfen. Bei Vorliegen von siedendem Wasser müssten dies 2257kJ/kg sein. Bei einer fiktiven Wassermenge von 100kg müssten 50kg * 2257kJ/kg in 20*60s aufgebracht werden. Dies entspricht einer Leistung von rund 94kW. Würden nun 100kW thermische Leistung zur Verfügung stehen, wären allerdings 94% davon für die Wasserverdampfung gebunden. Dementsprechend müssen

die Verhältnisse bzw. die Verweilzeiten insofern berücksichtigt werden, als dass sie realistische Betriebszustände ermöglichen sollten.

Der zweite Ansatz hat den Vorteil, dass auch beim physischen Objekt zu erwarten ist, dass bei der Zugabe einer großen Menge Wasser zwischenzeitlich die Heizleistung, respektive die thermische Leistung, die der Ofen mit dem Rauchgas liefert, abnimmt.

4.4 Fehlersuche

Zu Beginn der Berechnung des Fließbildes mit dem dynamischen Solver prüft die Entwicklungsumgebung das Gleichungssystem im Hintergrund. Dabei werden Über- und Unbestimmtheit kontrolliert und, falls notwendig eine Fehlermeldung ausgegeben. Das Protokoll ist hierbei ident mit dem bei der Berechnung statischer Fließbilder. Genauso werden Warnmeldungen ausgegeben, sofern sie im betreffenden Quellcode der Submodelle vorhanden sind. Wird versucht, die bereits bis zu diesem Zeitpunkt berechneten Zwischen- oder Teilergebnisse auszulesen, so wird statt einem Graphen eine unbrauchbare Zahlenfolge angezeigt. An dieser Stelle muss mit den ausgegebenen Fehlermeldungen vorlieb genommen werden.

Bei der dynamischen Berechnung startet der Integrationsprozess nach Abschluss dieser Prüfung. Ist der Fortschritt aber bei einem Zeitpunkt angekommen, der nicht iterativ gelöst werden kann, so wird nur eine Fehlermeldung ausgegeben, jedoch ohne weitere Informationen. Für eine möglichst effiziente Fehlersuche kann die Notwendigkeit bestehen, die genaue Ursache zu finden, wegen derer eine Lösung dieses Zeitschrittes nicht möglich war. Im Gegensatz zur Fehlersuche bei der statischen Berechnung, existiert bei der integrierenden Berechnung die Möglichkeit, sich die Graphen der verschiedenen Parameter bis zum Zeitpunkt des Abbruchs anzusehen. Somit kann sehr genau nachverfolgt werden, welcher Parameter sich einem Zustand annähert, der nicht mehr zu lösen ist. Ein Beispiel dafür sind Temperaturkurven, die sich im Falle des Drehrohrofens nicht ins negative kehren sollten. Auch können Probleme auftreten, wenn gewisse Werte 0 erreichen. Je nach Gleichungssystem kann dies dazu führen, dass die Berechnungen divergieren. Infolge dessen wird der Solver beim Erreichen der maximalen Anzahl an Iterationsschritten einen Fehler anzeigen und die Berechnung abbrechen.

Sollte dies nicht direkt an den Graphen ersichtlich sein, oder aber aufgrund der großen Anzahl an Variablen ein schlichtes manuelles Überprüfen der Graphen nicht sinnvoll erscheinen, so empfiehlt sich, zur näheren Eingrenzung des Fehlers eine Parametervariation durchzuführen. Ist auch dies nicht zielführend, besteht eine weitere Möglichkeit darin, sich die den Modellen zugrunde liegenden Gleichungen genauer anzusehen um zu prüfen, ob diese nur innerhalb gewisser Grenzen eingesetzt werden können. Sollte, um ein Beispiel zu nennen, die Temperatur innerhalb des Drehrohrofens 100°C unterschreiten, so ist festzustellen, ob zu diesem Zeitpunkt immer noch Wasser verdampft.

Als weitere Fehlerquelle sind sprunghafte Änderungen der Input-Parameter zu bedenken, da diese bei zu großen Werten dazu führen können, dass mit den gewählten Solver-Einstellungen ein Konvergieren der Lösung mit dem gewünschten Fehlergrad

nicht möglich ist. Zu große Sprünge können dann beispielsweise durch feinere zeitliche Auflösung abgeschwächt und auf diese Art lösbar werden. Gerade bei der Verwendung von originalen Messdaten muss auch damit gerechnet werden, dass Messfehler oder Messungenauigkeiten, die vom Modell gezwungenermaßen nicht hinterfragt werden können, bei der Berechnung einzelner Schritte auf Zustände schließen lassen, die sich in der Praxis nie ergeben. Somit kann der Solver auch an Berechnungen scheitern, die so an sich gar nicht lösbar sind.

5 Architektur des digitalen Modells

Wie in Abschnitt 3.2 erwähnt, lassen sich die einzelnen Bestandteile eines digitalen Zwillinges anhand eines 5-D-Modells darstellen. Bei dem in dieser Arbeit besprochenen und im Folgenden näher erläuterten digitalen Zwilling sieht eine Aufspaltung in diese 5 Dimensionen wie folgt aus:

- 1. Die reale bzw. physische Anlage: Die Sondermüllverbrennungsanlage der Wien Energie in der Simmeringer Haide. In der physischen Anlage werden durch das Leitsystem Messdaten aufgezeichnet, welche im Datenmanagement weiterverarbeitet werden.
- 2. Das Simulationsmodell: Ein teilweise dynamisches, auf Gleichungen basierendes Fließbild innerhalb einer Entwicklungsumgebung ausgeführt auf einem Rechner der TU Wien. Die Berechnungen wurden mithilfe eines digitalen Modells innerhalb der Softwareumgebung IPSEpro Dynamics durchgeführt, welches nachfolgend im Detail beschrieben wird.
- 3. Die Anwendungen: Konkret sollen im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Forschungsfragen beantwortet werden. Zunächst soll durch das Simulationsmodell eine beispielhafte Brennstoffzusammensetzung berechnet werden, um die Möglichkeit des Erstellens einer Brennstoffdatenbank zu prüfen. Aufbauend auf einer solchen Datenbank können in Zukunft Optimierungen des Betriebs vorgenommen werden.
- 4. Das Datenmanagement: Im Datenmanagement werden die Messdaten aus dem Leitsystem der physischen Anlage zusammen mit zusätzlichen periodischen Analysedaten vorverarbeitet, gefiltert und als konsistente Datensätze gespeichert.
- 5. Die Datenkommunikation: Bei einem digitalen Zwilling existiert in der Regel eine direkte Anbindung des Modells an die Datenbank und der Datenbank an zum Beispiel die Leit- bzw. Messtechnik der realen Anlage. Das ist bei dem in dieser Arbeit erstellten digitalen Zwilling nicht der Fall. Der Datenaustausch wurde im vorliegenden Fall offline durchgeführt. Dadurch kann die vorliegende virtuelle Repräsentation als digitales Modell nach der Einteilung in Kapitel 3.3 bezeichnet werden.

Diese 5 Dimensionen werden in Abb. 19 dargestellt und in den folgenden Kapiteln detailliert beschrieben.

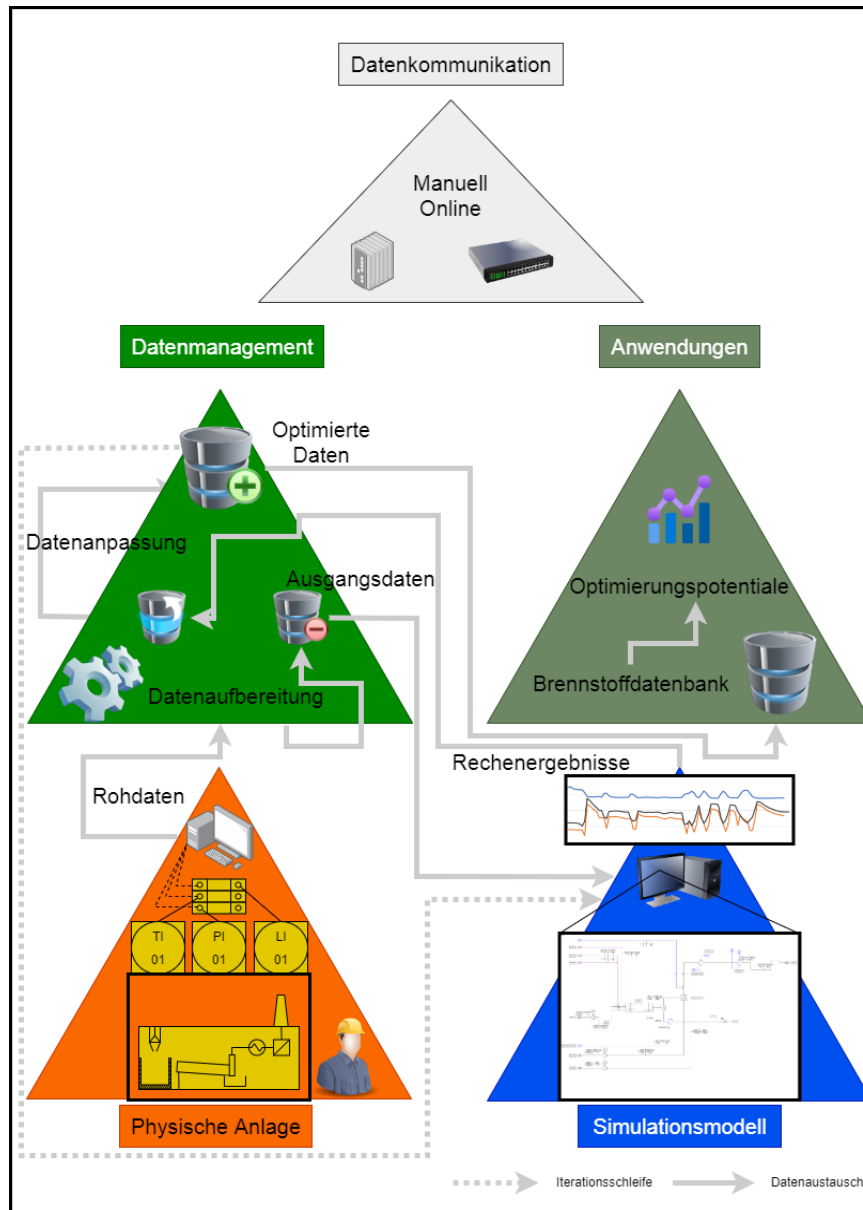


Abbildung 19: 5-D-Modell des digitalen Zwillings

5.1 Die physische Anlage

Die Sondermüllverbrennungsanlage Wien Simmeringer Haide ist in Kapitel 2.3 im Detail beschrieben. Die historischen Messdaten, die von dieser Anlage vorliegen, werden im Leitsystem vor Ort zusammengeführt und auf lokalen Rechnern der Wien Energie mittels Datalake chronologisch gespeichert.

5.2 Das Simulationsmodell

Zuerst werden die einzelnen verwendeten Submodelle des Simulationsmodells näher erläutert, danach das Gesamtmodell und schließlich die Modelltestung und die Parametrierung.

5.2.1 Submodelle

- **Drehrohrofen (dynamisch)**

Im realen Betrieb eines Drehrohrofens in der Sondermüllverbrennung können die Massenströme der einzelnen Aufgabeschielen sehr stark variieren und sich auch der Heizwert der einzelnen Fraktionen sehr stark verändern. Deshalb war beim Erstellen des dynamischen Modells des Drehrohrofens ein Hauptziel, das instationäre Verhalten der physischen Anlage möglichst akkurat abbilden zu können. Als Beispiel für die unterschiedlichen Brennstoffeigenschaften bei vermeintlich ähnlichen Materialien sei hier die direkte Fass-Aufgabe genannt. Bei Fässern kann der Heizwert zwischen dem von einem Stahlfass voll reinem Wasser und einem Stahlfass gefüllt mit leicht brennbarem Kunststoff schwanken.

Um das Modell möglichst schlicht zu halten, wurden die Brennstoffe im Ofen in zwei Fraktionen aufgetrennt, die unterschiedliche Verweilzeiten aufweisen. Dabei ist einerseits das Wasser, und andererseits die organische Masse gemeint, also all jene Stoffe, die verbrannt werden sollen. Dies inkludiert die zugegebenen Brennstoffe mit Ausnahme des Brennstoffes für den Stirnwandbrenner. Die auftretenden inerten Massenströme werden durch Asche dargestellt und direkt durch den Drehrohrofen durchgeschleust, da sie für die betrachteten Zeiträume thermodynamisch wenig Relevanz für das dynamische Verhalten des Drehrohrofens haben. Das flüssige Wasser wurde aufgeteilt in einen kalten Teil mit einer Temperatur unterhalb des Siedepunktes, der erst noch erwärmt werden muss, und einen heißen Teil, der seinen Siedepunkt bereits erreicht hat und somit in kochendem Zustand vorliegt. Dafür wurden zwei verschiedene Prozentwerte eingesetzt, die jeweils einen Teil der thermischen Leistung der Verbrennung im Drehrohr für die Erwärmung des Wassers, und auch für die Verdampfung der kochenden Phase berücksichtigen. Wie in einem vorigen Abschnitt beschrieben, sind diese Prozentsätze variabel, um festgelegte Verweilzeiten einzuhalten. Im Rahmen der Validierung wurden diese Werte wie folgt festgelegt: Innerhalb von 30s werden 25% des kalten Wassers auf Siedetemperatur erhitzt und in 45s 25% des kochenden Wassers verdampft. Ähnlich wurde für die organische Phase vorgegangen. Hierzu existiert ebenfalls ein Prozentsatz der thermischen Gesamtleistung, der für das Aufheizen des Materials auf 600°C verwendet wird. Die Annahmen für die Verweilzeit liegen hier bei einem Aufheizen von 95% der organischen Phase innerhalb von 420s. Sobald das Material die Solltemperatur erreicht hat, erfolgt die Umsetzung, und der Massenstrom wird von dem übrigen kalten organischen Material abgezogen.

Während die Zusammensetzung des Wassers in der flüssigen Phase konstant als

reines Wasser angesehen wird, stellt sich die Situation im Hinblick auf das organische Material anders dar. Dazu wurde dem Modell des Drehrohrofens eine Zusammensetzung als globale Variable hinzugefügt. Diese stellt die Zusammensetzung der organischen Phase im Inneren des Ofenrohres dar, und wird zu jedem Zeitschritt insofern angepasst, als dass die einzelnen Anteile von Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff etc. neu berechnet werden. Dies geschieht in Abhängigkeit davon, wieviel des jeweiligen Elements einerseits mit dem umgesetzten, weil erwärmten, organischen Material die Phase verlassen hat, und andererseits über das neu hinzugefügte Material ersetzt wurde. Dabei wird eine perfekte Durchmischung angenommen. Diese Annahme ist bei anderen betrachteten Betriebszeiträumen neu zu bewerten, da sie in diesem Fall vor allem dazu dient, potenziell im Drehrohr verbliebene Rückstände vorangegangener Betriebszustände abzudecken.

Für die Verbrennung, und somit die thermische Leistung, wurden folgende Annahmen getroffen: Jedes vorliegende Cl-Molekül setzt zu HCl um. Selbes gilt für Schwefel und Wasserstoff, die jeweils zu SO₂ und H₂O umsetzen. Im Drehrohrofen setzt der Kohlenstoff primär zu Kohlenstoffdioxid um, jedoch mit einem festgelegten CO-Slip, der eine gewisse unvollständige Verbrennung abbildet. Diese wird mit der Nachbrennkammer ausgeglichen. Die Wärmeverluste des Drehrohres wurden als fester Anteil an der thermischen Gesamtleistung angenommen. Der Ofen selbst ist masselos, verfügt also über keinen Stahlmantel, der als thermischer Speicher fungiert. Der Rest der erzeugten Wärme verlässt den Drehrohrofen mit dem Abgas, dessen Zusammensetzung in Abhängigkeit von der Beschaffenheit des aktuell umsetzenden Brennstoffes errechnet wird.

- **Staubabscheider und Nassentschlacker (stationär)**

Die Kombination aus adiabatem Zyklon mit 100% Abscheidegrad als Staubabscheider und Wärmetauscher als Dampferzeuger ermöglicht es, einen Nassentschlacker möglichst realitätsgetreu abzubilden.

- **Nachbrennkammer (stationär)**

Die Nachbrennkammer wurde als adiabate Brennkammer mit konstanten Druckverlusten und mit einer optimalen Verbrennung, was einen CO-Slip von 0 bedeutet, modelliert. Damit bleibt, im Gegensatz zur Realität, kein Kohlenmonoxid mehr am gaseitigen Ausgang übrig.

- **Dampferzeuger (stationär)**

Der Dampferzeuger wurde durch ein stationäres Modell abgebildet, da dieser ein Naturumlauf-Dampferzeuger ist, der im Vergleich zum Drehrohrofen sehr schnell auf Laständerungen reagiert. Für diesen wurden feste Druckverluste für Abgas und Wasser eingestellt, sowie ein fester Wärmeübertragungs-Koeffizient k_A von 25kW/K. Festgelegt wurden auch die Wassertemperaturen am Eingang und der Zustand des Frischdampfes am wasserseitigen Ausgang.

- **Economiser (stationär)**

Beim Economiser wurden aufgrund verfügbarer Messwerte sowohl der Wasser-Massenstrom als auch dessen Temperatur am Eingang zeitabhängig fixiert. Auch hier wurde ein konstanter Wärmeübertragungs-Koeffizient k_A angenommen, allerdings in der Höhe von 2kW/K . Die Speisewassermenge wurde mit der erzeugten Masse an Frischdampf gleichgesetzt.

Der Dampferzeuger und der Economiser wurden, im Gegensatz zum Original, im Simulationsmodell als zwei hintereinander geschaltete Anlagen betrachtet. Dadurch konnten bereits existierende Modelle verwendet werden, ohne Neuanfertigung der komplexen Verschaltungen innerhalb des realen Dampfkessels. Für die Informationen, die für die Auswertung in dieser Arbeit benötigt werden, ist dieser Umstand vernachlässigbar.

5.2.2 Gesamtmodell

Zu Beginn sei hier erwähnt, dass die, bereits in Abschnitt 3.6 angesprochenen, Sicherheitsaspekte im Rahmen dieser Arbeit nicht näher behandelt wurden.

Als Ausgangspunkt für das dynamische Modell des Drehrohrofens wurde ein von der TU Wien bereitgestelltes statisches Fließbild der zu untersuchenden Anlage verwendet. In diesem waren sämtliche zur Verfügung stehenden Aufgabeschienen einerseits direkt in den Ofen, andererseits in die vorgeschalteten Mischer eingearbeitet und der Eintrag der Primär-, Sekundär- und Tertiärluft sowie des über die Lanzen eingebrachten Zerstäuberdampfes inkludiert. Zusätzlich ist eine Erwärmung der Primärluft wie im realen physischen System vorgesehen.

Da nicht für alle potentiellen Eingabemöglichkeiten nutzbare Daten zur Verfügung standen, wurde das Fließbild verschlankt. Dabei wurden beispielsweise zusätzliche Aufgabeschienen entfernt sowie Zusätze, wie etwa die Zerstäuberdämpfe, vernachlässigt. Aufgrund der geringen Massenströme dieser zusätzlichen Optionen im betrachteten Versuchszeitraum ist dies zulässig. Da der Fokus auf der thermodynamischen Modellierung lag und keine durchgehenden Messwerte vorlagen, wurden einzelne Teile des physischen Gesamtmodells, wie etwa die Gaswäsche oder der elektrische Staubabscheider, aus dem Modell entfernt, um Fehlerquellen ohne große thermische Relevanz auszusortieren. Zusätzlich wurde dadurch die Übersichtlichkeit verbessert und die Fehlersuche vereinfacht.

