

# Schlussbericht vom 30.11.2023

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 21145 BR

## Thema

Modellgestützte Bestimmung der fluktuierenden Abfallzusammensetzung auf dem Rost durch Rohgasmessungen (kurz: – MOAB –)

## Berichtszeitraum

01.10.2020 – 31.08.2023

## Forschungsvereinigung

DECHEMA Deutsche Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

## Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität Dresden - Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik Professur für Energieverfahrenstechnik - FS 1

Technische Universität Clausthal - Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum - FS 2

Gefördert durch:

## Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	4
2	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung .....	5
3	Lösungsansatz .....	5
3.1	Methodische Vorgehensweise.....	5
3.2	Projektkoordination und Qualitätssicherung .....	6
4	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse .....	7
4.1	Brennstoffauswahl.....	7
4.2	Untersuchungen an der Rostfeuerungsanlagen des CUTEC .....	8
4.2.1	Vorgehen zur experimentellen Begleitung des Projektes.....	8
4.2.2	Beschreibung der Technikumsanlage des CUTEC inkl. Messstellen .....	9
4.2.3	Versuchsdurchführung an der Technikumsanlage des CUTEC .....	13
4.2.4	Ergebnisse aus den Versuchen an der Technikumsanlage des CUTEC .....	21
4.2.5	Vergleich von Theorie und experimentellen Ergebnissen .....	28
4.2.6	Prüfung von Annahmen und Erfahrungswerten .....	41
4.2.7	Schlussfolgerungen für die modelltechnische Auswertung .....	47
4.3	Entwicklung des Modellierungswerkzeugs .....	48
4.3.1	Erweiterte Online-Bilanzierung .....	48
4.3.2	Numerisches Fraktionen-Modell.....	51
4.4	Modellvalidierung an der Pilotanlage.....	57
4.4.1	Stationärer Betrieb .....	57
4.4.2	Instationärer Betrieb .....	63
4.5	Modellapplikation an Anlagen des PA als Praxistest.....	69
4.5.1	Anbindung an das Prozessleitsystem und Visualisierung der Ergebnisse .....	69
4.5.2	Umsetzung des Berechnungswerkzeugs an großtechnischen Anlagen.....	70
4.5.3	Möglichkeiten zur automatisierten Prozesssteuerung.....	74
4.6	Abschließende Betrachtung .....	75
5	Verwendung der Zuwendungen.....	77
5.1	Forschungsstelle 1: EVT .....	77
5.2	Forschungsstelle 2: CUTEC .....	77
6	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten.....	77
7	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft .....	78
7.1	Durchgeführte Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft .....	78
7.2	Geplante Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft .....	79
7.3	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts .....	79
8	Nutzen der Ergebnisse für KMUs .....	79
9	Abbildungsverzeichnis.....	81

10	Tabellenverzeichnis .....	84
11	Literaturverzeichnis.....	85
12	Anhang .....	87

## 1 Zusammenfassung

Hausmüll weist eine inhomogene und stark schwankende Zusammensetzung auf. Die optimalen Anlageneinstellungen bei der thermischen Verwertung ändern sich deshalb ständig. Bisher konnte darauf nur zeitlich versetzt und erfahrungsbasiert reagiert werden, weil die genaue Zusammensetzung des aktuell verbrennenden Abfalls unbekannt war.

Um den Betreibern von Abfallverbrennungsanlagen eine datenbasierte Entscheidungshilfe zu geben, wird ein Berechnungswerkzeug benötigt, das die betriebsbegleitende Ermittlung der Brennstoffzusammensetzung basierend auf wiederkehrenden Fraktionen im Abfall ermöglicht.

Ziel des Forschungsvorhabens war es deshalb, ein schnelles Berechnungswerkzeug zur Bestimmung der Abfallzusammensetzung auf dem Rost zu entwickeln. Hierzu wurden zwei Berechnungsmodelle, die erweiterte Online-Bilanzierung und das Numerische Fraktionenmodell, erstellt und validiert.

Im ersten Schritt werden Stoff-, Massen- und Energiebilanzen genutzt, um die Zusammensetzung des Abfalls aus Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Wasser und Asche sowie den unteren Heizwert zu ermitteln. Anschließend wird aus diesen Daten die Fraktionszusammensetzung über eine Suche der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt.

An der Rostfeuerungsanlagenanlage des Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum (CUTEC) wurden Versuche mit synthetisch hergestellten Brennstoffmischungen durchgeführt. Die Anlageneinstellungen und Verbrennungsbedingungen wurden variiert sowie mit konstanten und zeitlich veränderten Brennstoffmischungen gearbeitet. Zur Überprüfung der Messunsicherheiten wurden die Versuche mittels eines ChemCAD-Modells bei vorgegebener Brennstoffzusammensetzung nachgerechnet.

Die Messergebnisse wurden von der Energieverfahrenstechnik der Technischen Universität Dresden (TUD-EVT) zur Validierung der Berechnungsmodelle genutzt. Für eine konstante Brennstoffzusammensetzung konnten gute Übereinstimmungen zwischen der eingesetzten und berechneten Brennstoffzusammensetzung erreicht werden. Veränderungen der Brennstoffzusammensetzung wurden ebenfalls detektiert.

Zum Abschluss des Forschungsvorhabens erfolgte die Praxiserprobung des entwickelten Berechnungswerkzeugs an einem Müllheizkraftwerk. Über einen Vergleich mit bekannten Abfalleigenschaften konnte die Plausibilität der Berechnungsergebnisse nachgewiesen werden.

Zusammenfassend kann daher festgestellt werden:

**Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.**

## **2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung**

Die Zusammensetzung eines Brennstoffes hat einen großen Einfluss auf die Verbrennungseigenschaften und optimalen Verbrennungsbedingungen. Durch die inhomogene und stark schwankende Zusammensetzung von Abfall ist bei der thermischen Verwertung eine ständige Veränderung der Anlageneinstellungen notwendig. Eine Anpassung ist jedoch immer erst nachträglich als Reaktion auf Abweichungen vom Idealzustand möglich.

Dies führt zu einer höheren Belastung der Gesamtanlage verbunden mit häufigerem Reparatur- und Instandhaltungsbedarf. Zudem werden Additive zur Schadstoffminderung häufig überdosiert zugegeben, um plötzlich auftretende Spitzen in der Schadstofffracht abzufangen.

Eine betriebsbegleitende Bestimmung der Zusammensetzung des verbrennenden Abfalls kann hier Abhilfe schaffen. Analysen der Abfallzusammensetzung waren bisher mit zeit- und kostenintensiven Sortieranalysen verbunden und konnten keine direkten Informationen für den Anlagenbetrieb liefern.

Vor diesem Hintergrund wird ein schnelles Berechnungswerkzeug benötigt, das die Abfallzusammensetzung betriebsbegleitend bestimmen und so notwendige Anpassungen in der Anlagensteuerung vorhersagen kann. Dabei soll nicht nur die Zusammensetzung aus den Hauptelementen Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff sowie Wasser und Asche erfolgen, sondern auch die Unterteilung des Abfalls in wiederkehrende Fraktionen. Diese können anschließend als Grundlage zur Ermittlung weiterer Abfalleigenschaften dienen.

## **3 Lösungsansatz**

### **3.1 Methodische Vorgehensweise**

Ausgehend von der beschriebenen Aufgaben- und Zielstellung wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

1. Versuchsvorbereitung
2. Online-Bilanzierungswerkzeug für Pilotanlage
3. Erstellung erweitertes Numerisches Fraktionen-Modell
4. Modellvalidierung bei stationärem Betrieb der Pilotanlage
5. Modellvalidierung bei instationärem Betrieb der Pilotanlage
6. Modellapplikation an Anlagen des PA
7. "Proof of Concept" – Praxistest

Zur Umsetzung wurde in Rahmen der Antragstellung eine Strukturierung der Projektbearbeitung in nachfolgend beschriebene Arbeitspakete (AP) vorgesehen.

#### Arbeitspaket 1:

Das AP umfasst die Vorbereitung der Validierungsversuche an der Rostfeuerungsversuchsanlage des CUTEK. Dies beinhaltet die Überarbeitung der Mess- und Prozessleittechnik, die Auswahl, Beschaffung und Analyse der Brennstofffraktionen sowie die Untersuchung des Doser- und Verweilzeitverhaltens der Anlage.

#### Arbeitspaket 2:

Ziel des AP ist die Erstellung des Online-Bilanzierungswerkzeugs für die Rostfeuerungs-pilotanlage auf Basis von Massen-, Stoff- und Energiebilanzen und die Anbindung an das Prozessleitsystem. Zusätzlich ist ein detailliertes Bilanzmodell zu erstellen dessen Ergebnisse mit den Messwerten aus den Versuchen an der Pilotanlage verglichen werden.

#### Arbeitspaket 3:

In diesem AP sollen die wiederkehrend im Abfall vorhandenen Fraktionen hinsichtlich ihrer typischen Zusammensetzung und ihrem anteiligen Vorkommen im Restabfall untersucht werden. Weiterhin sind die Zielfunktion und Nebenbedingungen zur Bestimmung der Fraktionszusammensetzung festzulegen und der Lösungsalgorithmus für das Numerische Fraktionenmodell zu entwickeln.

#### Arbeitspaket 4:

Teil des AP 4 ist die Durchführung von Versuchen mit unterschiedlichen stationären Brennstoffzusammensetzungen an der Pilotanlage des CUTEC. Anschließend können die Ergebnisse der Online-Bilanzierung und der erweiterten Prozessbilanz sowie des Fraktionenmodells und der realen Brennstoffzusammensetzung verglichen werden. Darauf basierend erfolgt die Präzisierung der Modelle.

#### Arbeitspaket 5:

Die Anwendbarkeit der Online-Bilanzierung und des Numerischen Fraktionenmodells im instationären Betrieb werden durch Versuche mit wechselnder Brennstoffzusammensetzung und variierenden Prozessbedingungen an der Pilotanlage des CUTEC untersucht. Die Modelle werden entsprechend der Ergebnisse präzisiert.

#### Arbeitspaket 6:

Zur Vorbereitung der Modellapplikation an Großanlagen werden im AP 6 die Schnittstellen zum Regelungssystem festgelegt und eine Nutzeroberfläche erstellt. Anschließend wird das Berechnungswerkzeug im Regelsystem von Beispielanlagen implementiert.

#### Arbeitspaket 7:

Im AP 7 findet der Praxistest der Modelle durch die Analyse an im PA vertretenen, kommerziellen Anlagen statt. Möglichkeiten zur automatisierten Prozesssteuerung werden entwickelt.

### **3.2 Projektkoordination und Qualitätssicherung**

Zur Abstimmung der Tätigkeiten der zwei Partner fungierte die TUD-EVT als Projektkoordinator. Verschiedene Maßnahmen zur Qualitätssicherung wurden eingeführt.

Eine wichtige Institution war der projektbegleitende Ausschuss (PA), der sich zu Projektbeginn, nach ca. zwölf Monaten Projektlaufzeit und zum Projektende, also dreimal, traf. Die Forschungsstellen berichteten über die jeweiligen Projektfortschritte, stellten diese zur Diskussion und holten Rückmeldungen ein, die in die weitere Projektbearbeitung einfließen. Die Einladung mit Aufstellung einer Tagesordnung erfolgte durch den Koordinator TUD-EVT. Dieser erstellte zu jeder Sitzung ein Protokoll, welches nach Abstimmung mit den Partnern an die PA-Mitglieder und Gäste versendet wurde. Vor den PA-Sitzungen trafen sich die Forschungsstellen digital oder in Präsenz zu Plenarsitzungen zwecks Vorbereitung.