Die reduzierte Version des Fließbildes, die auch für die Berechnungen der später angeführten Ergebnisse verwendet wurde, ist in Abbildung 20 dargestellt. Dies beinhaltet die Aufgabe von Primär-, Sekundär- und Tertiärluft, sowie von Wasser und diversen Brennstoffen. Die Aufgabe von organischem Material und dem Brennstoff für den Stirnwandbrenner erfolgen getrennt, wobei die sich in Betrieb befindlichen Lanzen für organische Lösungsmittel aufsummiert werden, da sie im betrachteten Zeitraum dieselben Stoffströme verarbeiten. Im Modell werden alle Brennstoffe mit Ausnahme des Stirnwandbrenners vor Eintritt in den Drehrohrofen vermischt. Die Abscheidung von Asche erfolgt mittels eines Zyklons. Über einen Wärmetauscher, der als

Verdampfer fungiert, wird die Nassentschlackung abgebildet. Nach der Nachbrennkammer durchläuft das Abgas noch den Dampferzeuger sowie den Economiser bevor dieses das Fließbild verlässt. Die Verarbeitung von Abwasser erfolgt über eine Zugabe im Anschluss an die Nachbrennkammer.

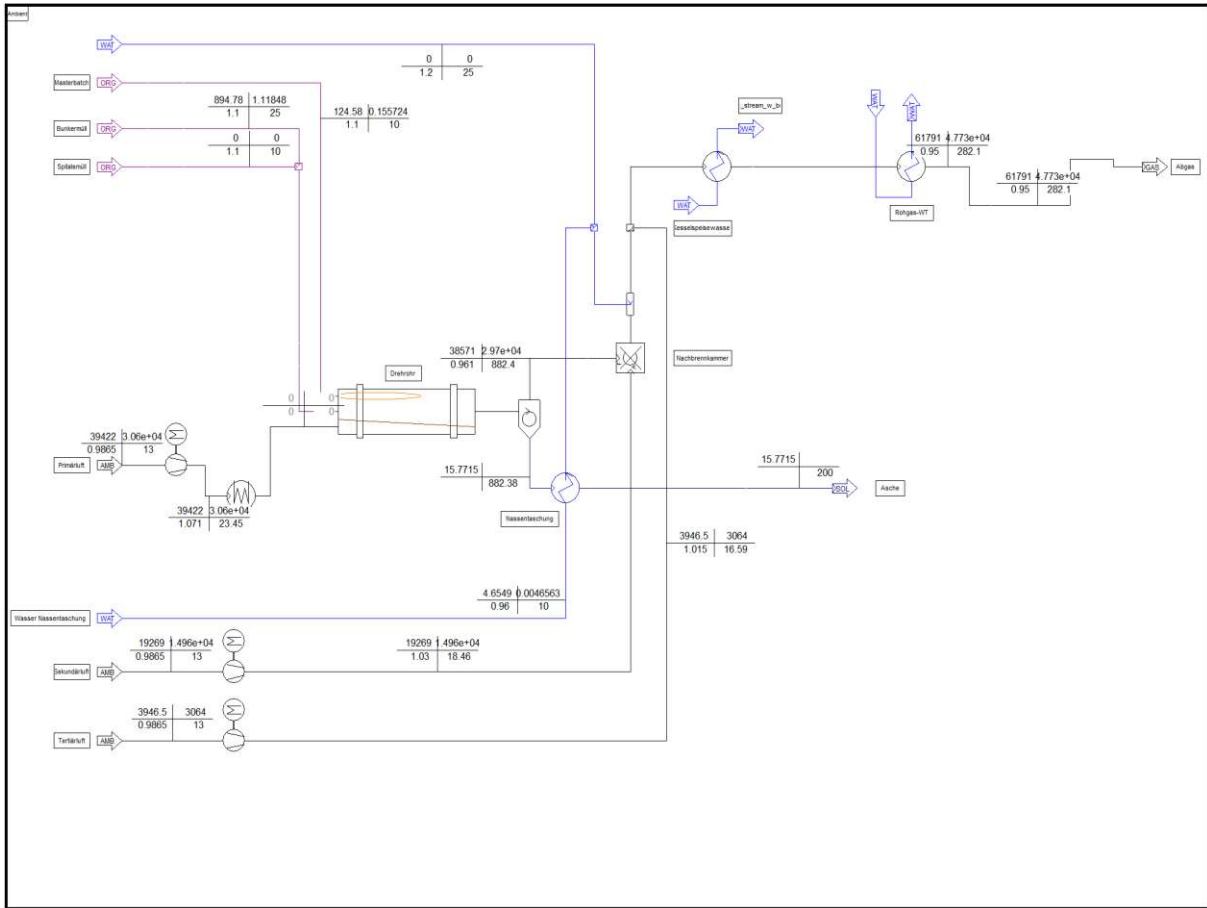


Abbildung 20: Fließbild des vereinfachten Gesamtmodells der physischen Anlage

5.2.3 Modelltestung

Nach der Erstellung der Submodelle wurden stichprobenartig Tests der einzelnen Subkomponenten durchgeführt, um zu prüfen, ob sich das erwartete grundlegende Verhalten in den Ergebnissen widerspiegelt. Da die Gleichungen, die dem Drehrohrfurn hinterlegt sind, größtenteils neue Gleichungen im Vergleich zu dem zur Verfügung gestellten Modell sind, wurden zur Sicherheit auch sehr simple Zusammenhänge geprüft. Der Drehrohrfurn musste beweisen, dass sich bei einem kurzzeitigen sprunghaften Anstieg der Zugabe von Heizöl extra leicht in den Ergebnissen eine O_2 -Senke, eine CO_2 -Spitze und eine Temperaturspitze einstellt. Als sich auch bei einer erhöhten Wasserzugabe eine Temperatursenke und eine sprunghafte Zunahme der H_2O -Konzentration im Rauchgas abzeichnete, wurde das Modell für geeignet

empfunden und mit der Parametrierung und somit dem Einstellen der Modellparameter fortgefahren.

Um den Einfluss von Einschwingvorgängen auf die Rechenergebnisse zu minimieren, wurden jeweils die Eingabe-Parameter der ersten Minute für eine Stunde lang wiederholt berechnet. Aus dem in Abb. 21 dargestellten Beispiel wird ersichtlich, dass die Notwendigkeit besteht, solche Einschwingvorgänge zu berücksichtigen. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass hier noch ein Sicherheitspolster in der Vorlaufzeit eingefügt ist.

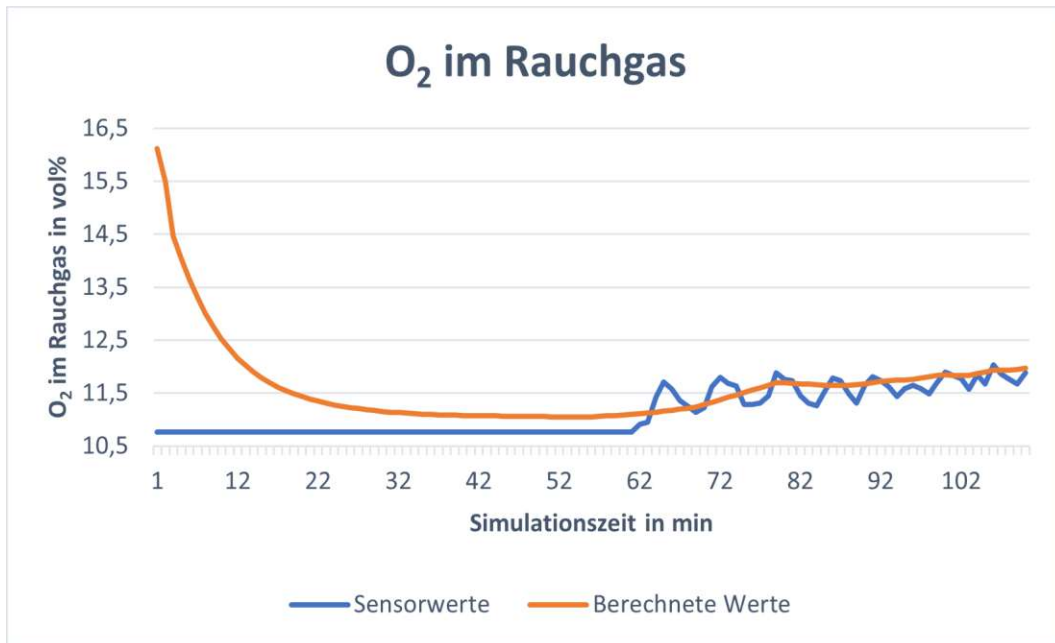


Abbildung 21: Abbildung eines Einschwingvorganges am Beispiel des O₂-Gehalts im Rauchgas

Der Bereich des Einschwingens wird in zukünftigen Darstellungen von Rechenergebnissen der Übersicht wegen weggelassen.

5.2.4 Parametrierung

Bei der Parametrierung wurde durch das Anpassen einzelner Parameter, wie etwa den Wärmeübertragungskapazitäten des Dampferzeugers und des Economisers, oder dem Wärmeverlust des Drehrohrofens, versucht, den Fehler gemittelt über alle drei Betriebszeiträume mit reinem Heizöl extraleicht (HEL) zu minimieren. Der Grund dafür liegt in den zum Teil sehr unterschiedlichen bis widersprüchlichen Messwerten wie die folgenden Abbildungen 22, 23 und 24 anhand der Beispiele des Wasseranteils im Rauchgas und der im Dampferzeuger produzierten Frischdampfmenge (Abb. 25, 26, 27) zeigen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass gewisse Vorgänge innerhalb des Drehrohrofens sehr lange andauern, und dementsprechend auch ähnliche Betriebszustände signifikant von vorhergegangenen unterschiedlichen

Betriebszuständen beeinflusst werden können. Trotz ähnlicher Einstellungen im Warmhaltebetrieb mit Heizöl extraleicht stellen sich in den 3 Betriebszeiträumen sehr unterschiedliche Wassergehalte im Bereich von 4-9 vol% ein.

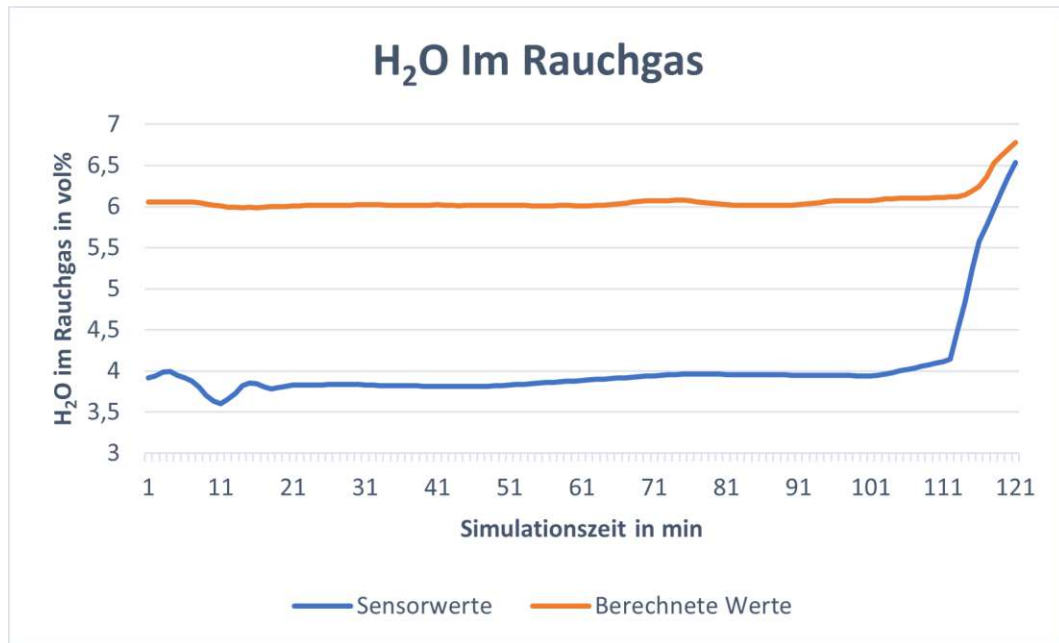
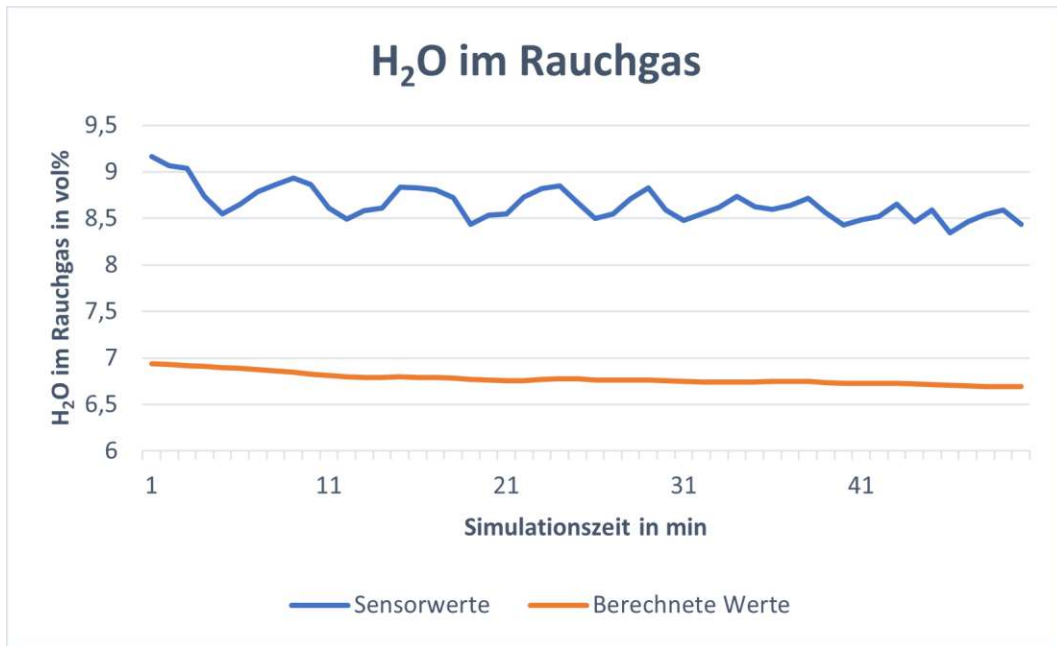
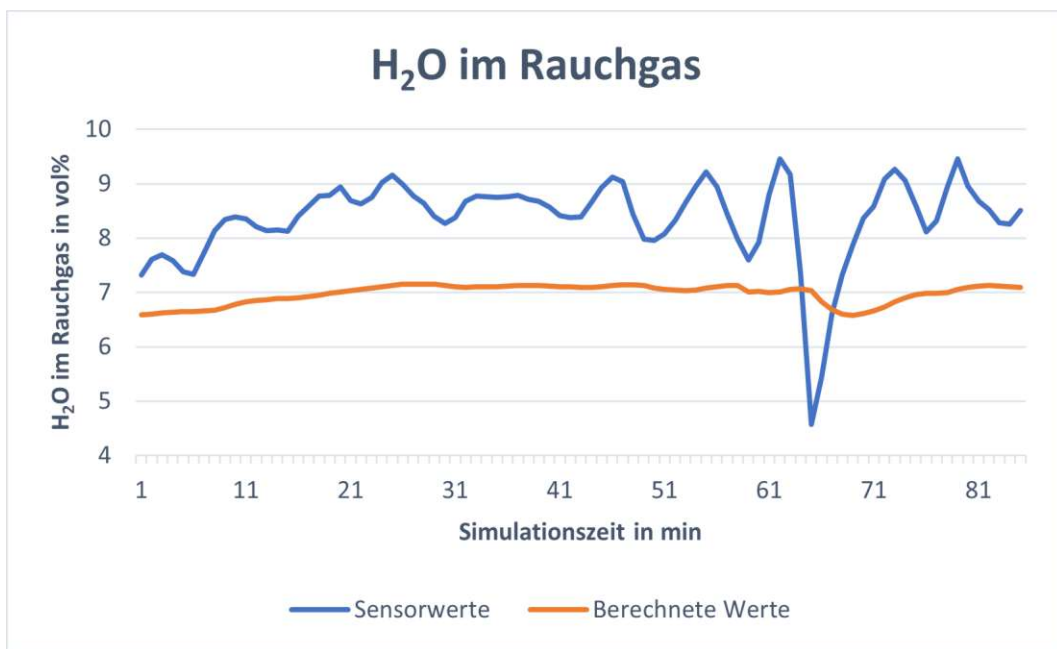


Abbildung 22: H₂O-Anteil im Rauchgas HEL-Durchlauf 1

Wie in Abbildung 22 ersichtlich, kann das Modell mit den gegebenen Eingabewerten ein ähnliches Verhalten hinsichtlich Kontinuität und Gleichmäßigkeit reproduzieren. Dabei sei an dieser Stelle explizit das Verhalten, und nicht das zum Teil 50-prozentige Abweichen der beiden Werte gemeint. Das in den Abbildungen 23 und 24 real gemessene Verhalten lässt sich hingegen mit den zur Verfügung stehenden Datensätzen nicht erklären. Da sich diese im Prinzip nicht von jenen im HEL-Durchlauf 1 unterscheiden, ist auch zu erwarten, dass sich dieses Muster in der aus den berechneten Werten erstellten Kurve nicht direkt erkennen lässt, wenngleich immer wieder eine sehr geringe Schwankung in einem zeitlich ähnlichen Bereich und in gleicher Richtung erkennbar ist. Dadurch sollte jedenfalls auch eine gewisse Unsicherheit der Messwerte hinsichtlich Wassergehalt in Betracht gezogen und eine Kalibrierung des Messinstrumentes angedacht werden.

Abbildung 23: H₂O-Anteil im Rauchgas HEL-Durchlauf 2Abbildung 24: H₂O-Anteil im Rauchgas HEL-Durchlauf 3

Das bereits angesprochene Phänomen der deutlich gedämpften Reaktion des physikalischen Modells in Bezug auf den Wassergehalt im Rauchgas lässt sich in Abbildung 24 sehr deutlich am kurzzeitigen Absturz der Konzentration im Abgas bei den realen Sensorwerten und der geringen Senke in den Ergebnissen aus dem Modell

beobachten.

Während der Anteil an Wasser im Rauchgas in Abbildung 22 deutlich unterhalb des berechneten Wertes liegt, so ist dieser bei den Abbildungen 23 und 24 deutlich darüber. Ein ähnliches, gegenteiliges Verhalten ist in den Abbildungen 25, 26 und 27 im Hinblick auf die erzeugte Frischdampfmenge zu beobachten. Während bei Abbildung 25 die Menge an produziertem Frischdampf sogar ein wenig unterhalb der aufgezeichneten Sensorwerte liegt, so ist die Dampfmenge bei den Abbildungen 26 und 27 in etwa um den Faktor drei zu hoch. Wie in Tabelle 4 zu sehen ist, liegt dieser Umstand nicht in einer fehlerhaften Gastemperatur die vor dem Dampferzeuger gemessen wird. Dieser Fehler wäre naheliegend, jedoch lassen sich mit den dabei festgestellten Abweichungen nicht Fehler dieser Größenordnung erklären. Weitere Erklärungsansätze für derlei Verhalten sind bei den Ergebnissen im weiteren Verlauf dieser Arbeit genauer dargelegt.