Neben den Plenarsitzungen erfolgten in unregelmäßigen Abständen Arbeitssitzungen zwischen den Forschungsstellen. In diesen wurde das weitere Vorgehen im Projekt besprochen und konkrete Absprachen bezgl. der Umsetzung getroffen.

Veröffentlichungen wurden, soweit es inhaltlich möglich war, gemeinsam verfasst. Die jährlichen Zwischenberichte wurden ebenfalls zu einem gemeinsamen Exemplar abgestimmt.

## 4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

### 4.1 Brennstoffauswahl

Hinter dem Begriff der Abfallverbrennungsanlagen stecken verschiedene Apparattypen wie Rost, Wirbelschicht oder Drehrohr. Die Auswahl richtet sich nach dem jeweiligen Abfall am Standort. Dabei ist zwischen ziemlich genau spezifiziertem Abfall mit relativ konstanten Eigenschaften wie Klärschlamm, einigermaßen vorhersehbaren Eigenschaften wie Ersatzbrennstoffen und stark schwankenden Eigenschaften wie bei der Hausmüllverbrennung zu unterscheiden. Um einen maximalen Erkenntnisgewinn zu ermöglichen, nahm das Vorhaben MOAB Hausmüll als Basis der Brennstoffauswahl.

Seine qualitative und quantitative Zusammensetzung hängt von der Region, den anliefernden Institutionen und der Jahreszeit ab. Gesetzliche Rahmenbedingungen wie Einführung der Biotonne, Verdrängung von Plastik aus der Verbrennung oder das Phosphorrückgewinnungsgebot führen auch an jedem Standort zu Änderungen über die Jahre hinweg.

Für das Ziel in MOAB, nämlich die Erkennung des Brennbares auf dem Rost aus der Gaszusammensetzung, aber spielt die genaue Zusammensetzung des Abfalls keine Rolle. Als anerkannte Quelle zu wesentlichen Inhaltsstoffen und deren Menge wurde daher die Angabe des BMUV mit Stand vom 28.07.2020 gewählt [1] (s. Abbildung 1).

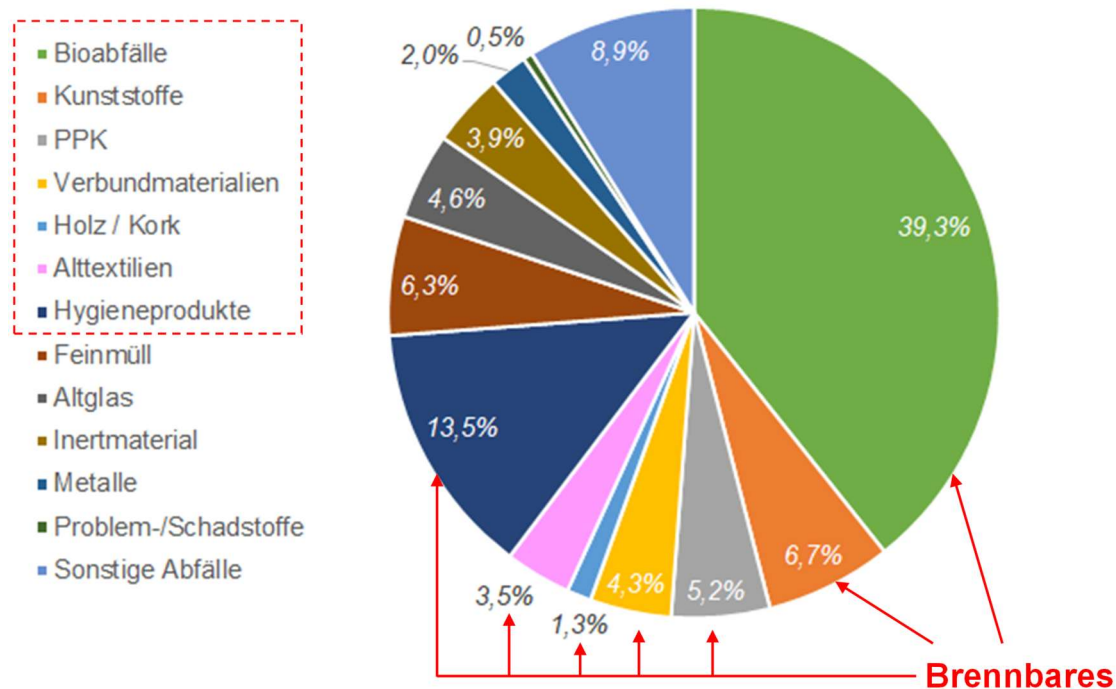


Abbildung 1: Zusammensetzung des deutschen Hausmülls, abgeleitet aus [1]; PPK: Papier/Pappe/Karton; Feinmüll: Kehricht, Asche etc.; Inertmaterial: Steine, Sand etc.; Problem- und Schadstoffe: Batterien, Lacke etc.; Sonstige Abfälle: Renovierungsabfälle etc.

Interessant im Vorhaben sind nur Stoffe, welche brennbar sind und Gas produzieren. Alttextilien wurden wegen abzusehender Schwierigkeiten im Eintragungssystem gestrichen; Hygieneprodukte ebenso wegen vermuteter Arbeitsschutzprobleme beim Umgang mit den benutzten Stoffen.

## 4.2 Untersuchungen an der Rostfeuerungsanlage des CUTEC

### 4.2.1 Vorgehen zur experimentellen Begleitung des Projektes

Hauptaufgabe des CUTEC war die experimentelle Begleitung der Entwicklung des Fraktionenmodells an der institutseigenen Technikums-Rostfeuerung. Dabei sind konkret zu nennen:

1. Messung der Konzentrationen an  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{O}_2$  im Abgas als Funktion der Brennstoffmischung und
2. Klärung der Frage: Wo bleibt der Rest?

Handwerklich waren diese grundsätzlichen Aufgaben gemäß der Tab. 4.1-1 der Vorhabensbeschreibung des Antrags umzusetzen in Einzelaufgaben wie:

- I. Anpassung des Prozessleitsystems zur Datenbereitstellung für EVT
- II. Brennstoffauswahl in Kooperation mit EVT und deren Beschaffung
- III. Versuchsplanung, Vorbereitungen, Nachbereitungen in den Arbeitspaketen (AP) 4 und 5
- IV. Verbrennungsversuche im stationären Betrieb (AP 4)
- V. Verbrennungsversuche im instationären Betrieb (AP 5)
- VI. Auswertung und Interpretation.

Den Lösungsweg stellt übersichtlich Abbildung 2 dar.

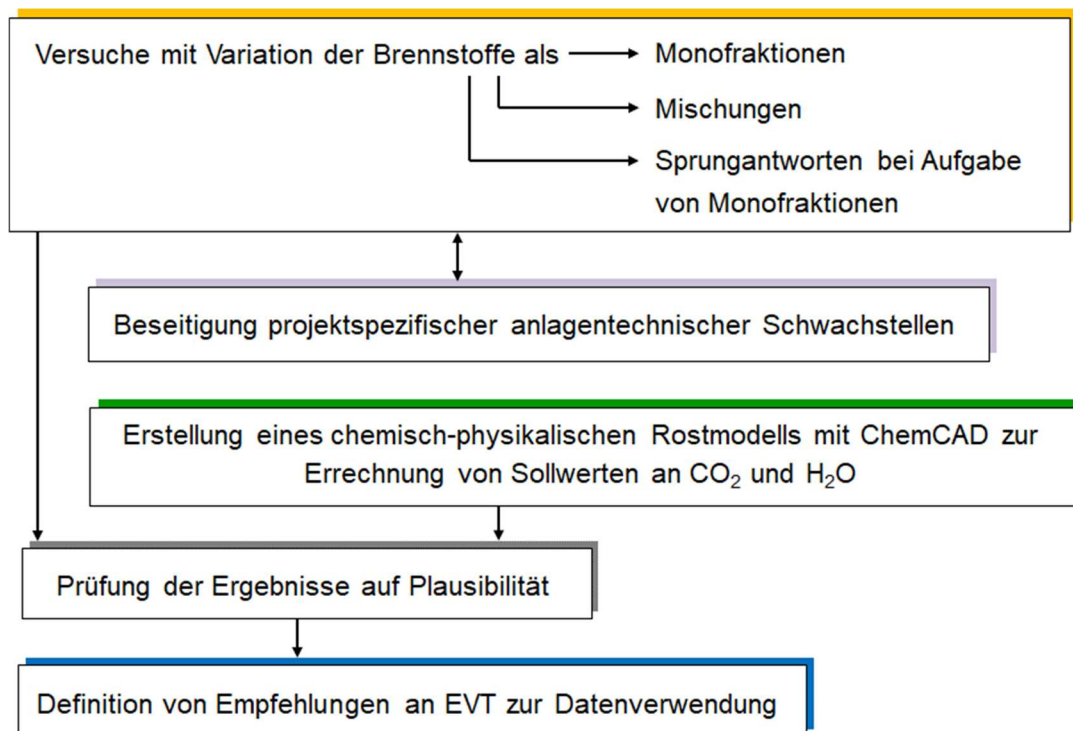


Abbildung 2: Lösungsweg zu den Aufgaben der CUTEC

Ausgangspunkt zu jedem gewählten Brennstoff sollten Versuche mit der Monofraktion sein, um die Gaszusammensetzung als Funktion des Stoffes und bei Variation von Verfahrensparametern zu ermitteln. Darauf erbauend hatten Versuche mit Mischungen zu erfolgen, um zu sehen, ob es zu Wechselwirkungen kommt, so dass die Gaszusammensetzung nicht gleich der errechneten Zusammensetzung der Einzelkomponenten ist.

Der vorgesehene „Instationäre Betrieb“ wurde dadurch realisiert, dass im stabilen Verbrennungszustand mit einer Mischung X innerhalb kurzer Zeit aus einem zweiten Bunker eine definierte Menge einer Monofraktion Y gegeben wurde. Die Gaszusammensetzung war dann als Sprungantwort über einen folgenden Zeitraum zu messen.

Bei den bekannten Parametern „Brennstoffeigenschaften“ und „Luftüberschuss“ kann die Gaszusammensetzung hinsichtlich Stoffen wie  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{HCl}$  aus einer Verbrennungsrechnung vorhergesagt werden. Die Theorie gibt dann die Sollwerte vor, welche zu messen sein sollten. Damit kann eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt werden.

Zu diesem Zwecke wurde ein chemisch-physikalisches Rostmodell entwickelt, welches vom Brennstoffeintrag bis zum Entschlacker und Ausgang Kessel reichte. Als Werkzeug diente das Programmpaket ChemCAD der Fa. Chemstations (Houston, USA). Mit den Ergebnissen wurden konkrete mögliche Fehler in der Messtechnik aufgezeigt, welche zu korrigieren waren.

Abschließend war es ferner möglich, aus der experimentellen Begleitforschung Empfehlungen an EVT zur Verbesserung des Berechnungswerkzeug aus Online-Bilanzierung und Fraktionenmodell zu geben.