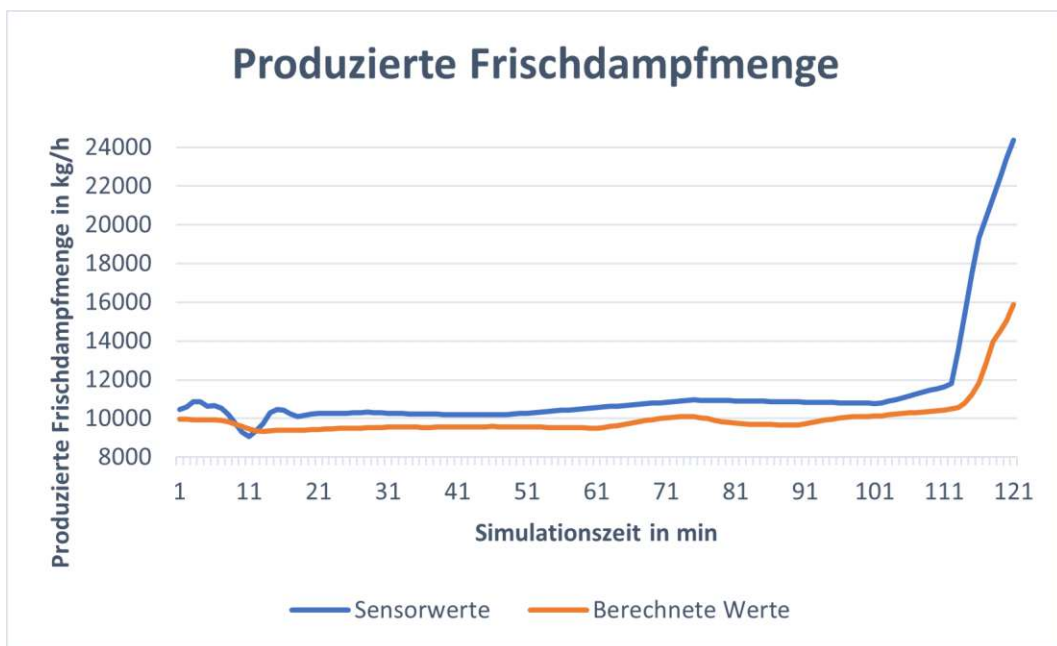


Abbildung 25: Produzierte Frischdampfmenge HEL-Durchlauf 1

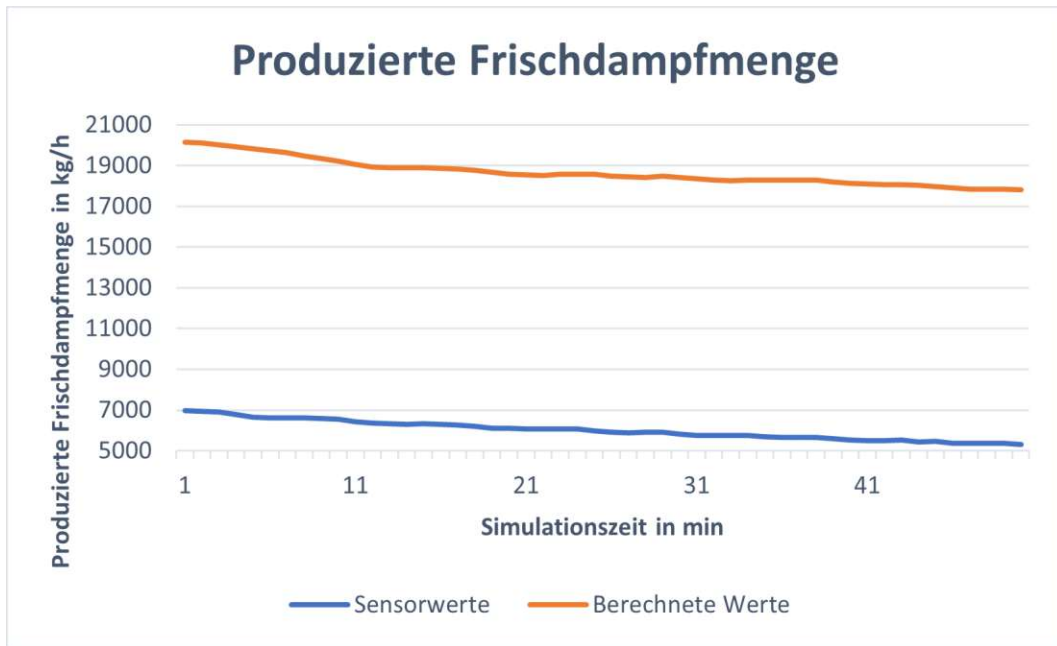


Abbildung 26: Produzierte Frischdampfmenge HEL-Durchlauf 2

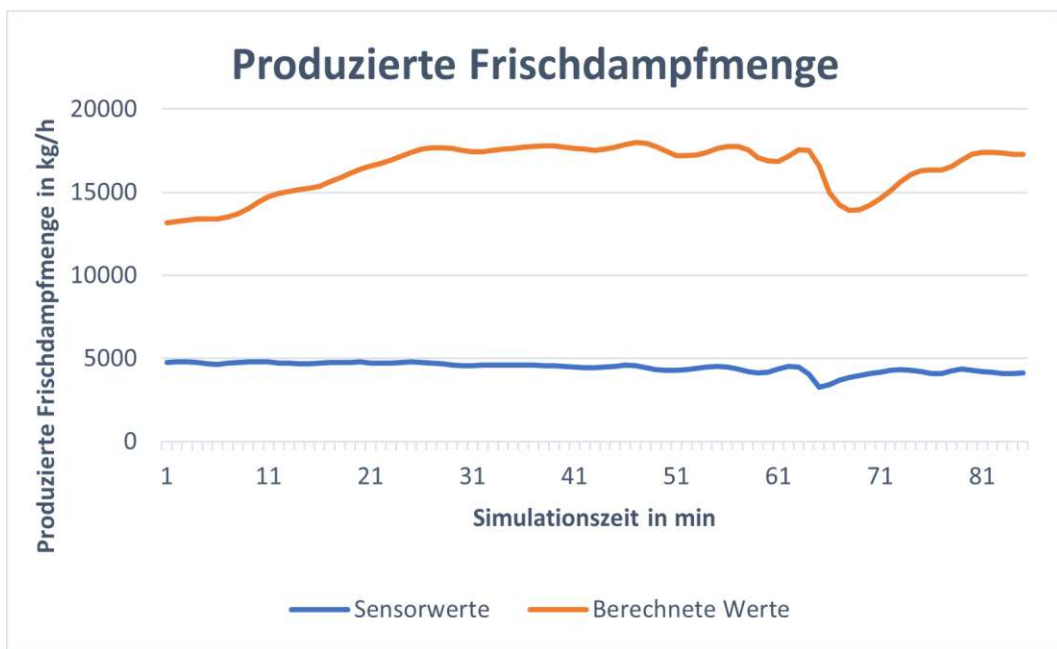


Abbildung 27: Produzierte Frischdampfmenge HEL-Durchlauf 3

Da aufgrund unterschiedlicher eingesetzter Messprinzipien und physikalischer Phänomene, wie das fallweise Unterbleiben perfekter Durchmischungen etwa im Abgasstrom, nicht alle eingesetzten Sensoren als gleich vertrauenswürdig erachtet wurden, wurde ihr Einfluss auf die Bewertung der eingesetzten Parametervariation

unterschiedlich gewichtet. Dies ist in der anschließenden Tabelle 4 in der Spalte „Gewichtung“ aufgeführt. Dieser Wert bewegt sich in einem geschlossenen Intervall zwischen 0 und 10, wobei 10 die höchste Gewichtung darstellt.

Tabelle 4: Auflistung der einzelnen Fehler bei der Parametrierung des Modells und Gewichtung der einzelnen Vergleichsparameter

Sensor	Fehler HEL1	Fehler HEL2	Fehler HEL3	Fehler Mittelwert	Gewichtung
O ₂ im Rauchgas	0,052876	0,015753	0,063927	0,044	10
CO ₂ im Rauchgas	0,082886	0,048008	0,130476	0,087	10
H ₂ O im Rauchgas	0,337783	0,277354	0,212357	0,276	10
Frischdampf Menge	0,117028	0,677985	0,725764	0,507	8
Temperatur Rauchgas nach Economiser	0,040591	0,336654	0,375398	0,251	7
Temperatur Rauchgas vor Dampferzeuger	0,048409	0,16277	0,079182	0,097	7
Temperatur Speisewasser nach Economiser	0,045562	0,093095	0,057945	0,066	1
Fehler Mittel Gewichtet Zeitslot	0,119627	0,234417	0,247429	-	-
Fehler Mittel Gesamt	-	-	-	-	0,200

Bei 15 durchgeführten Neubewertungen einzelner Parametervariationen liegt das gefundene Optimum, gemittelt über die drei betrachteten Warmhaltebetriebe, bei einem Fehler von exakt 20 %. Im Wissen auf das zum Teil stark unterschiedliche Verhalten der einzelnen Betriebszeiträume wurde dieser Fehler akzeptiert. Die Abbildungen 28, 29 und 30 sollen anhand des Beispiels des Sauerstoffanteils im Rauchgas zeigen, dass sich einzelne Sensoren in ihrem Verhalten auch durchaus über die einzelnen Versuchszeiträume gesehen ähneln.

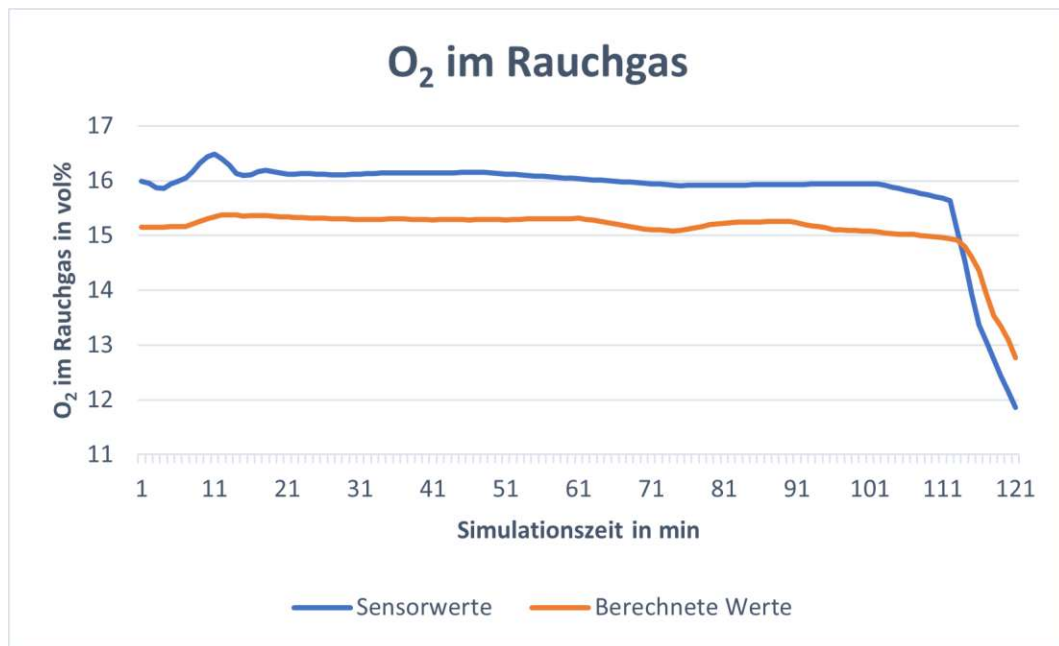


Abbildung 28: Sauerstoffanteil im Rauchgas HEL-Durchlauf 1

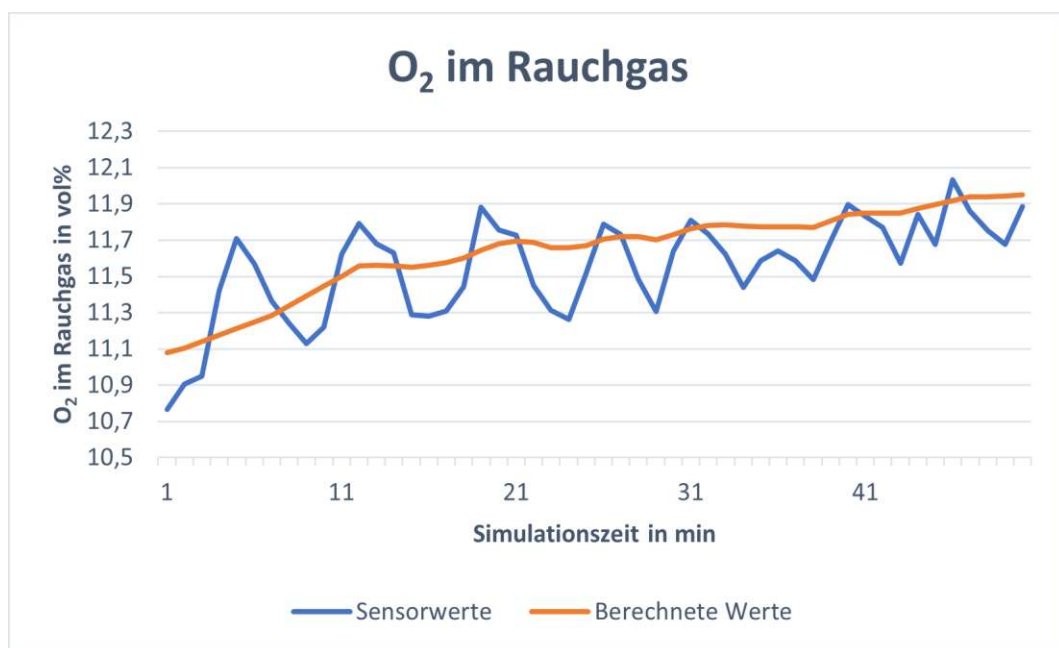


Abbildung 29: Sauerstoffanteil im Rauchgas HEL-Durchlauf 2

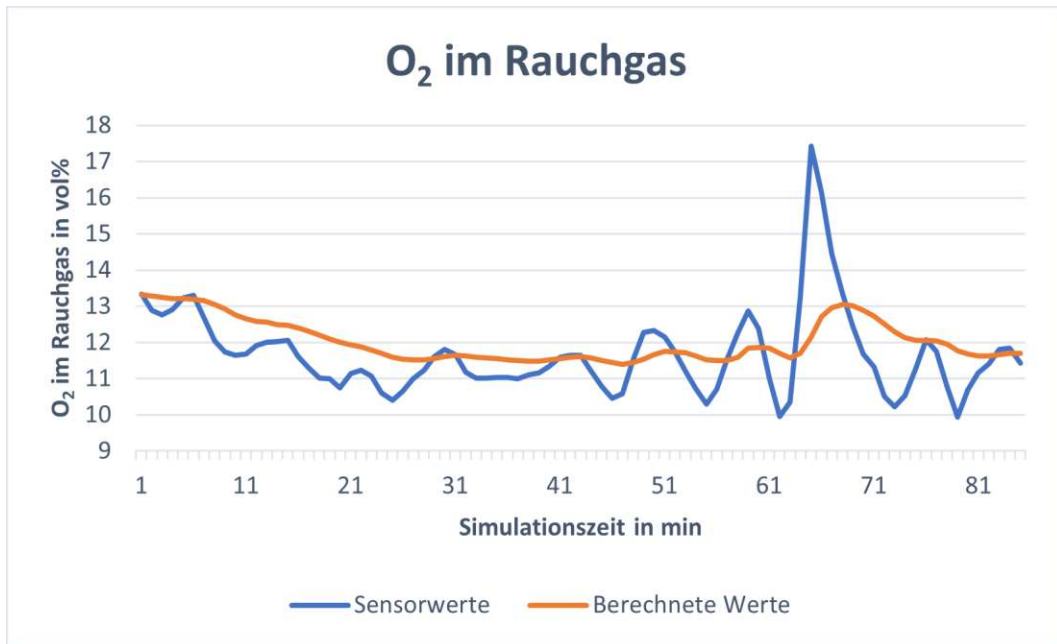


Abbildung 30: Sauerstoffanteil im Rauchgas HEL-Durchlauf 3

Im Anschluss wird beschrieben, wie das zuvor parametrisierte Modell in der Praxis in verschiedenen Bereichen der Abfallbehandlung zum Einsatz kommen kann.

5.3 Die Anwendungen

In der nachfolgenden Auflistung sind die unterschiedlichen Integrationslevel von digitalen Zwillingen und deren möglicher Einsatz in verschiedenen Bereichen der Abfallbehandlung genannt [20, vgl.S.19]

- **Digitales Modell**

Das digitale Modell kann zum Erstellen einer Brennstoffdatenbank genutzt werden, ist jedoch für den direkten Betrieb oder die Wartung von untergeordneter Bedeutung.

- **Digitaler Schatten**

- **Abfallmanagement:** Im Abfallmanagement kann ein digitaler Schatten eingesetzt werden, um die Reihenfolge der zu verarbeitenden Fässer festzulegen und um Temperaturspitzen innerhalb des Drehrohrofens im Betrieb zu glätten. Dies kann beispielsweise als lokale Anwendung für das Betriebspersonal, das für die Bereitstellung der Fässer verantwortlich ist, erfolgen. Darüber hinaus kann die Planung der Verarbeitung der einzelnen Müllsorten und damit die Koordinierung mit den Lieferanten optimiert werden. Hierfür würde sich eine webbasierte Anwendung für das Planungspersonal eignen.

- Betriebsführung: Allgemein lässt sich mithilfe des digitalen Schattens die Betriebsführung des Drehrohrofens optimieren bzw. stabilisieren. Dies kann durch verringerte Temperatur- und Emissionsspitzen erfolgen, indem dem Anlagenfahrer Hinweise gegeben werden, mit welchem Material dieser die Anlage aktuell beschicken könnte, um den Betrieb zu optimieren. Auch ist eine Überwachung der Dampfproduktion und der Abgas- sowie Schlackequalität möglich.
- Wartung: Hierbei kann unter Anderem der Zustand der Ausmauerung innerhalb des Drehrohrofens überwacht werden, beispielsweise durch Überwachung der Temperatur an der Außenhülle. Dadurch lassen sich Reisezeiten optimieren und Wartungsintervalle besser planen. Darüber hinaus kann beobachtet werden, wie sich die Verschmutzung innerhalb des Dampferzeugers gestaltet, indem zum Beispiel die Leistungsdaten des Dampferzeugers überprüft werden, was wiederum die Stillstandszeiten durch verbesserte Wartungsplanung verringern kann. Durch das Überwachen der Anlagenparameter im Allgemeinen können auffällige Verhaltensweisen erkannt werden, die wiederum auf Schäden hinweisen können.

- **Digitaler Zwilling**

- Abfallmanagement: Durch den Einsatz eines digitalen Zwillings können die angesprochenen Optimierungen wie etwa die gleichmäßige Aufgabe von möglichst homogenem Müll oder die Koordinierung der Lieferanten automatisiert durchgeführt werden.
- Betriebsführung: Auch bei der Betriebsführung können beispielsweise die Überwachung der Rauchgasparameter oder die Optimierung bzw. Stabilisierung des Betriebs des Drehrohrofens automatisiert werden. Etwa können automatisch Restriktionen in Kraft treten, um zum Beispiel Emissionsgrenzwerte nicht zu überschreiten.
- Wartung: Bei der Wartung besteht die Möglichkeit, mithilfe eines digitalen Zwillings die Leistungsparameter der Anlage beispielsweise zu beschränken, um die Anlage schonender zu betreiben und somit die Reisezeit zu verlängern und die Wartungsintervalle zu reduzieren. Darüber hinaus kann die Betriebsweise auch angepasst werden, um die Zusammenarbeit mit externen Partnern zu optimieren.

- **Vorhersagender Digitaler Zwilling**

- Abfallmanagement: Unter Zuhilfenahme von Simulationen kann die Planung der Lagerhaltung verbessert werden, um eine optimierte Betriebsführung gewährleisten zu können.
- Betriebsführung: Der vorhersagende digitale Zwilling kann als Anwendung die Betriebsführung unterstützen, indem dieser ermöglicht, dass zukünftige Betriebszustände basierend auf den aktuellen Planungen simuliert werden

und somit frühzeitig Probleme erkannt werden können. Darüber hinaus kann der vorhersagende digitale Zwilling dazu verwendet werden, um zukünftige Anlagenfahrer zu schulen und ihnen zu helfen, ein Gefühl für die Anlage und die Auswirkungen einzelner Handlungen zu entwickeln.

- **Wartung:** Die Simulationen ermöglichen es, Stillstandszeiten auch mit dem Energieversorger und anderen Kraftwerken abzustimmen. Somit ist ökonomische und ökologische Einlastung möglich.

Das Ziel für den Einsatz in einer Sondermüllverbrennungsanlage wäre ein vorhersagender digitaler Zwilling. Dafür wurden in dieser Arbeit die ersten Schritte unternommen.