#### **4.2.2 Beschreibung der Technikumsanlage des CUTEC inkl. Messstellen**

Zentraler Bestandteil des Vorhabens war die Rostfeuerungsanlage nach dem System MARTIN® (Rückschubrost) beim CUTEC-Forschungszentrum. Die Anlage besitzt eine Feuerungswärmeleistung von  $900 \text{ kW}_{\text{therm}}$ . Abhängig vom Heizwert ist mechanisch ein Massenstrom an Abfall bis zu  $300 \text{ kg/h}$  möglich. Die Anlagenhöhe beträgt  $9 \text{ m}$  bei einer Rostbreite von  $0,6 \text{ m}$ .

Die Abgasreinigung ist als trockenes Verfahren mit Eindüsung von Adsorbens und Betriebsweise des Gewebefilters als Filterschichtreaktor ausgelegt.

Abfälle können in Containern, in BigBags oder als große, verschnürte Pakete angeliefert werden. Durch einen Traktor mit Schaufel und Schwerlastwaagen ist die genaue Mischung verschiedener Fraktionen möglich. Das Produkt wird in  $7 \text{ m}^3$ -Mulden per Gabelstapler in die Technikumshalle gefahren und durch einen Kran auf den Bunker gesetzt. Geringe Brennstoffmengen lassen sich durch einen separaten, kleinen Bunker auf die Zuführschnecke addieren.

Es ist die interne Rezirkulation von Primärluft aus der letzten Rostzone möglich, welche über ein Heißluftgebläse abgesaugt und in die Sekundärluftdüsen wieder eingebracht wird. In MOAB eingesetzt aber wurde nur die äußere Rezirkulation von Abgas, welches nach dem Gewebefilter abgezogen und ebenfalls im Bereich der Sekundärluft eingedüst wird. Sekundärluftdüsen sind an der Vorder- und Rückwand auf zwei Ebenen aktiv. Insgesamt sind fünf Eindüshöhen möglich.

Ein Foto des Rostsystems zeigt Abbildung 3; ein Apparategrundfließbild mit den MOAB-relevanten Messstellen ist in Abbildung 4 dargestellt.



*Abbildung 3: Foto der CUTEC-Technikumsanlage*

Die Technikumsanlage wurde ursprünglich als Vergasungsanlage konzipiert. Daher ist die heute als „2. Zug“ bezeichnete mit Erdgas betriebene Nachbrennkammer gebaut worden. Später erfolgte der Aufsatz des 1. Zuges, um den normalen Verbrennungsbetrieb einer konventionellen Müllverbrennungsanlage nachbilden zu können.

Um bei Umbauarbeiten nicht die Vorschriften für druckführende Behälter einhalten zu müssen, erfolgt die Abkühlung des Rohgases über ein Gas-Luft-System. Nach dem 2. Zug ist ein Wärmeübertrager geschaltet, der den Kessel konventioneller Anlagen ersetzt. Eine verbrennungsnahe Wärmeauskopplung im 1. und 2. Zug erfolgt über wärmedurchlässig konstruierte Wände, die mittels durch einen Doppelmantel strömende Luft gekühlt werden.

Die erste Gasanalyse (Abk.: GA) ist am Ende des 1. Zuges verbaut (s. Abbildung 4). Analysiert werden  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_{\text{ges}}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  und  $\text{O}_2$ . Besonderheit ist ein Konverter, welcher  $\text{NO}_2$  in  $\text{NO}$  umwandelt. Da erfahrungsgemäß im Temperaturbereich der Hausmüllverbrennung ca. 95 % der Stickoxide als  $\text{NO}$  vorliegen [2], ermöglicht die Wandlung folglich die Erfassung des Gesamt- $\text{NO}_x$  an dieser Stelle.

GA 2 folgt dann am Ende des 2. Zuges. Hier werden  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  und  $\text{SO}_2$  gemessen.

Messstelle GA 3 befindet sich abschließend nach dem Gewebefilter. Es werden die gleichen Parameter wie durch GA 2 gemessen.

Bei allen drei Geräten handelt es sich um den Typ URAS 26 der Fa. ABB.

Durch den Umstand, dass zwischen den Messstellen Falschluff eintritt, werden die Emissionen im Abgasweg verdünnt. Die Messwerte der drei Gasanalysen sind folglich nicht identisch.

Nach dem Gas-/Gaswärmetauscher liegt eine längere, gerade Strecke, welche einem Lasermessgerät die Analyse von HCl und H<sub>2</sub>O erlaubt. Im Vorhaben stellte sich zu Anfang durch Vergleich mit einem FTIR sowie diskontinuierlichen Messungen mit Waschflaschen heraus, dass die Werte unzuverlässig sind. Daher wurden die beiden genannten Parameter im Weiteren nur mittels FTIR bestimmt.