5.4 Das Datenmanagement

Die in dieser Arbeit verwendeten historischen Originaldaten stammen aus dem Leitsystem der Sondermüllverbrennungsanlage Simmeringer Haide der Wien Energie. Dort werden sie in einem sogenannten „Datalake“ gespeichert. Aus diesem wurden sie von Mitarbeitern des Standorts extrahiert und zur Verfügung gestellt. Anschließend wurden sie wie nachfolgend beschrieben aufbereitet und zu einem Datenpool zusammengefasst. Der Datenpool besteht im konkreten Fall aus einer Ansammlung von Dateien des Datentyps „JSON“ und diversen Microsoft Excel-Sheets. Die Schnittstelle zwischen dem Datenpool und dem Modell ist dabei ein Mensch, der die Daten manuell durch Kopieren und Einfügen von dem Datenpool in das Simulationsmodell überführt. Die daraus resultierenden Rechenergebnisse werden wiederum manuell übertragen, im Anschluss manuell ausgewertet und danach aufbereitet zur Verfügung gestellt, um daraus zukünftige Vorgehensweisen für die Steuerung der realen Anlage ableiten zu können.

Da die zur Verfügung gestellten Daten für eine andere Anwendung aufbereitet wurden, mussten diese auf die in dieser Arbeit verwendeten Einheiten umgerechnet werden. Als Standardeinheiten wurden für Massenströme kg/h und für Volumenströme m³/h festgelegt. Anteilige Angaben wurden, sofern nicht in Einzelfällen anders notwendig, als Volumenprozent berechnet, während Temperaturangaben in °C ausgeführt wurden. Die Aufbereitung der Messdaten erfolgte mithilfe eines selbstgeschriebenen Python-Scripts, welches eine halb-automatisierte Umrechnung der Messdaten sowie ein gezieltes Herausfiltern der für das IPSEpro Dynamics-Modell notwendigen Messdaten ermöglichte. Dabei wurde auf die bereits erwähnten Daten zurückgegriffen. Dennoch mussten diese so neu formatiert werden, dass sie einerseits nach den gewünschten Zeitslots sortiert, andererseits auch im richtigen Format vorlagen, um ein Öffnen der CSV-Dateien in Excel zu ermöglichen. Dies ist insofern notwendig, als dass eine Eingabe von Timetables im IPSEpro Dynamics-Modell zum aktuellen Zeitpunkt am effizientesten über eine manuelle „Copy and Paste“-Ausführung gelöst werden kann. Bei der Umformatierung der Rohdaten wurden zeitgleich auch die Einheiten laut den Tabellen Nr. 5, 6 und 7 konvertiert, sowie die in der nachfolgenden Auflistung angegebenen Korrekturwerte für die gemessenen Gasvolumenströme angerechnet. Diese

Korrekturen erfolgten da auf Basis einer Messkampagne festgestellt wurde, dass diese zusätzlichen Luftmengen im System berücksichtigt bzw. die gemessenen Luftströme korrigiert werden müssen. Dabei wurden der Primär-, Sekundär- und Tertiärluft jeweils +10 % hinzugefügt. Darüber hinaus wurde eine Kühlluft im Umfang von 8000 Nm³/h zur Sekundär- und ein Brennerluftstrom von 8500 Nm³/h der Primärluft hinzugefügt. Welchem Luftstrom die Falschlufmengen letztendlich zugerechnet werden, hängt von der Position ab, an der die Falschlufteinträge auftreten und die Luftströme regulär ins System eintreten.

Eine Auflistung der Sensoren, sowie allfälliger Umrechnungen der Einheiten, ist in den Tabellen 5, 6 und 7 ausgeführt. Für Abwasser wurde zur Vereinfachung eine Dichte von 1000 kg/m³ angenommen, was eine direkte Verwendung ohne vorhergehende Konvertierung ermöglichte.

Die betrachteten Zeiträume umfassen drei unterschiedliche Warmhaltebetriebe mit reinem Heizöl extraleicht (HEL)-Einsatz, zur Parameteranpassung des Modells, und einen Zeitraum mit Spitalmüll:

- HEL-Durchlauf 1: 2.11.21: 09h30 - 12h00
- HEL-Durchlauf 2: 9.11.21: 13h00 - 15h00
- HEL-Durchlauf 3: 23.11.21: 12h50 - 15h00
- Spitalmüll-Durchlauf: 16.11.21: 14h30 - 16h01

Da die einzigen Zeiträume mit vollständig bekannten Brennstoffeigenschaften jene waren, in denen im Warmhaltebetrieb lediglich HEL verfeuert wurde, wurden diese als Grundlage für die Parametrierung ausgewählt, um möglichst viele Unbekannte aus dem Spiel zu nehmen. Bei den Daten wurden zwei Kategorien unterschieden: Eingabe- und Vergleichswerte. Diese sind in den Tabellen Nr. 5, 6 und 7 jeweils mit einem (E) für Eingabewerte oder einem (V) für Vergleichswerte gekennzeichnet.

Tabelle 5: Auflistung der Einheiten der Originaldaten sowie allfällige Umrechnungen auf die vom Modell verwendeten Einheiten

Messdaten Ort	Einheit (Original)	Einheit (Ziel)	Umrechnung
Rauchgas nach E-Filter CO ₂ (V)	Vol%	Vol%	-
Rauchgas vor Wäscher H ₂ O (V)	Vol%	Vol%	-
Rauchgas vor Kessel Temperatur (V)	K	°C	K - 273.15
HD-Dampf Menge unkorrigiert (V)	t/h	kg/h	t/h * 1000

Tabelle 6: Fortsetzung: Auflistung der Einheiten der Originaldaten sowie allfällige Umrechnungen auf die vom Modell verwendeten Einheiten

Messdaten Ort	Einheit (Original)	Einheit (Ziel)	Umrechnung
Rauchgas vor E-Filter Temperatur (V)	K	°C	K - 273.15
Speisewasser nach Eco Temperatur (V)	K	°C	K - 273.15
Rauchgas nach E-Filter O2 (V)	Vol%	Vol%	-
Lanze 1 Altöl Menge (E)	kg/h	kg/h	-
Lanze 1 Schweröl Menge (E)	kg/h	kg/h	-
Lanze 1 Lösungsmittel Menge (E)	kg/h	kg/h	-
Lanze 1 Heizöl extra leicht Menge(E)	kg/h	kg/h	-
Lanze 2 Altöl Menge (E)	kg/h	kg/h	-
Lanze 2 Schweröl Menge (E)	kg/h	kg/h	-
Lanze 2 Lösungsmittel Menge (E)	kg/h	kg/h	-
Lanze 2 Heizöl extra leicht Menge (E)	kg/h	kg/h	-
Primärluft Menge (E)	m ³ /s	kg/h	$m^3/h * 1.293$ $* (273.15/K) * 1.1$ $* 3600 + 8500 * 1.293$
Stirnwandbrenner Altöl Menge (E)	kg/h	kg/h	-

Tabelle 7: Fortsetzung: Auflistung der Einheiten der Originaldaten sowie allfällige Umrechnungen auf die vom Modell verwendeten Einheiten

Messdaten Ort	Einheit (Original)	Einheit (Ziel)	Umrechnung
Stirnwandbrenner Heizöl Schwer Menge (E)	kg/h	kg/h	-
Stirnwandbrenner Heizöl Extra Leicht Menge (E)	kg/h	kg/h	-
Abwasserlanze Nachbrennkammer Menge (E)	l/h	kg/h	-
Sekundärluft Menge (E)	m ³ /s	kg/h	$m^3/h * 1.293 * (273.15/K) * 1.1 * 3600 + 8000 * 1.293$
Tertiärluft Menge (E)	m ³ /s	kg/h	$m^3/h * 1.293 * (273.15/K) * 1.1 * 3600$
Speisewasser vor Eco Temperatur (E)	K	°C	K - 273.15

5.5 Die Datenkommunikation

Beispielhaft ist hier der Weg eines originalen Datensatzes bis zur Auswertung durch einen Endnutzer dargestellt. Die Daten die auf einem Rechner der Wien Energie liegen wurden zur Verfügung gestellt und im Anschluss daran aufbereitet, dabei nach gewünschten einzelnen Sensoren oder Aufzeichnungen sortiert, und auf ein bestimmtes Zeitfenster zugeschnitten, welches betrachtet werden sollte. Diese Daten wurden nun zum Teil bereits für einen späteren Vergleich grafisch aufbereitet, oder aber in Tabellenform an das digitale Modell durch Kopieren und Einfügen auf dem Rechner der TU Wien übergeben. Dort erfolgt die Berechnung. Danach wurden die Ergebnisse abermals aufbereitet. Die dabei entstandenen Resultate können mit den bereits erstellten Vergleichsgrafiken abgeglichen werden, um Optimierungspotentiale zu analysieren. Dass dieses System für reale Anwendungen wenig effizient ist, liegt auf der Hand. Für die Realisierung im Rahmen dieser Diplomarbeit ist dieser Ansatz aber ausreichend.

6 Einsatz des digitalen Modells

Nach der genauen Beschreibung der Architektur des digitalen Zwillings soll nun der Einsatz des digitalen Modells näher erläutert werden.

6.1 Solverparameter

Als allgemeine Einstellungen für den Solver wurden folgende Parameter für die Berechnungen ausgewählt: Die maximale Anzahl an Iterationsschritten pro Zeitschritt wurde auf 50 festgelegt, mit maximalen Toleranzen von 0,001 bei einem Toleranz-Korrekturfaktor von 10. Diese Einstellungen liegen im strengeren unteren Drittel jenes Bereiches, in dem sich der Solver bewegen kann.

6.2 Energieströme im Drehrohrofen

Anhand der Abbildungen 31 und 32 soll unter Zuhilfenahme eines sogenannten 'Sankey'-Diagramms anschaulich dargestellt werden, wie sich die angenommenen Verweilzeiten in den betrachteten Zeiträumen auf die Aufteilung der thermischen Leistung innerhalb des Drehrohrofens auf die einzelnen Fraktionen auswirken. Dabei wird in Abb. 31 der Zeitslot mit Spitalmüll als primärem organischen Brennstoff und in Abb. 32 ein gemitteltetes Ergebnis aus drei verschiedenen Warmhaltebetrieben mit nur Heizöl extraleicht (HEL) dargestellt.

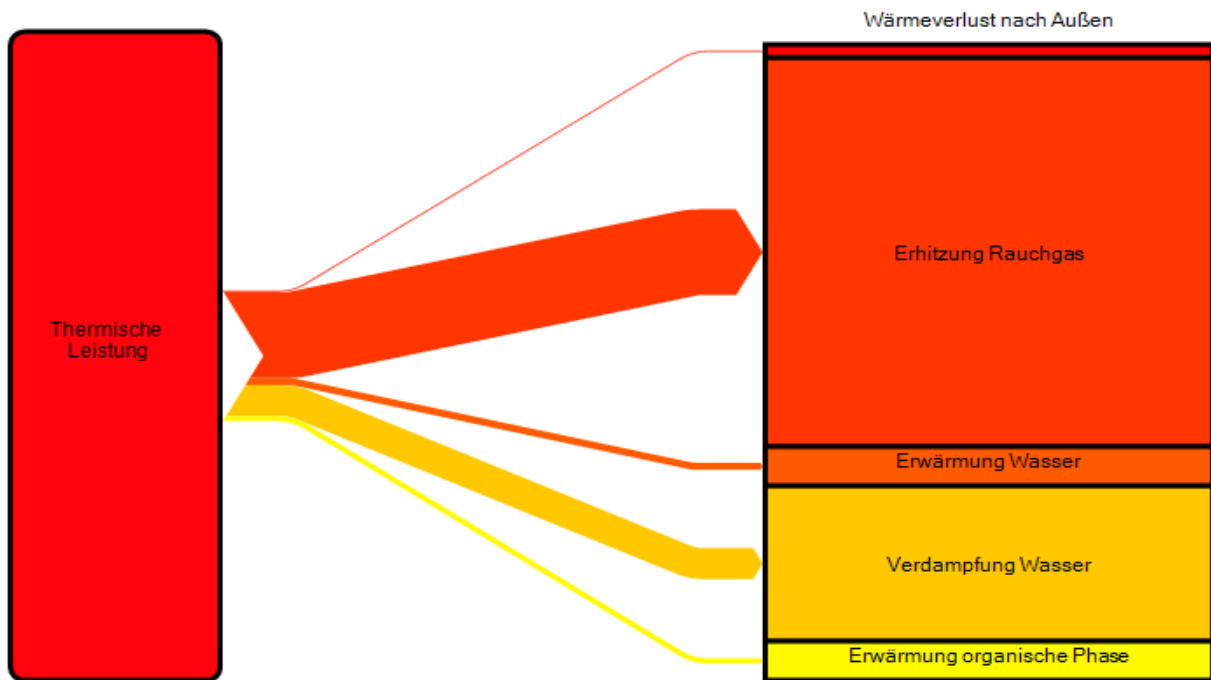


Abbildung 31: Visualisierung der Energieströme im Drehrohrofen mit Spitalmüll

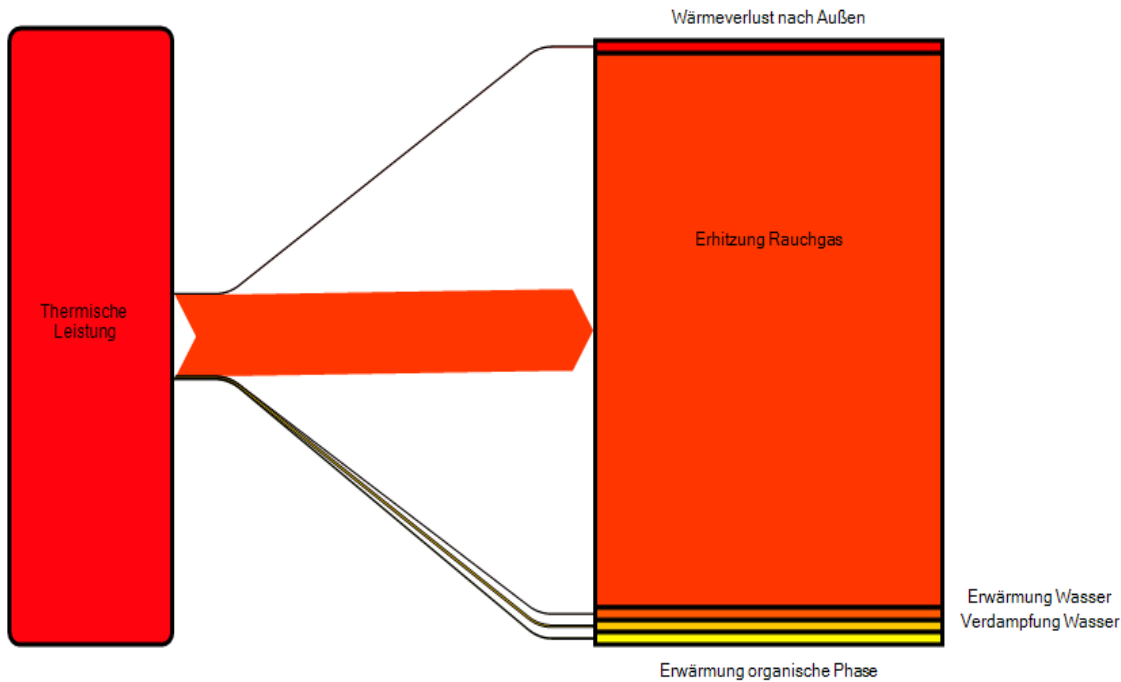


Abbildung 32: Visualisierung der Energieströme im Warmhaltebetrieb mit HEL

Die Verschiebung der Energieströme vom Spitalmüll zum HEL ist deutlich ersichtlich durch die Tatsache, dass beim Warmhaltebetrieb bei den gewählten Wärmeverlust-Anteilen praktisch die gesamte thermische Energie direkt in die Erhitzung des Rauchgases übergeht. Dies ist insofern eine positive Beobachtung, als dass dies dem Nutzen des Warmhaltebetriebes in der Praxis entspricht.

6.3 Bestimmung einer unbekanntenen Brennstoffzusammensetzung

In diesem Abschnitt werden die Berechnungen abschließend anhand des Vergleichs eines Betriebszeitraumes, an dem lediglich der Stirnwandbrenner sowie die Aufgabeschiene mit dem Spitalmüll in Betrieb war, bewertet. In der Diskussion werden darüber hinaus Erklärungsansätze für Abweichungen und auftretende, bzw. beobachtbare, Phänomene dargelegt. Dies erfolgt anhand der im Anschluss dargestellten grafischen Auswertungen der einzelnen zum Vergleich herangezogenen Sensoren. Von welchen Sensoren dabei im Detail die Rede ist, wurde bereits in den Tabellen 5, 6 und 7 ausführlich behandelt. Wie bei einem Drehrohrföfen üblich, erfolgt auch die Aufgabe des Spitalmülls zeitlich abgegrenzt, im konkreten Fall durch Zugabe einzelner als Fass vorliegender Gebinde. Da der eingesetzte Müll vermeintlich gut brennbar ist, ist somit in den Messdaten mit Sauerstoffsinken im Anschluss an eine Zugabe von einer neuen Ladung Müll zu rechnen. Exakt dieses Verhalten tritt in Abbildung 33 auf. Auf das auf den ersten Blick verwirrende, weil gegenläufige, Verhalten der berechneten Kurve wird in der Folge noch genauer eingegangen.

Eine allgemeine geringe Abweichung im Hinblick auf generelles zeitliches Verhalten der

Simulationsergebnisse kommt durch eine Annahme der Verweilzeiten beim Erstellen des dynamischen Modells des Drehrohrofens zustande. Diese Verweilzeit ist in der Realität nicht immer konstant. Für die Modellierung musste in diesem Fall jedoch ein konstanter Wert festgelegt werden, da keine direkten Berechnungen der Wärmeübergänge im Drehrohr durch Strahlung oder Konvektion, abhängig von Betthöhe und somit Kontaktflächen zu Wand und Gas, durchgeführt werden.

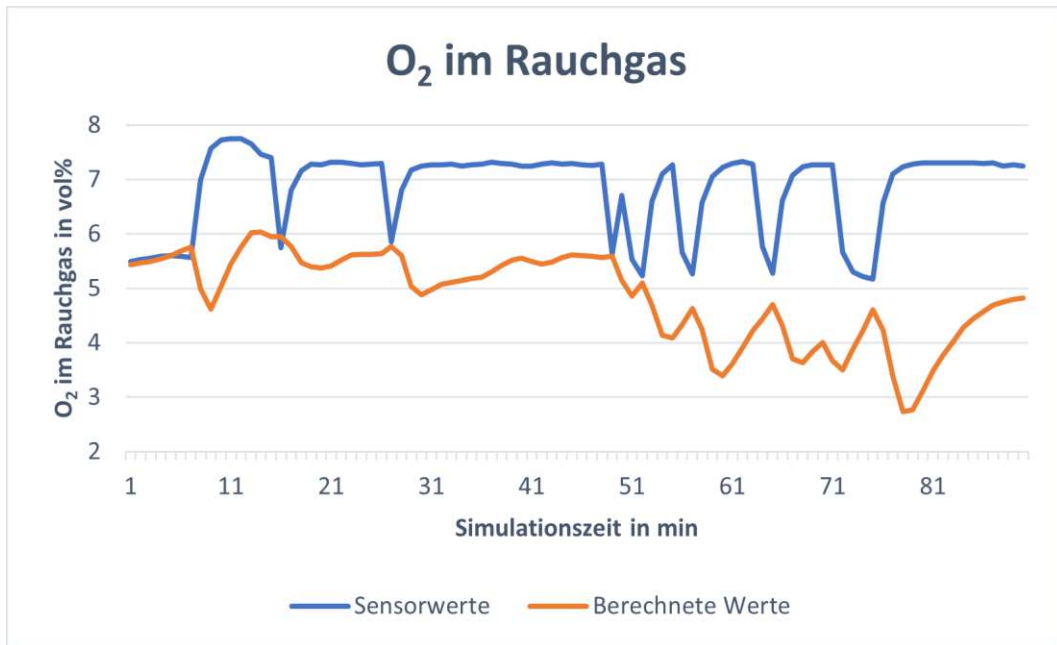


Abbildung 33: Sauerstoffanteil im Rauchgas; Spitalmüll

Die Abbildungen 33-39 wurden untereinander auf Konsistenz überprüft. Bei einem Vergleich von Abb. 33 und 34 wird ersichtlich, dass während der Sauerstoffgehalt erniedrigt ist, der Kohlendioxidanteil deutlich zu hoch berechnet wird. Beide Beobachtungen ergänzen sich in der Ursache und lassen auf einen zu hoch angenommenen Kohlenstoffanteil im Brennstoff schließen. Eine Reduzierung dessen würde die Bildung von CO_2 verringern und folglich bei gleichem Lufteinsatz den O_2 -Gehalt im Rauchgas ansteigen lassen.

In Abbildung 35 ist zu sehen, dass der Wasseranteil im Rauchgas durchwegs zu hoch berechnet wurde. Auffällig ist darüber hinaus, dass die Wassermenge umgekehrt proportional zu den gemessenen Daten berechnet wird. Bei Senken in den realen Messdaten liegen bei den Berechnungen tendenziell Spitzen vor, wenngleich die Rechenergebnisse deutlich geringere Schwankungen aufweisen als die Originaldaten.

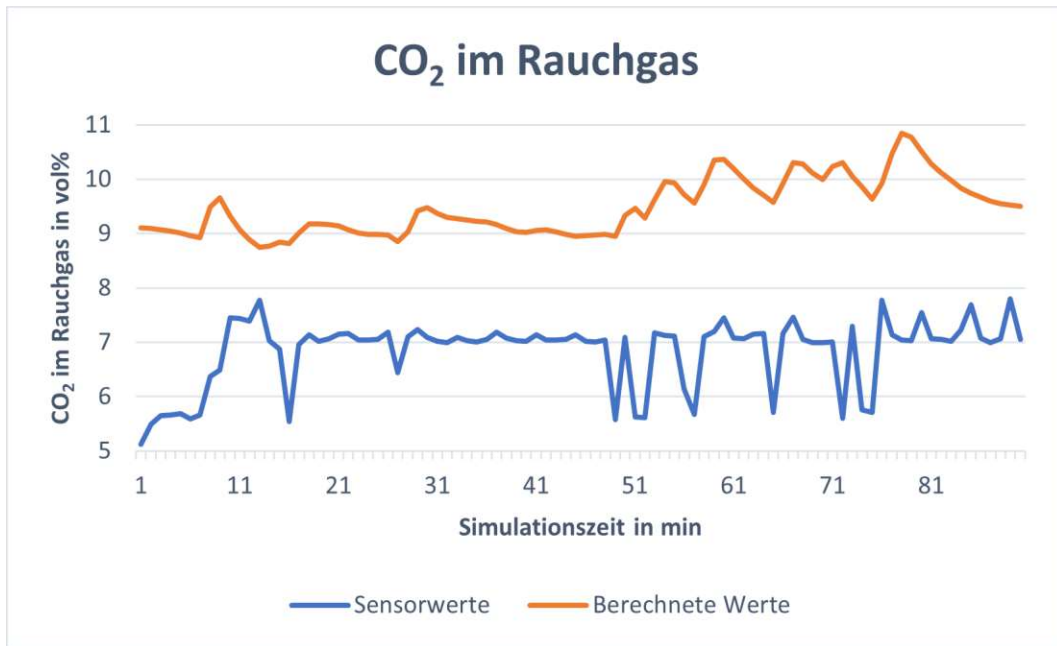


Abbildung 34: Kohlenstoffdioxidanteil im Rauchgas; Spitalmüll

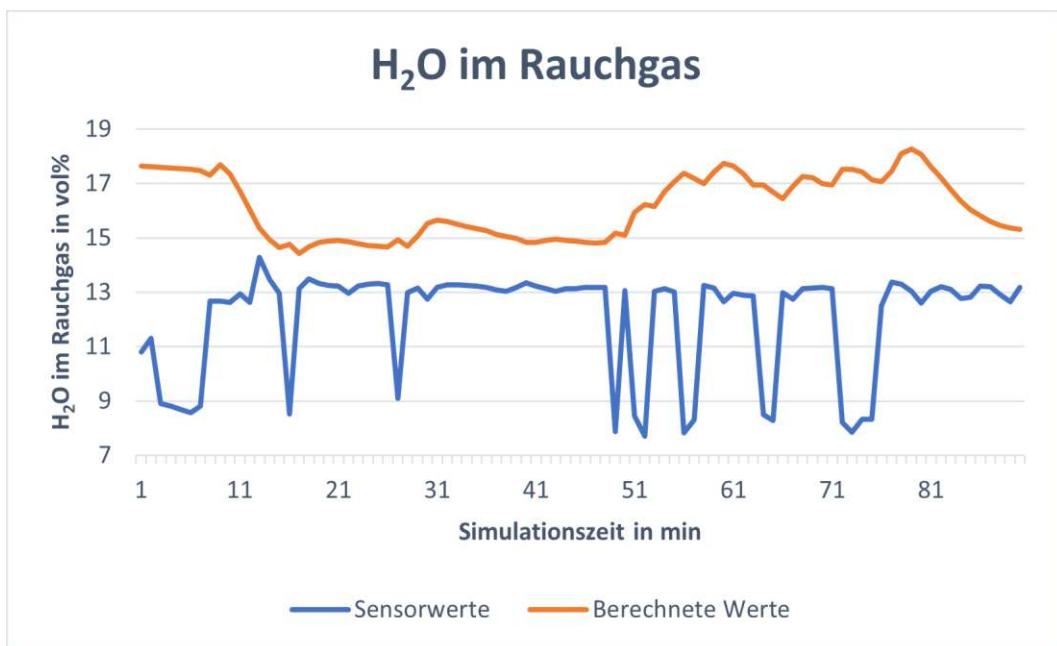


Abbildung 35: Wasseranteil im Rauchgas; Spitalmüll

Bei der Betrachtung der Abbildungen 36 und 38, zeigt sich, dass der Dampferzeuger bei der produzierten Frischdampfmenge sehr schnell und vor allem äußerst stark auf die Temperaturschwankungen am Gaseintritt reagiert. Da hierbei ein masseloses Modell mit fixer temperaturabhängiger Wärmeüberträgerleistung vorliegt, ist dieses

Verhalten durchaus zu erwarten. Wie bereits bei den, in Kapitel 5.2.4 dargestellten, Ergebnissen der Parametrierung ist auch hier eine deutlich erhöhte Dampfmenge auffällig. Da die festgelegte Wärmeüberträgerleistung jedoch im Modell konstant gehalten werden muss, und im Rahmen der Parametrierung dabei sowohl als zu niedrig als auch als zu hoch angesehen wurde, ist in diesem Punkt keine weitere Optimierung mit den vorliegenden Daten möglich. Berücksichtigt werden muss jedoch auch die weiter oben beschriebene erhöhte Wasserdampfmenge im Rauchgas, die sich auf die Wärmekapazität auswirkt. Dadurch wird bei gleichen Temperaturdifferenzen zwischen Rauchgas und Wärmetauscher zwar gleich viel Wärme übertragen, das Gas kühlt bei gleicher abgegebener Energiemenge aber unterschiedlich stark ab. Im Fall eines erhöhten Wassergehaltes kühlt das Rauchgas etwas weniger ab.

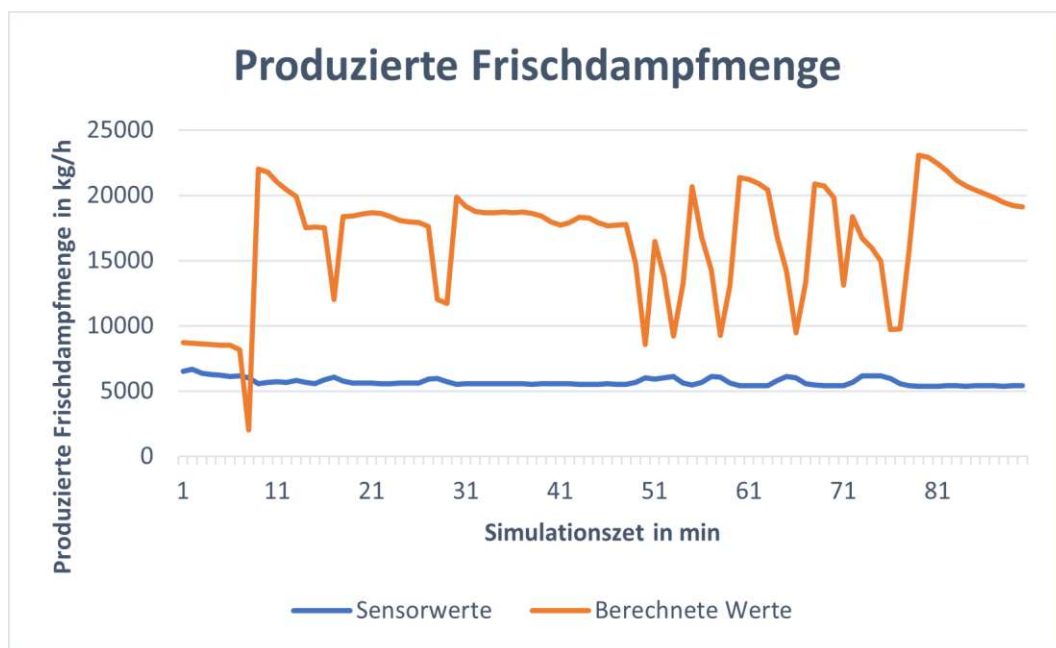


Abbildung 36: Produzierte Frischdampfmenge; Spitalmüll

Die in Abbildung 37 dargestellte Temperatur des Rauchgases nach dem Economiser lässt nicht nur ein verstärktes, sondern auch ein gegenläufiges Verhalten im Vergleich zu den realen Sensorwerten erkennen. Auf die vermeintliche Ursache dieses Phänomens wird zu einem späteren Zeitpunkt noch genauer eingegangen.

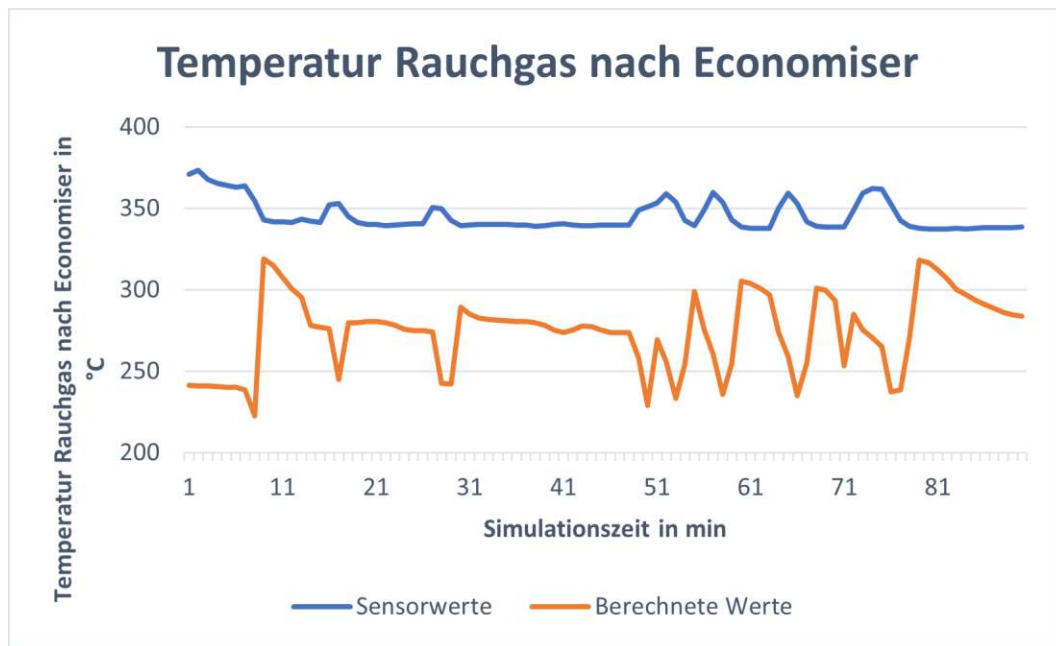


Abbildung 37: Rauchgastemperatur nach Economiser; Spitalmüll

Anschließend ist bei einem Blick auf die Rauchgastemperatur vor dem Dampferzeuger in Abbildung 38 zu erkennen, dass sich die kleinen Schwankungen in den gemessenen Sensordaten in den berechneten Werten deutlich stärker ausgeprägt abzeichnen. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass weder der Drehrohrofen an sich, noch die Nachbrennkammer im Modell eine eigene Masse aufweisen. Daraus kann abgeleitet werden, dass beide Submodelle, die in Gasrichtung dem Dampferzeuger vorgeschaltet sind, nicht über thermische Speicher im Sinne großer Stahlmassen verfügen. Dies hat deutlich ausgeprägtere Reaktionen der Temperatur auf die Aufgaben neuen Brennstoffes im Ofenrohr zur Folge, die auch in der Nachbrennkammer wenig gedämpft werden.

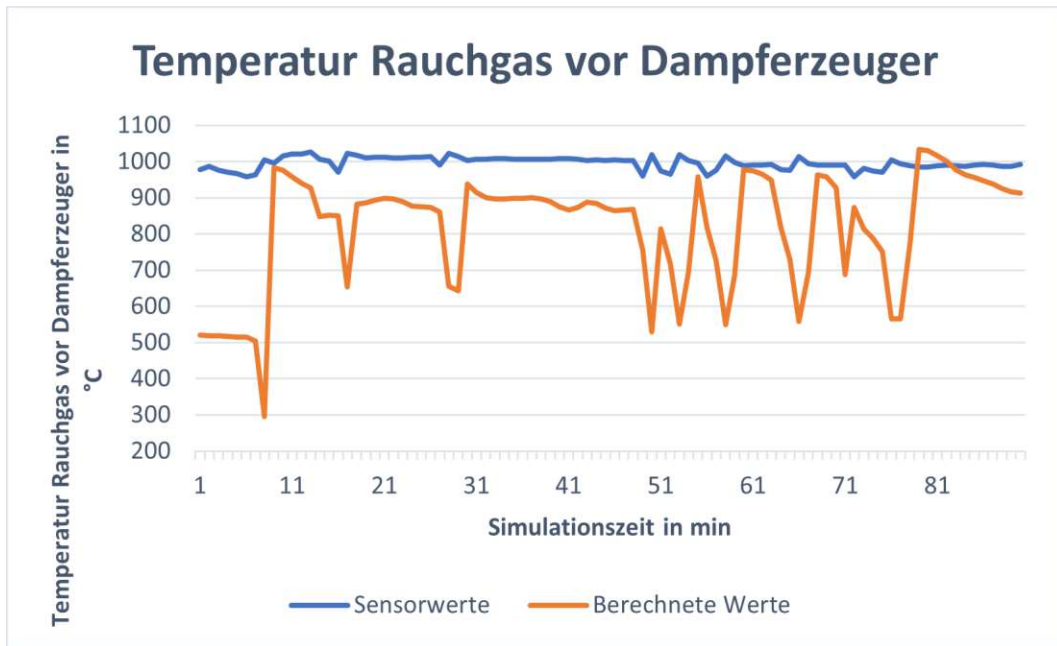


Abbildung 38: Rauchgastemperatur vor Dampferzeuger; Spitalmüll

In Abb. 39 dargestellt ist die Temperatur des Speisewassers nach Verlassen des Economisers. Das höhere Temperaturniveau des berechneten Modells lässt sich durch das ideale Wärmeübertragungsmodell erklären. Eine potentiell auftretende Verschmutzung, wie sie in der Praxis gegeben sein kann, ist in diesem Modell nicht hinterlegt. Gegensätzliche Resultate bei der Parametrierung deuten jedoch darauf hin, dass dies nicht die einzige Begründung ist. Auffällig ist darüber hinaus die hohe Anzahl durchaus länger anhaltender Abschnitte exakt horizontal verlaufender Temperaturlinien in der Berechnung. Dies liegt daran, dass das Speisewasser in diesen Zeiträumen die Siedetemperatur erreicht hat und dadurch als Zweiphasengemisch vorliegt. Die daraus resultierende konstante Temperatur ist deutlich als horizontale Linie in der Grafik ersichtlich. Dass die Temperaturspitzen im Modell zwar zeitlich ähnlich zum Original, jedoch deutlich stärker auftreten, ist darauf zurückzuführen, dass das Modell des Economisers an sich keine Masse in Form von Stahlrohren oder Stahlwänden aufweist, was dieses wiederum aufgrund fehlender thermischer Speicherterme deutlich agiler macht. Eine Reaktion auf sich ändernde Gastemperaturen am Eingang machen sich dadurch auch schneller bemerkbar. Ein gewisser Einfluss der Messung des zugeführten Speisewassers kann aufgrund nicht bekannter eventueller Messabweichungen ebenfalls nicht ausgeschlossen werden. Einen weiteren Einflussfaktor stellt der aktuell in der Energiebilanz nicht berücksichtigte Wärmeverlust an die Umgebung dar.

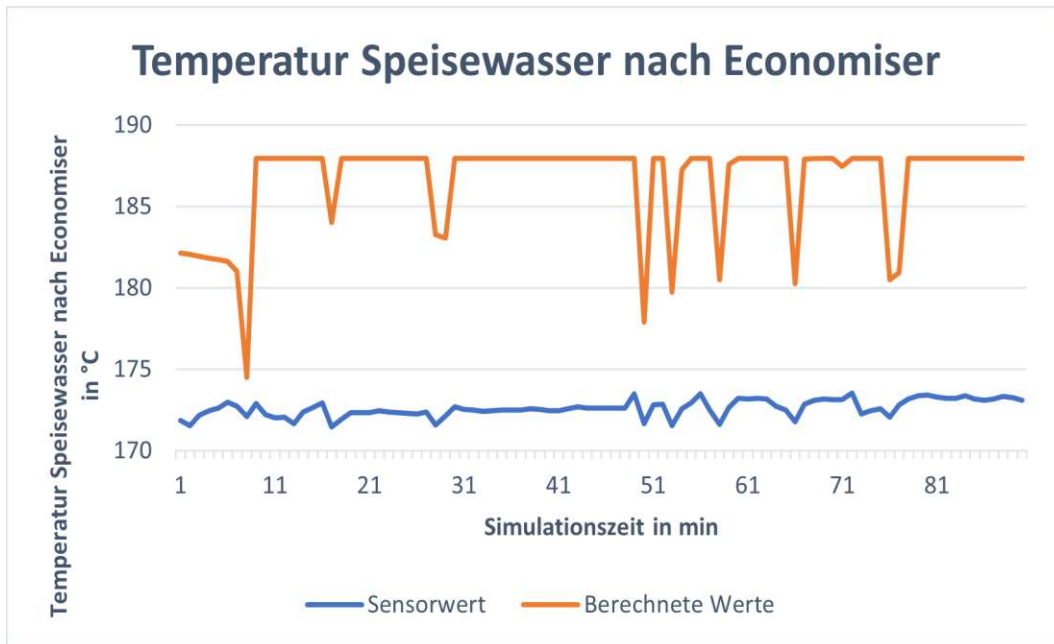


Abbildung 39: Speisewassertemperatur nach Economiser; Spitalmüll

Da bei den Abbildungen 33 bis 39 jene Beobachtungen erklärt wurden, die einen oder zwei Sensoren simultan betreffen, wird an dieser Stelle näher auf die Auswirkungen der vermeintlich nicht ganz korrekten Einschätzung der Brennstoffzusammensetzung eingegangen.