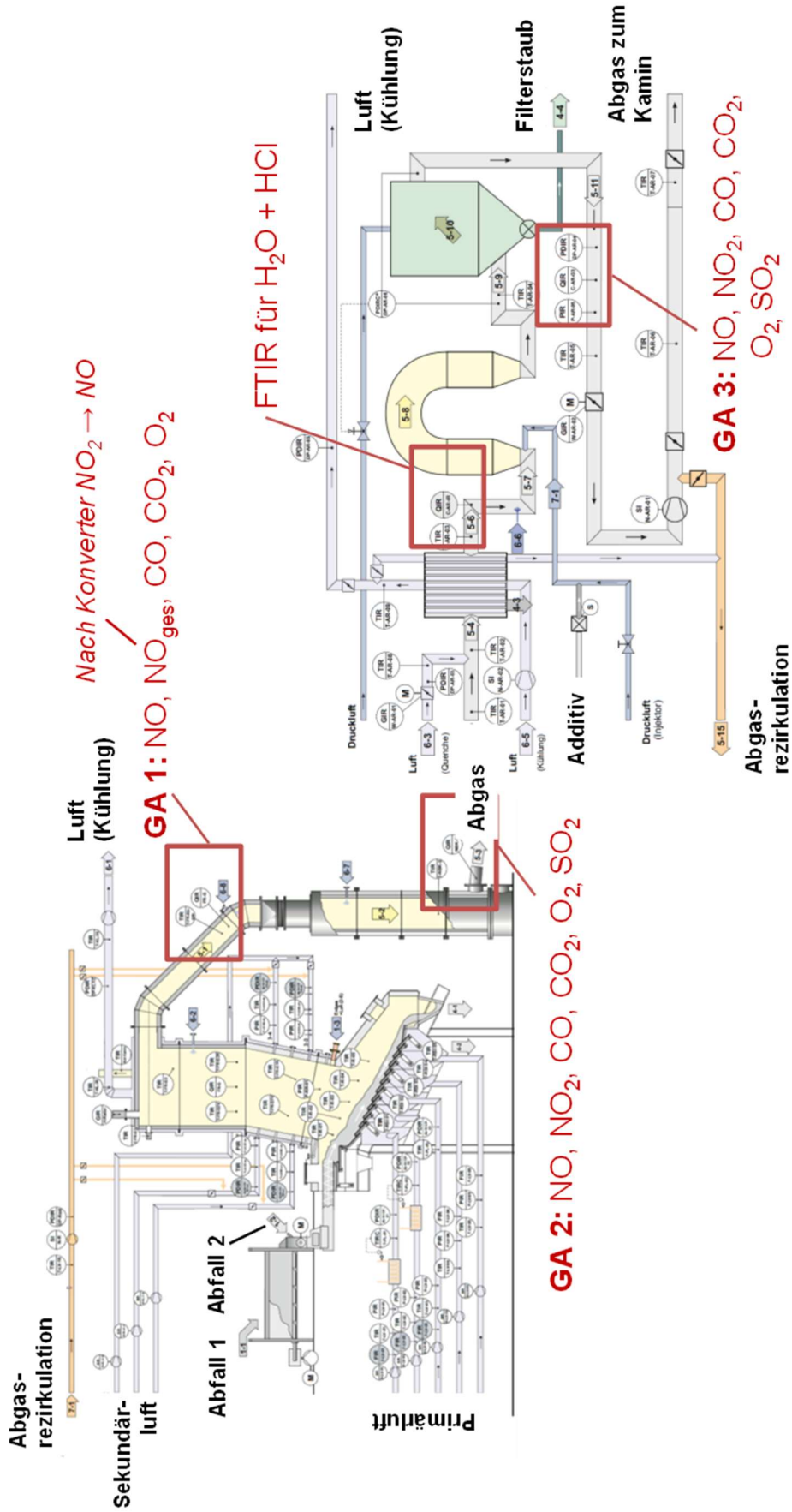


Abbildung 4: Apparategrundfließbild der CUTEC-Technikumsanlage mit Messstellen

## 4.2.3 Versuchsdurchführung an der Technikumsanlage des CUTEC

### 4.2.3.1 Eingesetzte Brennstoffe

Gemäß der Auswahl der Brennstoffe erfolgte die Beschaffung. Bei den Biomassen waren dies unbelastetes Frischholz sowie Grünschnittkompost (s. Abbildung 5). Optisch ins Auge fällt sofort der Größenunterschied: Während die Hackschnitzel auf eine maximale Kantenlänge von 100 mm gesiebt waren, besaß der Kompost eine Partikelgröße im Bereich von 0,5 bis 8,0 mm.



*Abbildung 5: Holz hackschnitzel (links) und Grünschnittkompost (rechts)*

Beim Holz stellte sich heraus, dass der Wassergehalt, welcher gemäß Anfangsanalyse bei 37 Ma.-% lag, bei den verschiedenen Anlieferungen schwanken konnte. Es wurden Spitzenwerte bis zu 45 Ma.-% gemessen. Außerdem bestand die Gefahr, dass bei einer Lagerung über mehrere Tage sich im unteren Bereich des Containers ein höherer Gehalt einstellte als darüber. Dies erforderte einen erhöhten Probenahme- und Analytikaufwand während der Versuchswochen.

Auch der Kompost schwankte in seinen wesentlichen Eigenschaften Wasser- und Aschegehalt bei den verschiedenen Anlieferungen.