Während, wie vorhin erwähnt, ein zu hoch angesetzter Kohlenstoffanteil sowohl die Ergebnisse im Sauerstoff- als auch im Kohlenstoffdioxidanteil im Rauchgas erklärt, so hat auch der Wassergehalt einen beträchtlichen Einfluss. Dieser führt teilweise zu sich vermeintlich widersprechenden Ergebnissen bei den realen Sensorwerten und den Berechnungen. Bei einem zweiten Blick auf die Abb. 33 fällt auf, dass dabei gegenläufig zu den Sensordaten bei der Zugabe von Brennstoffen kurzzeitig ein Anstieg der Sauerstoffkonzentration vorliegt. Bei einem leicht brennbaren Brennstoff wäre an diesen Stellen eine Senke zu erwarten, deren Ausprägung von der Geschwindigkeit abhängt, mit welcher der neu zugeführte Brennstoff umgesetzt. Bei den Sensorwerten in blau ist dies auch der Fall. Nicht so bei den berechneten Ergebnissen. Wird nun aber davon ausgegangen, dass mit jeder Zugabe des Brennstoffes zu viel Wasser in den Drehrohrofen gelangt, so erklären sich sehr wohl die Temperatursenken, wie unter anderem in Abbildung 38 deutlich erkennbar. Diese kurzzeitige Abkühlung wiederum ist durch die Art der Implementierung der Verweilzeit erklärbar. Mehr Wasser im Drehrohrofen führt dazu, dass bei gleicher Verweilzeit mehr Energie für die Erwärmung und Verdampfung aufgewendet werden muss, was wiederum die Energiemenge verringert, die für die Erhitzung des Rauchgases zur Verfügung steht. Dadurch hat das Rauchgas allerdings einen erhöhten Wasserdampfanteil, was eine erhöhte Wärmekapazität zur Folge hat. Wird nun pro Temperatureinheit dieselbe Energiemenge entzogen, so kann sich am Ende ein wärmeres Gas am Ausgang des

Dampferzeugers oder Economisers abzeichnen bei gleichzeitig steigender Dampfproduktion. Auch darf nicht vergessen werden, dass der Massenstrom des eingesetzten Brennstoffes nicht unabhängig von der Zusammensetzung ist. Steigt nun der Wasseranteil, so vermindert sich zwangsläufig der Anteil an brennbarem organischen Material, wodurch im Endeffekt weniger thermische Leistung im Ofenrohr freigesetzt wird.

Die zuvor beschriebenen Beobachtungen wurden zur Nachbesserung der eingesetzten Brennstoffzusammensetzung verwendet. Die Ergebnisse sind anschließend in den Abbildungen 40 bis 46 ersichtlich. Dabei beschreibt die schwarze Linie jene Berechnungsergebnisse, die mit der abgeänderten Brennstoffzusammensetzung errechnet wurden.

In Abbildung 40 ist zu sehen, dass die Sauerstoffkonzentration im Rauchgas zwar an das Niveau der gemessenen Werte angehoben werden konnte, jedoch das allgemeine Verhalten sich den zuvor berechneten Ergebnissen angleicht.

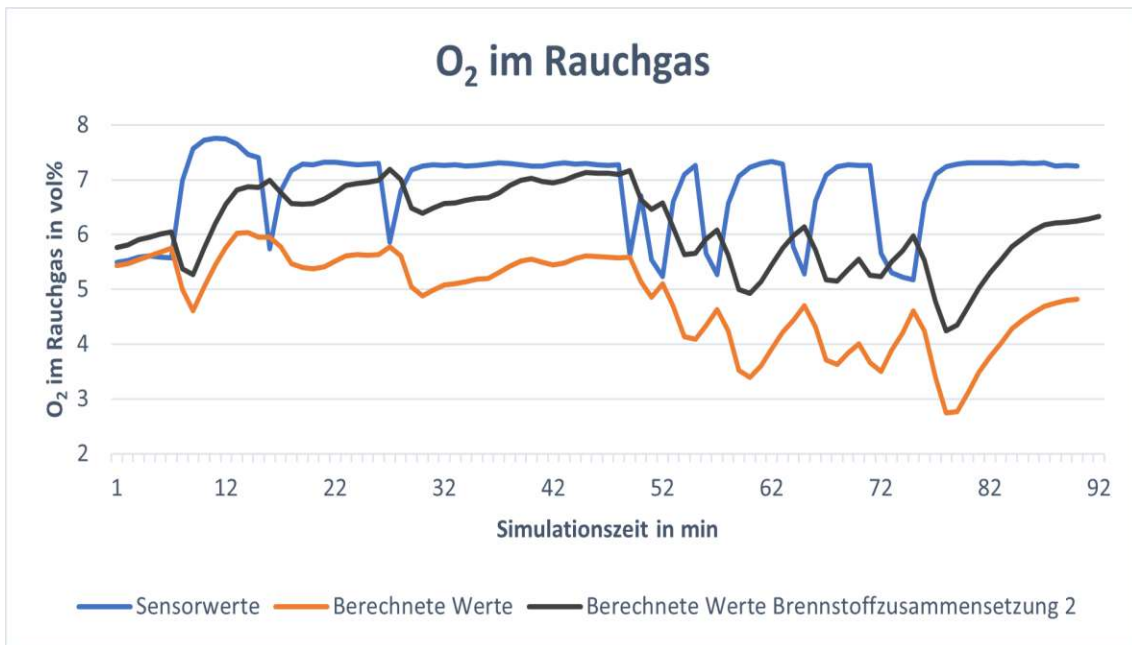


Abbildung 40: Sauerstoffanteil im Rauchgas; Spitalmüll; Brennstoffzusammensetzung 2

Das bei Abbildung 40 beschriebene angleichende Verhalten der berechneten Ergebnisse unabhängig von der jeweiligen Brennstoffzusammensetzung ist in Abbildung 41 noch deutlicher zu erkennen. Im Zuge der Anpassung der Brennstoffzusammensetzung konnte der Kohlenstoffdioxidgehalt im Rauchgas jedoch nicht weiter abgesenkt werden, ohne den mittleren gesamten Fehler wieder zu erhöhen.

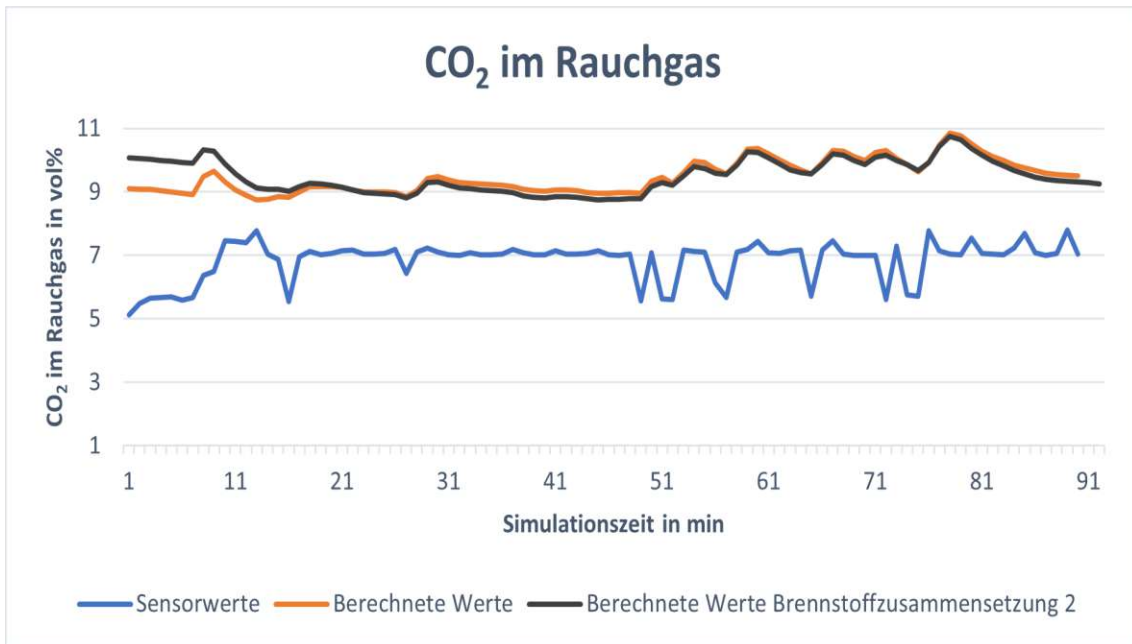


Abbildung 41: Kohlendioxidanteil im Rauchgas; Spitalmüll; Brennstoffzusammensetzung 2

Der in Abbildung 42 abgebildete Wasseranteil im Rauchgas wurde im Zuge der Änderung der Brennstoffzusammensetzung deutlich besser angenähert und geglättet.

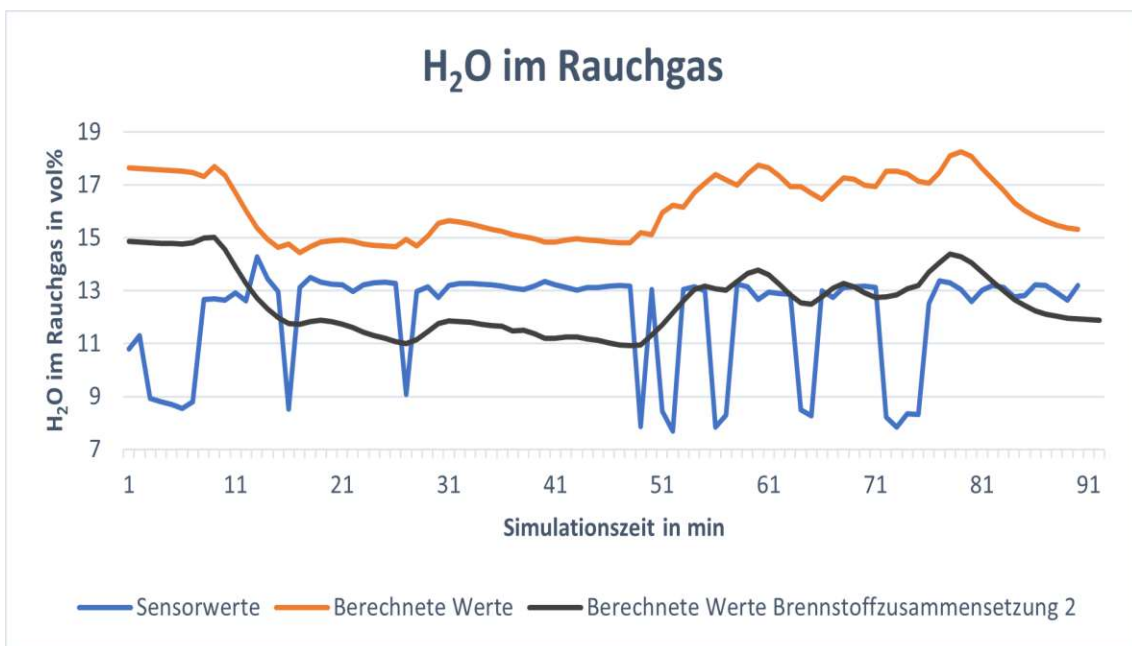


Abbildung 42: Wasseranteil im Rauchgas; Spitalmüll; Brennstoffzusammensetzung 2

In Abbildung 43 ist zu sehen, dass zwar die Schwankungen im Vergleich zu den ersten

Berechnungen geringer wurden, jedoch liegt die produzierte Frischdampfmenge sogar noch über denen der ersten Berechnungen. Die Gründe hierfür wurden bereits zuvor näher beschrieben. Auch ist bei dieser Brennstoffzusammensetzung die Temperatur des Rauchgases vor dem Dampferzeuger signifikant höher als bei den ersten Rechenergebnissen, wie Abbildung 45 zeigt.

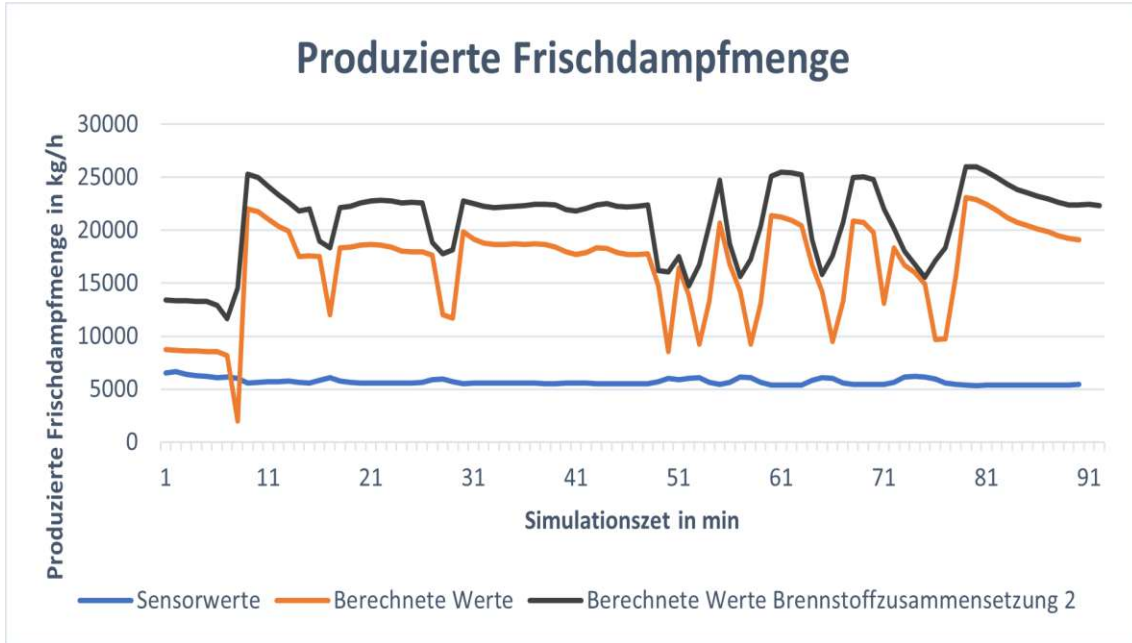


Abbildung 43: Produzierte Frischdampfmenge; Spitalmüll; Brennstoffzusammensetzung 2

In Abbildung 46 ist zu sehen, dass die Temperatur des Rauchgases nach dem Economiser zwar angestiegen ist, jedoch ist dieser Umstand auf die höhere Temperatur vor dem Dampferzeuger zurück zu führen, nicht auf ein geändertes Verhalten des Economisers. Wie Abbildung 45 zeigt, und wie bereits zuvor als Grund für die erhöhte Frischdampfmenge genannt wurde, ist bei dieser Brennstoffzusammensetzung die Temperatur des Rauchgases vor dem Dampferzeuger deutlich höher, was bei gleichbleibenden Eigenschaften des Economisers zu einer erhöhten Temperatur des Gases am Ausgang des Economisers führt. Darüber hinaus ist an der Temperatur des Rauchgases am Eintritt des Dampferzeugers ersichtlich, dass die Schwankungen innerhalb derer sich die Temperatur bewegt, im Vergleich zu den vorigen Berechnungen geringer sind.

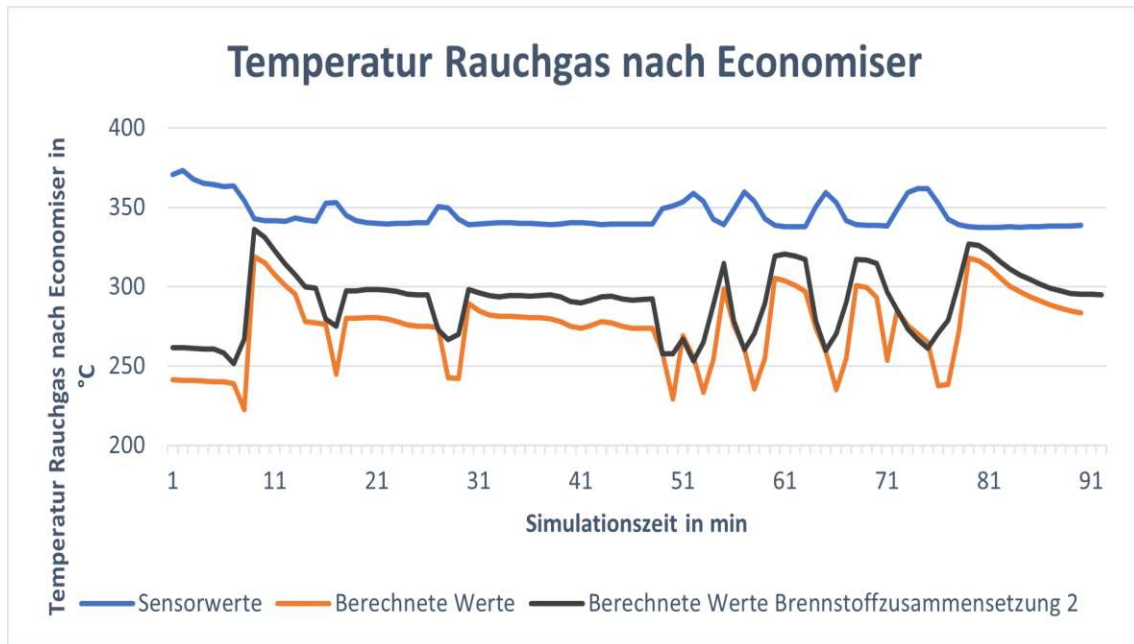


Abbildung 44: Temperatur Rauchgas nach Economiser; Spitalmüll; Brennstoffzusammensetzung 2

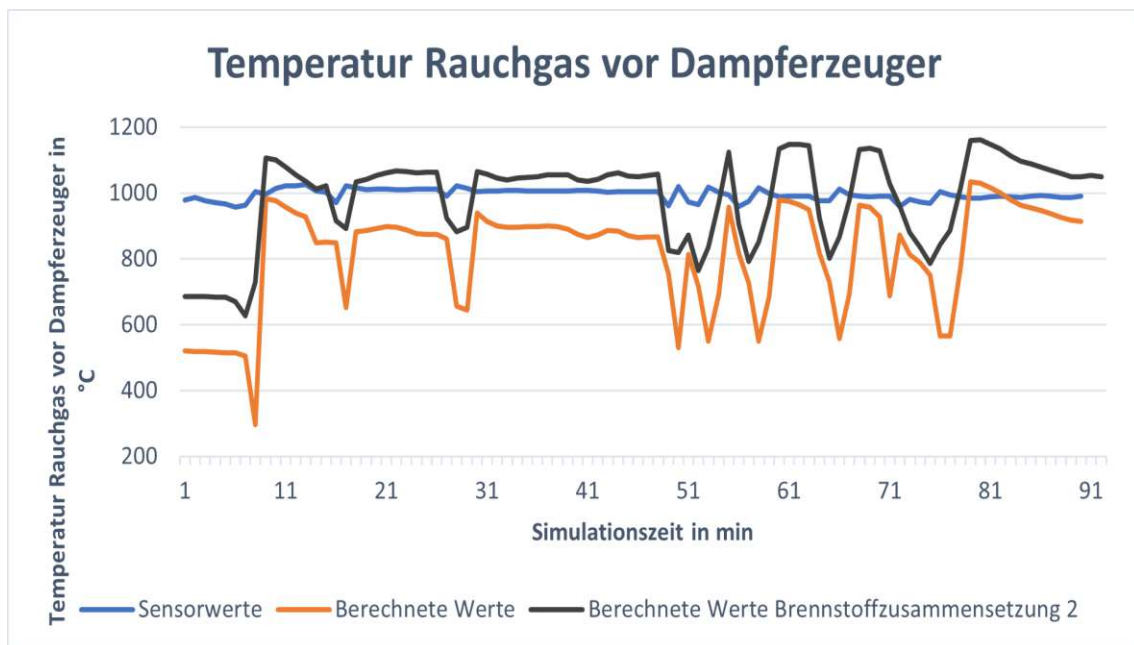


Abbildung 45: Temperatur Rauchgas vor Dampferzeuger; Spitalmüll; Brennstoffzusammensetzung 2

Wird in Abbildung 46 die Temperatur des Speisewassers am Austritt aus dem Economiser genauer betrachtet, so entspricht diese beinahe über den gesamten

Zeitraum einer Geraden. Dies liegt daran, dass das Speisewasser als Zweiphasengemisch vorliegt. Beim Vergleich der Abbildungen 45 und 46 ist der Zusammenhang gut zu erkennen, dass bei einer erhöhten Rauchgastemperatur vor dem Dampferzeuger das Speisewasser nach dem Economiser verstärkt als teilweise dampfförmig vorliegt.

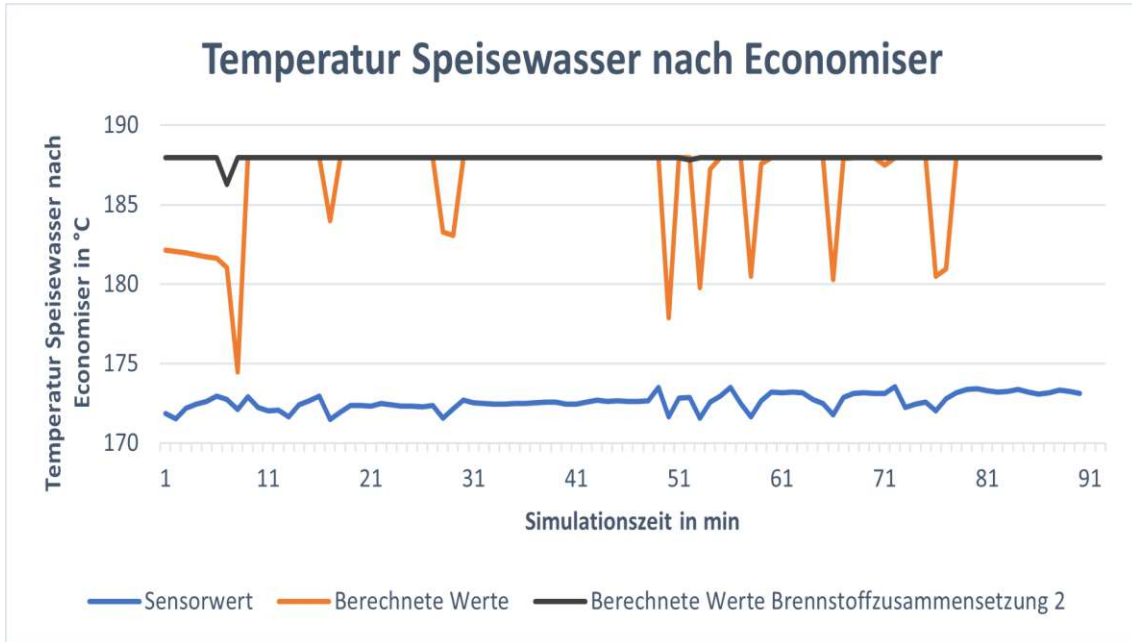


Abbildung 46: Temperatur Speisewasser nach Economiser; Spitalmüll; Brennstoffzusammensetzung 2

In Tabelle 8 sind die Abweichungen der einzelnen Vergleichsparameter für den Betriebszeitraum mit Spitalmüll als Brennstoff aufgelistet. Wird sich der direkte Vergleich zwischen dem Sauerstoff- und dem Kohlendioxidgehalt im Rauchgas (Abb. 33, 34) in Erinnerung gerufen, so wird bei einem Blick auf die relativen Fehler festgestellt werden, dass sich beide verbessern würden, wenn der Kohlenstoff-Anteil im Brennstoff reduziert würde. Somit wirkt sich ein Eingabeparameter mitunter auf mehrere Vergleichspositionen aus. In Summe ergibt sich mit den entsprechenden Gewichtungen der einzelnen Sensorwerte ein gemittelter relativer Gesamtfehler von 37,2 %. Zusätzlich sind in Tabelle 8 die Abweichung der einzelnen Vergleichsparameter mit der neuen Brennstoffzusammensetzung abgebildet, die zuvor als schwarze Linien in den Diagrammen ersichtlich waren. Der gewichtete und gemittelte Fehler konnte bei der geänderten Brennstoffzusammensetzung auf 28,1% gesenkt werden. Dies liegt vor allem an den deutlich geringeren Abweichungen zwischen den Berechnungen und den Sensorwerten beim Sauerstoff- und beim Wassergehalt im Rauchgas.

Tabelle 8: Auflistung der einzelnen Fehler bei der Berechnung des Betriebszeitraumes mit Spitalmüll

Sensor	Fehler	Fehler neue Brennstoff-zusammensetzung	Gewichtung
O ₂ im Rauchgas	0,477986	0,1926501	10
CO ₂ im Rauchgas	0,292837	0,29346231	10
H ₂ O im Rauchgas	0,2605	0,1719186	10
Frischdampf Menge	0,651078	0,719662037	8
Temperatur Rauchgas nach Economiser	0,284809	0,21250675	7
Temperatur Rauchgas vor Dampferzeuger	0,299669	0,1376171	7
Temperatur Speisewasser nach Economiser	0,094994	0,101535	1
Fehler Mittel Gewichtet Gesamt	0,372	0,281	-

Im vorangegangenen Teil wurde bereits kurz angesprochen, dass die Simulationsergebnisse sehr stark unter anderem von den Annahmen der Brennstoffzusammensetzung abhängen können. Die Auswertung der Ergebnisse der Berechnungen mit Spitalmüll legt nahe, dass bei den getroffenen Annahmen Optimierungspotential besteht. Dadurch stellt sich die Frage, ob die Möglichkeit besteht, bei dem Wissen über die Zustände im Rauchgas beispielsweise, die Zusammensetzung des Brennstoffes genauer zu berechnen. Da die Daten zum Vergleich der Ergebnisse verwendet wurden, und somit offensichtlich vorliegen, bleibt die Frage, ob die Art des Programmaufbaus dieses grundsätzlich zulässt. Aus der näheren Beschreibung der Simulationsumgebung zu einem früheren Zeitpunkt in dieser Arbeit geht hervor, dass mit IPSEpro Dynamics ein gleichungsbasiertes Programm vorliegt. Die Richtung der Berechnung, ob nun von der Aufgabe des Brennstoffs zur Zusammensetzung des Rauchgases oder umgekehrt, stellt somit an sich kein Problem dar.

Jedoch konvergierte die Rückwärtsrechnung von der Vorgabe der Gaszusammensetzung zur Berechnung der Brennstoffzusammensetzung nicht.

Daraufhin wurde bei einem neuen Versuch die in der Nachbrennkammer zugegebene Wassermenge als Freiheitsgrad gesetzt, und der Wassergehalt im Rauchgas fixiert. Dieser Durchgang konnte zwar gelöst werden, jedoch ergaben sich deutlich andere

Wassermengen als zuvor eingestellt waren. Die grundsätzliche Machbarkeit dieser Rückwärtsrechnung konnte damit aber nachgewiesen werden. Bei erneutem Ausführen des ersten Versuches und einer näheren Betrachtung der bis zum Zeitpunkt der Fehlermeldung aufgezeichneten Ergebnisse stellte sich heraus, dass die Berechnungen divergieren. In den Abbildungen 47 und 48 ist dies dargestellt. Zu sehen ist dabei auf der Y-Achse der Anteil von Kohlenstoff und Wasserstoff im Brennstoff über der Zeit auf der X-Achse in Sekunden. Da dies relative Anteile sind, sollten sich die Werte auf beiden Y-Achsen zwischen 0 und 1 bewegen. Der C-Anteil steigt jedoch auf über 6 500 000 % während der H-Anteil auf unter - 6 500 000 % fällt. Somit scheint, dass sich zwischen diesen vom Programm frei wählbaren Werten sehr wohl ein Zusammenhang ergibt, aber der Solver scheint nicht zu einer Lösung zu kommen.

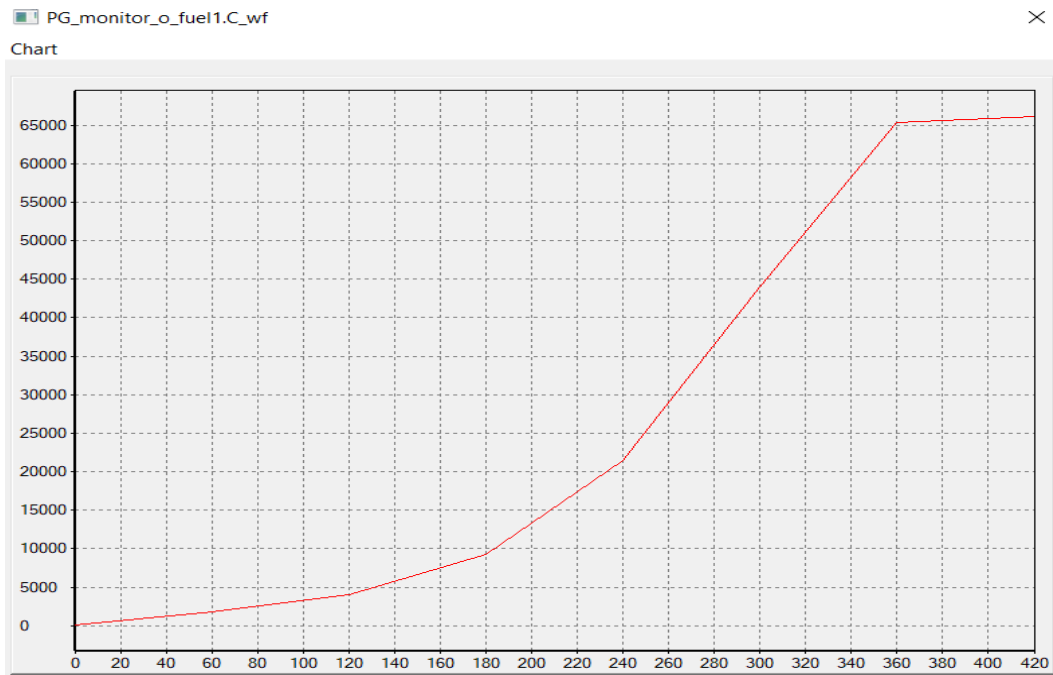


Abbildung 47: Ergebnisse Berechnung Kohlenstoffanteil HEL-1

Als mögliche Ursachen kommen mehrere Faktoren in Frage, die in Zusammenhang mit den eingesetzten Daten stehen. Diese sind, wie bereits erwähnt, reale Messdaten. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass der Solver die Parameter, die als Freiheitsgrade definiert wurden, nur in einem bestimmten Bereich anpassen kann, um Messtoleranzen auszugleichen. Dadurch stellt sich die Frage, ob der Solver eine Lösung generieren kann, bei der die eingesetzten Parameter sich innerhalb der zulässigen Bereiche bewegen. Dies ist grundsätzlich der Fall. Begründet wird dies damit, dass im Rahmen der Fehlersuche auch Testläufe durchgeführt wurden mit jenen Zahlen, die der Solver zuvor selbst als Ergebnisse berechnet hat. Ein Unsicherheitsfaktor bleibt in diesem Fall allerdings die Genauigkeit der Zahlen, da auch der Solver als Ergebnisse zum Teil gerundete Werte ausgibt.

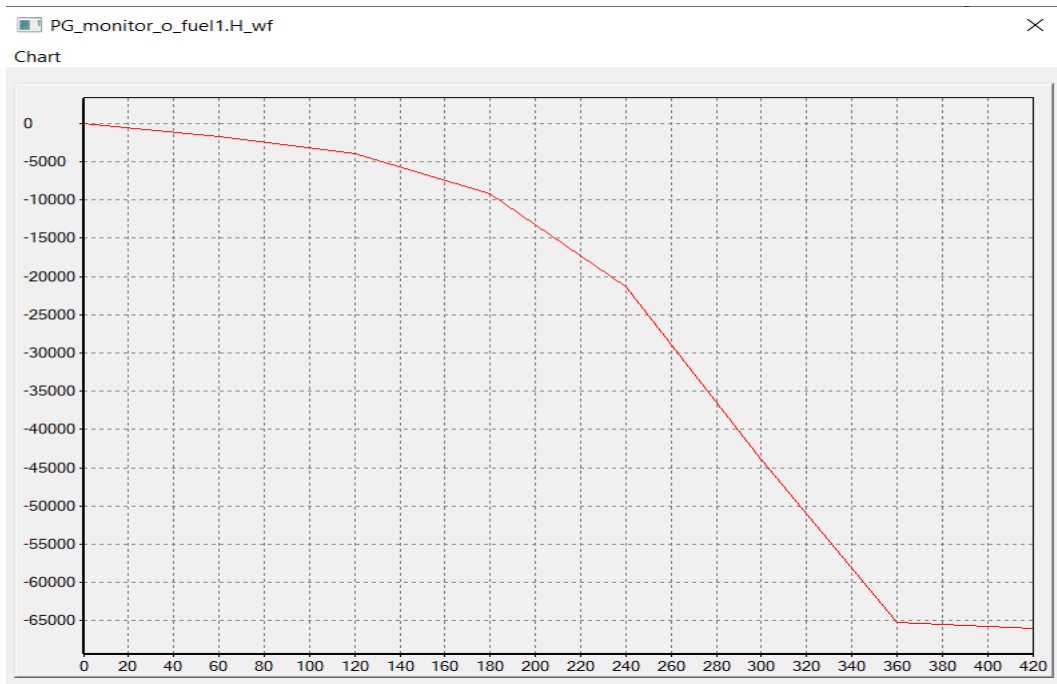


Abbildung 48: Ergebnisse Berechnung Wasserstoffanteil HEL-1

Selbst für den Fall, dass das vorige Problem gelöst werden kann, bleibt im Bezug auf die Verwendung von Originaldaten ein weiterer Unsicherheitsfaktor, nämlich potenzielle Messfehler. Auch stellt sich die Frage, ob ausgeschlossen werden kann, dass durch Messfehler zu einem beliebigen Zeitpunkt Zustände gemessen werden, die sich so niemals ereignet haben. Da dies vor allem in Extremsituationen zum Beispiel bei Temperaturspitzen oder bei Betriebszuständen am Rande der Einsatzgrenzen des Drehrohrofens durchaus eine mögliche Option darstellt, ist also auch diese Problematik zu berücksichtigen. Dies könnte in weiterer Folge schließlich dazu führen, dass der Solver versucht, Betriebszustände zu errechnen, die sich weder so ereignet haben noch in der Form zwingend möglich sein müssen.

Daraus ergibt sich der folgende logische Schluss: Ein Hinzufügen zusätzlicher Freiheitsgrade beispielsweise in Form von frei vom Solver bestimmbarer Falschlufmengen oder zusätzlicher Wasserströme mit denen eventuell kritische Zeitpunkte abgeschwächt oder bestimmte Parameter ausgeglichen werden können, war notwendig. Doch auch dies führte leider zu keinem Fortschritt bei der Berechnung der Brennstoffzusammensetzung.

Der Versuch, die Zusammensetzung des Brennstoffes auf direktem Wege zu berechnen, ist also gescheitert. Eine Alternative stellt das iterative manuelle Anpassen der angenommenen Brennstoffzusammensetzung mit anschließender Begutachtung der Ergebnisse dar. Da eine automatisierte Synchronisation zwischen den zur Berechnung und zur Auswertung benutzten Programmen jedoch nicht Teil dieser Arbeit ist, stellt dies keine effiziente Möglichkeit dar. Die manuelle Anpassung wurde zuvor beispielhaft dargestellt. Dies ist das Ergebnis von 7 manuellen Iterationsschleifen.

6.4 Optimierungsmöglichkeiten durch das digitale Modell

Da Müll beständig anfällt, ist auch notwendig, ihn kontinuierlich entsorgen zu können. Damit einhergehend ist bei einer möglichst gleichmäßigen Betriebsführung eine entsprechende Planbarkeit der Wärme- und Stromproduktion einer solchen Anlage gegeben. Doch nicht nur das reine Entsorgen von Abfällen spielt eine Rolle, sondern auch die Effizienz mit der dies geschieht. Schließlich kann nicht ausschließlich Müll verbrannt werden.

Während die ersten beiden Forschungsfragen bereits zuvor im Rahmen dieser Arbeit beantwortet wurden, so werden anschließend die beiden noch offenen Fragen genauer behandelt.

Welche Einsparungen hinsichtlich CO₂-Emissionen lassen sich durch den Einsatz des digitalen Zwillings erzielen?

In diesem Zusammenhang wird davon gesprochen, die Effizienz der Sondermüllverbrennungsanlage zu erhöhen, und zwar im Bezug auf den relativen CO₂-Ausstoß pro abgegebener Energieeinheit in Form von Elektrizität oder Wärme. Würden selbst nur die chemisch und biologisch ungefährlichen Abfälle einfach deponiert werden, würden ebenfalls klimaschädliche Emissionen freigesetzt. Dies jedoch ohne energetischen Output zu generieren. Deswegen werden die Möglichkeiten zur Erhöhung der Nutzenergie bei ähnlichen Kohlendioxidemissionen näher betrachtet.

- Luftüberschuss

Da im laufenden Betrieb bei der Zugabe von Brennstoffen mit großteils ungewisser Zusammensetzung nicht ausgeschlossen werden kann, dass sich darunter mitunter auch auffällig gut brennbare Fraktionen befinden, muss diese Option auch berücksichtigt werden. Im Extremfall könnte die Zugabe eines solchen Materials dazu führen, dass für eine vollständige Verbrennung schlicht zu wenig Sauerstoff im Brennraum vorhanden ist. Die Folge könnten eine unvollständige Verbrennung oder sehr große Temperaturspitzen sein. Während sich Temperaturspitzen vor allem auf die Lebensdauer der Ausmauerung im Inneren des Ofens auswirken, so führen beide möglichen Folgen zu einem potentiellen Überschreiten der zulässigen Abgasgrenzwerte. Beispielsweise könnten erhöhte Stickoxid-Emissionen aufgrund der leichter möglichen Bildung von thermischem NO_x bei überhöhten Temperaturen auftreten. Eine unvollständige Verbrennung führt darüber hinaus zu einer möglichen Freisetzung von CO, was wiederum einem Energieverlust gleichzusetzen ist. Um solche Szenarien zumindest eingrenzen zu können, ist eine gängige Methode, einen erhöhten Luftüberschuss einzusetzen. Während bei Verbrennungen aller Art, also auch bei Holzfeuerungen, grundsätzlich ein Luftüberschuss, dessen Ausmaß vom Feuerungstyp abhängt, vorgesehen ist, um eine ordentliche Verbrennung zu gewährleisten, so wird in diesem Fall aktiv ein deutlich größerer Sauerstoffpuffer gebildet. Dazu wird absichtlich ein deutlicher Luftüberschuss in die Brennkammer eingebracht. Dadurch entsteht jedoch bei derselben Menge Brennstoff ein größerer Abgasmassenstrom. Dieser wiederum ist kühler, da die thermische Leistung relativ zur Verbrennungsluft abnimmt. Ein kühleres Gas hat

allerdings den Nachteil, dass weniger Energie abgegeben werden kann um damit beispielsweise Dampf zu erzeugen, da dieser eine gewisse Mindesttemperatur haben muss, um sinnvoll in einer Dampfturbine zur Stromerzeugung eingesetzt werden zu können. Könnte zuverlässig verhindert werden, dass solche Betriebszustände mit einer überhöhten thermischen Leistung auftreten, so könnte auch der notwendige Sauerstoffpolster durch einen geringeren Luftüberschuss verringert werden. Weniger Luftüberschuss würde also zu höheren Temperaturen bei gleichem Brennstoffeinsatz und somit gleichen CO₂-Emissionen führen. Damit wiederum ließe sich in gewissem Maße mehr Nutzenergie bzw. Nutzenergie mit einem erhöhten Exergieanteil gewinnen. Somit wäre eine effizientere Betriebsführung möglich. Um dies erreichen zu können, ist eine verbesserte Kenntnis der Brennstoffbeschaffenheit notwendig.