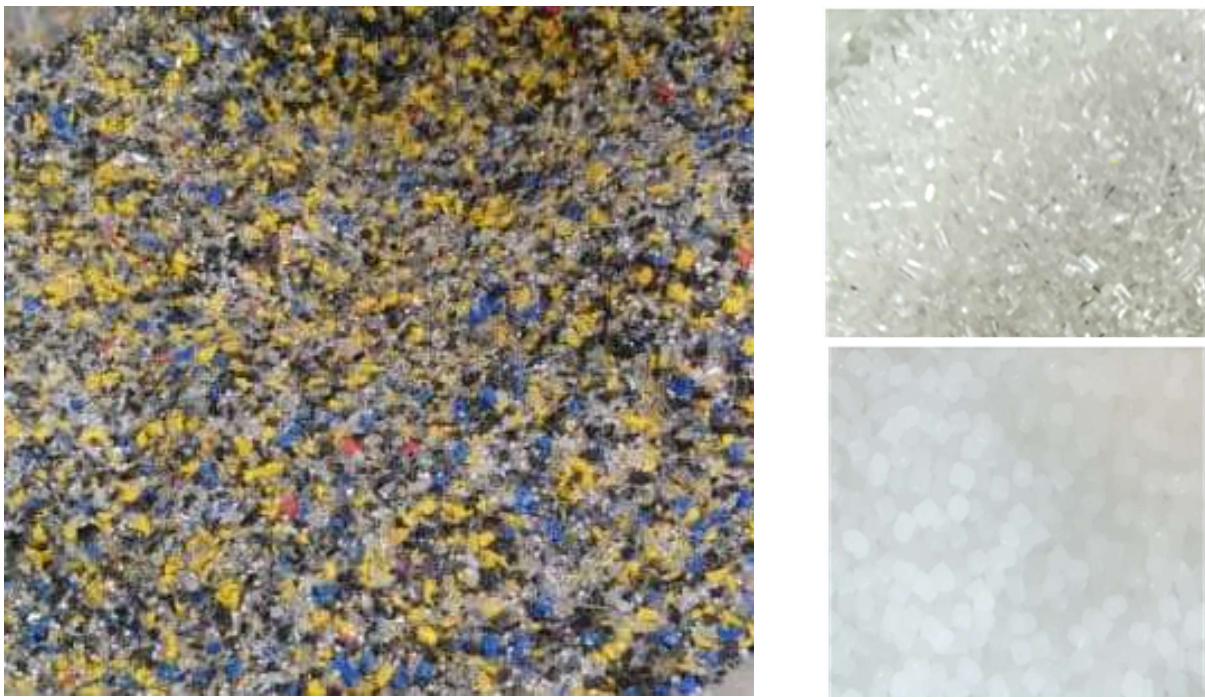
Die PPK-Fraktion bestand aus einem Gemisch von Papier, Pappe und Karton (s. Abbildung 6, links). Der Lieferant siebte mit einer Siebgröße von 150 mm.

Als typisches Verbundmaterial diente Tetra Pak<sup>®</sup>. Es wurde mit einer Siebgröße kleiner 100 mm angeliefert (s. Abbildung 6, rechts)

Bei den Kunststoffen stellte sich heraus, dass in der in der ersten Versuchswoche angelieferten Mischung ein hoher PVC-Anteil enthalten war. Die Korngröße lag in der Bandbreite von 0,7 bis 8,0 mm (s. Abbildung 7, links). Danach wurden noch PE- sowie PET-Granulate beschafft. Die Korngröße lag bei 2,0 bis 4,0 mm (s. Abbildung 7, rechts).



*Abbildung 6: Angelieferte PPK-Fraktion (links) und Tetra Pak (rechts)*



*Abbildung 7: Kunststofffraktionen: PE/PVC/PET (links), PET (rechts, oben), PE (rechts, unten)*

#### **4.2.3.2 Brennstoffanalytik**

Die Brennstoffe wurden umfangreich auf ihre brennstofftechnischen Eigenschaften untersucht. Wesentlich zu nennen sind Wasser- und Aschegehalt, Gehalt an Flüchtigen, Heizwert und Elementaranalyse. Eine exemplarische Zusammenstellung zeigt Tabelle 1.

Tabelle 1: Exemplarische Analyse am Beispiel von PPK in 2021<sup>1</sup>

Kurzanalyse		Analysezustand (gemahlen)			
		i. an.	wf	waf	
Bezugszustand					
Wassergehalt	w	4,44	0,00	0,00	Ma.-%
Asche (815°C)	a	5,78	6,05	0,00	Ma.-%
Flüchtige Bestandteile	V	78,56	82,21	87,50	Ma.-%
Tiegelkoks (C + Asche)	NV	17,00	17,79	12,50	Ma.-%
fixer Kohlenstoff	C <sub>fix</sub>	11,22	11,74	12,50	Ma.-%
Summe		100,00	100,00	100,00	Ma.-%
Glührückstand (550°C)		7,87	8,24	0,00	Ma.-%
<b>Elementaranalyse</b>					
Kohlenstoff (EA)	C	42,65	44,63	47,50	Ma.-%
Wasserstoff (EA)	H	5,50	5,75	6,12	Ma.-%
Sauerstoff	O	41,22	43,13	45,91	Ma.-%
Stickstoff (EA)	N	< 0,33	< 0,35	< 0,37	Ma.-%
Schwefel (Kalorimeter + IC)	S	0,047	0,049	0,052	Ma.-%
Chlor (Kalorimeter + IC)	Cl	0,029	0,030	0,032	Ma.-%
Fluor (Kalorimeter + IC)	F	< 0,01	< 0,01	< 0,01	Ma.-%
Wasser	w	4,44	0,00	0,00	Ma.-%
Asche	a	5,78	6,05	0,00	Ma.-%
Summe		99,99	99,99	99,99	Ma.-%
Schwefel (EA)	S	< 0,33	0,345	0,368	Ma.-%
<b>Brennstoffkennwerte</b>					
Mindestsauerstoffbedarf	o <sub>min</sub>	0,82	0,85	0,91	m <sup>3</sup> /kg
Mindestluftmenge	l <sub>min</sub>	3,89	4,07	4,33	m <sup>3</sup> /kg
Mindestluftmenge	l <sub>min</sub>	5,03	5,26	5,60	kg/kg
Brennwert (Analyse)	H <sub>o</sub>	16,06	16,80	17,88	MJ/kg
Heizwert (Analyse)	H <sub>u</sub>	14,75	15,55	16,55	MJ/kg
Heizwert (Boie)	h <sub>u</sub>	15,18	16,00	17,03	MJ/kg
Heizwert (Verbandsformel)	h <sub>u</sub>	14,77	15,57	16,58	MJ/kg
BW (Mott u. Spooner) < 15% O <sub>2</sub>	h <sub>o</sub>	-	-	-	MJ/kg
BW (Mott u. Spooner) > 15% O <sub>2</sub>	h <sub>o</sub>	17,01	17,86	19,10	MJ/kg
<b>Spurenanalyse</b>					
Aluminium	Al	0,8	0,8	0,9	mg/g
Arsen	As	< 0,02	< 0,02	< 0,02	mg/g
Calcium	Ca	23	24	26	mg/g
Cadmium	Cd	< 0,02	< 0,02	< 0,02	mg/g
Chrom	Cr	< 0,02	< 0,02	< 0,02	mg/g
Kupfer	Cu	< 0,02	< 0,02	< 0,02	mg/g
Eisen	Fe	0,1	0,1	0,1	mg/g
Quecksilber	Hg	< 0,02	< 0,02	< 0,02	mg/g
Kalium	K	0,30	0,31	0,33	mg/g
Magnesium	Mg	0,68	0,71	0,76	mg/g
Natrium	Na	0,96	1,00	1,07	mg/g
Nickel	Ni	< 0,02	< 0,02	< 0,02	mg/g
Phosphor	P	0,04	0,04	0,04	mg/g
Blei	Pb	< 0,02	< 0,02	< 0,02	mg/g
Schwefel	S	0,40	0,4	0,4	mg/g
Zink	Zn	< 0,02	< 0,02	< 0,02	mg/g