- Verbesserte Kenntnis der Brennstoffbeschaffenheit
Genau an dieser Stelle setzt der Gedanke an, mithilfe eines digitalen Zwillings und laufender Prozess- bzw. Betriebsbegleitung einen großen Datensatz zu generieren, mithilfe dessen sich eine möglichst zuverlässige Brennstoffzusammensetzung anhand verschiedener Parameter wie etwa dem Lieferanten des Abfalls bestimmen lässt. Der im Rahmen dieser Arbeit betrachtete digitale Zwilling soll eine mögliche Ausgangsbasis für weitere Entwicklungen in dieser Richtung darstellen.
- Reduzierter Einsatz von Brennstoff zur Stützfeuerung
Eine weiteres Potential zur Steigerung der Effizienz ergibt sich, wenn folgender Punkt betrachtet wird: Eine verbesserte Kenntnis der Brennstoffzusammensetzung könnte gezielt ein gemeinsames Einbringen von Fraktionen mit besserem und schlechterem Heizwert ermöglichen. Die Folge wäre ein verringerter Einsatz von bekanntem Brennstoff wie etwa Heizöl extraleicht oder Lösungsmittel zur Stützfeuerung. Könnte die Zugabe von Brennstoffen wie etwa Heizöl, die durchaus auch anderweitig eingesetzt werden können, reduziert werden, indem als Stützbrennstoff Müllfraktionen mit bekanntem gutem Heizwert eingebracht werden, um schlecht brennbare aber entsorgungspflichtige Stoffe thermisch zu verwerten, so ließe sich die CO₂-Effizienz ebenfalls verbessern. Auch könnte damit ausgeschlossen werden, dass unbekanntes Material mit überraschend gutem Heizwert zur Sicherheit zusätzlich mit extra Brennstoffen gemeinsam verfeuert wird.

Welche digitalen Methoden können für die Anlagenoptimierung und Ressourcenplanung in Form der zustandsorientierten Anlagensimulation auf Basis des digitalen Zwillings angewendet werden?

Im Rahmen der Optimierung des Verbrennungsprozesses ergeben sich weitere Hebel, die eine Verbesserung der Effizienz der Gesamtanlage ermöglichen:

- Verlängerte Reisezeit

Angesprochen wurden bereits die negativen Auswirkungen von extremen thermischen Lastspitzen im Inneren des Drehrohrofens auf die Lebensdauer der Ausmauerung. Eine Reduktion dieser Belastungen hätte ein besseres Verhältnis von Einsatzzeit zu revisionsbedingtem Stillstand zur Folge. Dadurch würden sich über die gesamte Lebenszeit der Anlage mehr Mülldurchsatz sowie gewonnene Nutzenergie ergeben, da die Lebensdauer im Allgemeinen nicht ausschließlich durch die Anzahl der Revisionen bestimmt wird. Dies könnte sich somit positiv auf den Erntefaktor auswirken. Ganz abgesehen davon, dass der Drehrohrofen für jede Revision abgestellt und anschließend mit reinem Heizöl-Einsatz langsam wieder hochgefahren werden muss. Auch dieser Brennstoffeinsatz könnte dadurch reduziert werden. Darüber hinaus ist eine gleichmäßige Betriebsführung auch für die in Rauchgasrichtung nachgeschalteten Einrichtungen wie etwa den Dampfkessel vorteilhaft. Dadurch könnten auch bei diesen Aggregaten Wartungsarbeiten vermieden, und somit Warmhaltebetriebe des Drehrohrofens mit dem Einsatz von zum Beispiel HEL reduziert werden.

- Optimierte Planung
Eine bessere Kenntnis der zu erwartenden Eigenschaften der eingesetzten Brennstoffe kann darüber hinaus zusätzliche Optionen zur Planung des Betriebs ergeben, wie etwa früheres Reagieren auf bestimmte Lastfälle oder zur Neigehende Stütz- und Ersatzbrennstoffe. Eine homogener laufender Betrieb würde auch die Planung von Revisionen der übrigen Anlagenteile über den Drehrohrofen hinaus ermöglichen, zusätzlich zur effizienteren Auslastung im regulären Betrieb.
- Optimierung des Abfallmanagements
Bei einer optimierten Betriebsführung besteht durch das Vorhandensein eines kontinuierlichen Brennstoffumsatzes die Möglichkeit das Abfallmanagement zu verbessern. Konkret liegt dabei eine optimierte Lagerhaltung vor, da einerseits der verfügbare Platz effizienter genutzt werden, als auch die Anlieferung des Mülls durch die Lieferanten besser abgestimmt werden kann.

7 Conclusio

Abschließend werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse zusammengefasst und potentielle zukünftige Optimierungen angeführt.

7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

- Gleiche Zustände, unterschiedliche Ergebnisse
Als Grundlage für alle Simulationen ist eine solide Datenlage unbedingt notwendig. Bereits bei der Parametrierung in dieser Arbeit ist aufgefallen, dass bei einer Stichprobe von drei Betriebszuständen mit reinem Heizöl extraleicht bereits zwei in sich widersprüchliche Verhaltensweisen des realen Objekts erkennbar waren. Gerade in solchen Situationen wäre vorteilhaft, mehr Daten zur

Verfügung zu haben. Damit ist nicht nur gemeint, mehr Zeiträume mit denselben Sensordaten zu bekommen, sondern auch zusätzliche Sensorwerte in die Untersuchung mit aufzunehmen. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit, die betrieblichen Ursachen für die Unterschiede in vermeintlich gleichen Betriebszuständen zu erkennen. Doch gerade bei Anlagen in derselben Größenkategorie wie die hier betrachtete reale Anlage kann der Prozess mitunter äußerst kompliziert sein, diese Fülle an Daten zu bekommen. Vor allem dann, wenn die Anlage über lange Zeit hinweg immer wieder abgeändert oder umgebaut wurde. Noch dazu, wenn gewisse Klappen oder Regler mitunter immer noch manuell, ohne elektronische Aufzeichnung oder Überwachung bedient werden. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist die Aufzeichnung einer solchen Fülle an Daten auch nicht immer sinnvoll. Somit könnte hier eine Auswertung von einer deutlich größeren Anzahl an Datensätzen zeigen, ob für eine bessere Prognose wirklich all diese Zusatzinformationen auch tatsächlich notwendig sind, oder ob bei den hier betrachteten drei Zeiträumen zufällig drei auffällige Auszüge vorliegen.

- Zeitliches Verhalten dynamischer Modelle

Doch auch wenn im vorherigen Punkt unterschiedliche Beobachtungen bei einzelnen Sensoren angesprochen wurden, so lässt sich zusammenfassend mit den vorliegenden Daten sagen, dass durchaus möglich ist, damit das dynamische Verhalten in Hinsicht auf Reaktionszeiten deutlich besser zu berechnen, als die Diskrepanz zwischen gemessenen Sensorwerten und berechneten Solverwerten hätte vermuten lassen. Während das zeitliche Verhalten nämlich unter Vorbehalt der konstant festgelegten Verweilzeit durchaus brauchbare Ergebnisse lieferte, wichen die Daten beim direkten Vergleich der Werte mitunter beträchtlich voneinander ab. Weiters sind Messfehler durch nicht periodisch kalibrierte Messgeräte nicht auszuschließen.

- Bessere Brennstoffkenntnisse, bessere Auslastung

Wie zuvor ausführlich beschrieben, muss bei sehr vielen unbekanntem Variablen und bindenden Vorgaben wie etwa Emissionsgrenzwerten immer ein nicht vernachlässigbarer Sicherheitspolster vorgehalten werden. Dies führt allerdings dazu, dass die Anlage nicht an ihrer Auslastungsgrenze gefahren werden kann, was einen effizienteren Einsatz und eine erhöhte Kosteneffizienz bedeuten würde. Eine Verbesserung der Brennstoffkenntnisse könnte das Leistungsspektrum und den Erntefaktor der bereits existierenden Anlage bei gleichen Wartungsintervallen deutlich erhöhen.

7.2 Verbesserungsmöglichkeiten für zukünftige Modelle

- Masse für den Drehrohrofen

Das aktuell eingesetzte dynamische Modell des Drehrohrofens verfügt selbst über keine Masse. Die in der Praxis allerdings nicht unmerkliche Wirkung im Hinblick

auf Dämpfung von Temperatursprüngen durch einzelne Ereignisse bei der Aufgabe verschiedener organischer Materialien durch diese Speichermasse ist somit nicht vorhanden. Vor Allem in Bezug auf negative Temperatursprünge im Rauchgas ist das von Bedeutung. Dies ist bei der Auswertung der Ergebnisse bei einzelnen Temperaturen sehr gut erkennbar.

- Wärmeverlust für Dampferzeuger und Economiser
Zurzeit werden diese beiden Teile als adiabat zur Umgebung betrachtet und auch berechnet. Dies ist aber aufgrund der durchaus warmen Außenwände, wie sie bei einem Naturumlaufdampferzeuger vorliegen, und der Größe der Außenhülle, die sich vor allem durch die Abmessungen des Economisers ergeben, bei zukünftigen Modellen anzupassen.
- Dynamisches Speichermodell für Asche
Um im Gegensatz zum momentanen Ansatz in Zukunft auch die Auswirkungen der als nicht brennbar betrachteten Anteile der Brennstoffe wie etwa Asche oder metallische Fässer besser zeitlich akkurat abbilden zu können, muss die Asche nicht wie aktuell durchgeschleust, sondern ein eigenes Verweilzeitmodell hierfür entwickelt werden. Dies kann sich auch als positiver Faktor in der Wasserbilanz im Rauchgas auswirken, da dann auch die vom Nassentschlacker freigesetzten Dampfmengen besser darstellbar sind.
- Wärmeverlust für Drehrohrofen detailliert berechnen
Anstatt wie bisher den Wärmeverlust des Drehrohres als prozentuellen Anteil an seiner gesamten thermischen Leistung abzuschätzen, kann auch zielführend sein, die Wärmeverluste durch Strahlung und Konvektion an die Umgebung zu errechnen. Hierfür wird allerdings notwendig sein, die genauen Oberflächentemperaturen des Mantels auf der Außenseite des Drehrohrofens zu kennen, was für sich wiederum eine möglichst genaue Berechnung der Temperaturen auf der Innenseite in Kombination mit der Wärmeleitung durch den Mantel voraussetzt.
- Drehrohrofen mit Stirnwandkühlung ausstatten
Die reale Instanz des Drehrohrofens ist zur Verringerung der Temperaturen an den Aufgabemöglichkeiten an der Stirnwand mit einer Stirnwandkühlung versehen. Die dadurch abgeführte Wärmemenge sollte zusätzlich zur Gesamtenergiebilanz um das Ofenrohr hinzugefügt werden.
- Allgemeine Undichtigkeiten im Gesamtsystem weiter berücksichtigen
Da auf externen Messungen beruhende Daten nahelegen, dass im gesamten System weitere 20% an Undichtigkeiten vorhanden sind, kann sich eine gestaffelte Einbringung dieser Verluste entlang der Rauchgasstrecke positiv auf die Abweichungen der Rechenergebnisse von den an bestimmten Punkten gemessenen Realwerten auswirken.
- Optimierung der Berechnung des Wasseranteils im Rauchgas

Bei der Parametrierung ist auffällig, dass die gemessenen Originaldaten des Wasseranteils im Rauchgas sehr stark von den berechneten Werten abweichen. Ob dies alleine auf einen Messfehler oder auch auf einen Modellfehler zurückzuführen ist, sollte näher überprüft werden.

Die oberhalb angesprochenen Verbesserungsmöglichkeiten und in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse sollen als Hinweise für zukünftige Modellierungsansätze dienen, um stetig weiterentwickelte Modelle zur Anwendung bringen zu können. Diese müssen sich nicht zwingend auf die Anwendung in Drehrohröfen beschränken sondern können für bestimmte Modelle auch als allgemeine Hinweise verstanden werden. Darunter fällt beispielsweise die Möglichkeit, Einheiten wie etwa die Wärmetauscher mit einem Wärmeverlust an die Umgebung zu modellieren.

Abbildungsverzeichnis

1	Verwertung und Beseitigung von Abfällen 2019 ohne Aushubmaterial . . .	3
2	Abgasgrenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen gemäß Abfallverbrennungsverordnung (AVV)	5
3	Schematische Darstellung eines Rückschubrosts mit Gegenstromfeuerung	8
4	Schematische Darstellung einer Wirbelschichtfeuerung	10
5	Schematische Darstellung eines Drehrohrofens mit den Reaktionsbereichen	11
6	Grundfließbild der Sondermüllverbrennungsanlage	17
7	Schema des Dampfkessels inklusive Subeinheiten	18
8	Schema des Elektrofilters	20
9	Schema des Gaswäschers	21
10	Schema des Aktivkohlefilters	21
11	Schema des Wärmeverschiebesystems	22
12	Visualisierung des 5-D-Modells	24
13	Integrationslevel digitaler Zwillinge	25
14	Einsatzmöglichkeiten intelligenter Steuerung	26
15	Setzen einiger Eingabewerte eines organischen Stoffstroms	33
16	Time Series Table „burner_HEL“	34
17	Einstellungen einer statischen Variable die dynamisch verwendet wird . .	35
18	Beispiel eines dynamischen Modells	36
19	5-D-Modell des digitalen Zwillings	40
20	Fließbild des vereinfachten Gesamtmodells der physischen Anlage	44
21	Abbildung eines Einschwingvorganges am Beispiel des O ₂ -Gehalts im Rauchgas	45
22	H ₂ O-Anteil im Rauchgas HEL-Durchlauf 1	46
23	H ₂ O-Anteil im Rauchgas HEL-Durchlauf 2	47
24	H ₂ O-Anteil im Rauchgas HEL-Durchlauf 3	47
25	Produzierte Frischdampfmenge HEL-Durchlauf 1	48
26	Produzierte Frischdampfmenge HEL-Durchlauf 2	49
27	Produzierte Frischdampfmenge HEL-Durchlauf 3	49
28	Sauerstoffanteil im Rauchgas HEL-Durchlauf 1	51
29	Sauerstoffanteil im Rauchgas HEL-Durchlauf 2	51
30	Sauerstoffanteil im Rauchgas HEL-Durchlauf 3	52
31	Visualisierung der Energieströme im Drehrohrofen mit Spitalmüll	58
32	Visualisierung der Energieströme im Warmhaltebetrieb mit HEL	59
33	Sauerstoffanteil im Rauchgas; Spitalmüll	60
34	Kohlenstoffdioxidanteil im Rauchgas; Spitalmüll	61
35	Wasseranteil im Rauchgas; Spitalmüll	61
36	Produzierte Frischdampfmenge; Spitalmüll	62
37	Rauchgastemperatur nach Economiser; Spitalmüll	63
38	Rauchgastemperatur vor Dampferzeuger; Spitalmüll	64
39	Speisewassertemperatur nach Economiser; Spitalmüll	65
40	Sauerstoffanteil im Rauchgas; Spitalmüll; Brennstoffzusammensetzung 2	66

41	Kohlendioxidanteil im Rauchgas; Spitalmüll; Brennstoffzusammensetzung 2	67
42	Wasseranteil im Rauchgas; Spitalmüll; Brennstoffzusammensetzung 2	67
43	Produzierte Frischdampfmenge; Spitalmüll; Brennstoffzusammensetzung 2	68
44	Temperatur Rauchgas nach Economiser; Spitalmüll; Brennstoffzusammensetzung 2	69
45	Temperatur Rauchgas vor Dampferzeuger; Spitalmüll; Brennstoffzusammensetzung 2	69
46	Temperatur Speisewasser nach Economiser; Spitalmüll; Brennstoffzusammensetzung 2	70
47	Ergebnisse Berechnung Kohlenstoffanteil HEL-1	72
48	Ergebnisse Berechnung Wasserstoffanteil HEL-1	73

Tabellenverzeichnis

1	Einsatzmöglichkeiten verschiedener Ofenkonstruktionen im Bezug auf unterschiedliche Abfallarten	7
2	Simulationsprogramme zur Bilanzierung von Anlagen in stationären Betriebszuständen und Programmerkmale	31
3	Simulationsprogramme zur Bilanzierung von Anlagen in instationären Betriebszuständen und Programmerkmale	31
4	Auflistung der einzelnen Fehler bei der Parametrierung des Modells und Gewichtung der einzelnen Vergleichsparameter	50
5	Auflistung der Einheiten der Originaldaten sowie allfällige Umrechnungen auf die vom Modell verwendeten Einheiten	55
6	Fortsetzung: Auflistung der Einheiten der Originaldaten sowie allfällige Umrechnungen auf die vom Modell verwendeten Einheiten	56
7	Fortsetzung: Auflistung der Einheiten der Originaldaten sowie allfällige Umrechnungen auf die vom Modell verwendeten Einheiten	57
8	Auflistung der einzelnen Fehler bei der Berechnung des Betriebszeitraumes mit Spitalmüll	71

Literaturverzeichnis

- [1] Lukas Jagersberger. Analyse und Modellierung eines Drehrohren-Prozesses zur Verbrennung von Sonderabfällen, 2019.
- [2] Energie Mobilität Innovation und Technologie Bundesministerium Klimaschutz Umwelt. Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich - Statusbericht 2021, 2021.
- [3] Peter Kurth, Anno Oexle und Martin Faulstich. Praxishandbuch der Kreislauf-und Rohstoffwirtschaft, 2018.
- [4] Umwelt und Wasserwirtschaft Bundesministerium für Land-und Forstwirtschaft. Thermische Abfallbehandlung in Österreich, 2009.
- [5] Ulrich Förstner und Stephan Köster. Umweltschutztechnik, 2012.
- [6] Europäisches Parlament und Rat. Richtlinie 2008/98/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, 2008.
- [7] U. Richers. Thermische Behandlung von Abfällen in Drehrohren. Eine Darstellung anhand der Literatur, 1995.
- [8] M. Hammerschmid. Entwicklung der Submodelle, 2021.
- [9] Helga Stoiber Birgit Walter Siegmund Böhmer Ingo Kügler. Umweltbundesamt ABFALLVERBRENNUNG IN ÖSTERREICH Statusbericht 2006. *REPORT REP-0113*, 2007.
- [10] Qinglin Qi und Fei Tao. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. *Ieee Access*, 6:3585–3593, 2018.
- [11] Oliver D Doleski. Realisierung Utility 4.0 Band 2.
- [12] F. Tao, H. Zhang, A. Liu und A. Y. C. Nee. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4):2405–2415, 2019. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.
- [13] P Aivaliotis, K Georgoulas, Z Arkouli und S Makris. Methodology for enabling digital twin using advanced physics-based modelling in predictive maintenance. *Procedia Cirp*, 81:417–422, 2019.
- [14] Ray Y. Zhong Yuqian Lu Shohin Aheleroff Xun Xu. Digital Twin as a Service (DTaaS) in Industry 4.0: An Architecture Reference Model. *Advanced Engineering Informatics*, 47:1–15, 2021.
- [15] Sophie Knöttner Benedikt Leitner Dominik Pernsteiner Leopold Prendl Christoph Sejkora Gernot Steindl Anna Traupmann René Hofmann Verena Halmschlager. Digitalization in Industry - an Austrian Perspective, 2020.

- [16] Martin Hammerschmid, Daniel Cenk Rosenfeld, Alexander Bartik, Florian Benedikt, Josef Fuchs und Stefan Müller. Methodology for the Development of Virtual Representations within the Process Development Framework of Energy Plants: From Digital Model to Digital Predictive Twin –A Review. *Energies*, 16(6), 2023. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en16062641. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/6/2641>.
- [17] Franz Weber. Sicherheitsaspekte bei der Implementierung von digitalen Zwillingen. *nachhaltige technologien*, 04,2020:15–17, 2020.
- [18] Stefan Rönsch. Anlagenbilanzierung in der Energietechnik, 2015.
- [19] SimTech Simulation Technology. Publications. URL: <http://www.simtechnology.com/CMS/index.php/ipsepro/publications>. (accessed: 10.4.2021).
- [20] M. Hammerschmid, C. Aguiari, F. Kirnbauer und et al. Thermal Twin 4.0: Digital Support Tool for Optimizing Hazardous Waste Rotary Kiln Incineration Plants. *Waste Biomass Valor*, 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s12649-022-02028-w>.