<sup>1</sup>   – berechnet als Differenz zu 100;   – Messwert;   – abgeleitete Werte; i.an. – im Annahmezustand; wf – wasserfrei; waf – wasser- und aschefrei

#### **4.2.3.3 Herstellung der Brennstoffmischungen**

Die Herstellung der Mischungen erfolgte entsprechend der berechneten Mengenanteile durch abwechselndes lagenweises Einstreuen der Fraktionen Papier und Holzhackschnitzel in 7 m<sup>3</sup>-Kippmulden.

Die Kippmulden standen dabei auf zwei Palettenwaagen, mit denen die momentane Masse bestimmt werden konnte. Die Mischungsverhältnisse wurden nach den eingebrachten Volumina, d.h. der Anzahl und dem Füllgrad der Radladerschaufeln abgeschätzt und durch Einzelwiegungen mittels der Waagen kontrolliert.

#### **4.2.3.4 Vorversuche zum Brennstoffeintrag**

Die in den vorberechneten Brennstoffmischungen enthaltenen Anteile an Grünschnittkompost sowie Kunststoffmischung wurden während der Versuchsphasen entsprechend ihres jeweiligen Mengenverhältnisses separat über die Zusatzbeschickung („Additivschnecke“) dem Hauptmassenstrom zudosiert.

Der Versuchsaufbau für die Aufnahme der Schneckenkennlinie der Additivschnecke ist in Abbildung 8 gezeigt. Die Schnecke wird dazu aus dem Eintragssystem des Rostes herausgezogen. Sie fördert dann nicht in den Schacht des Schubbodens, sondern in einen darunter befindlichen Behälter, der auf einer Waage steht. Die Gewichte werden bei einer bestimmten Drehzahl der Schnecke über eine Zeit von 20 min protokolliert. Diese Prozedur wird mit verschiedenen Drehzahlen durchgeführt, wobei die durch Regressionsrechnung ermittelten Massenströme bei unterschiedlichen Drehzahlen dargestellt werden.



*Abbildung 8: Aufbau der Additivschnecke zur Aufnahme der Schneckenkennlinie*

Die Kaltversuche zur Aufnahme der Schneckenkennlinie wurden am Vorhabensbeginn mit dem Grünschnittkompost sowie der Kunststoffmischung durchgeführt. Der Kompost wies eine Schüttdichte (locker gelagert) von 392 kg/m<sup>3</sup> und die Kunststoffmischung von 512 kg/m<sup>3</sup> auf. Mit dieser Schüttdichte ergibt sich eine Schneckenkennlinie, die den geförderten Massenstrom als Funktion der Schneckendrehzahl darstellt (s. Abbildung 9).

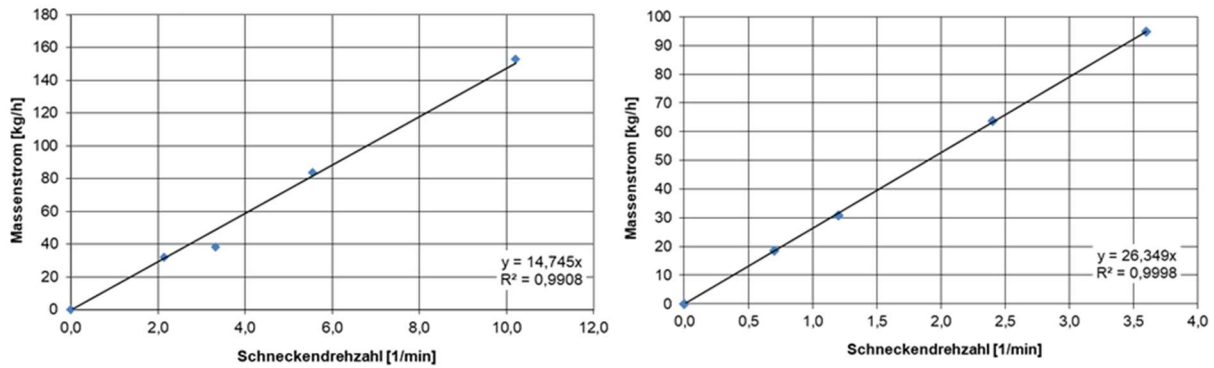


Abbildung 9: Schneckenkennlinie von Grünschnittkompost (links) und Kunststoffmischung (rechts)

Weiterhin wurde im Kaltzustand die Kennlinie der Haupteintragungsschnecke mit einer Brennstoffmischung aus 60 Ma.-% Altpapier und 40 % Holz aufgenommen. In Abbildung 10 ist die experimentell ermittelte Kennlinie im Vergleich zur rechnerisch Ermittelten gemäß Modellrechnung nach VDI 2330 Blatt 2 [3] dargestellt.

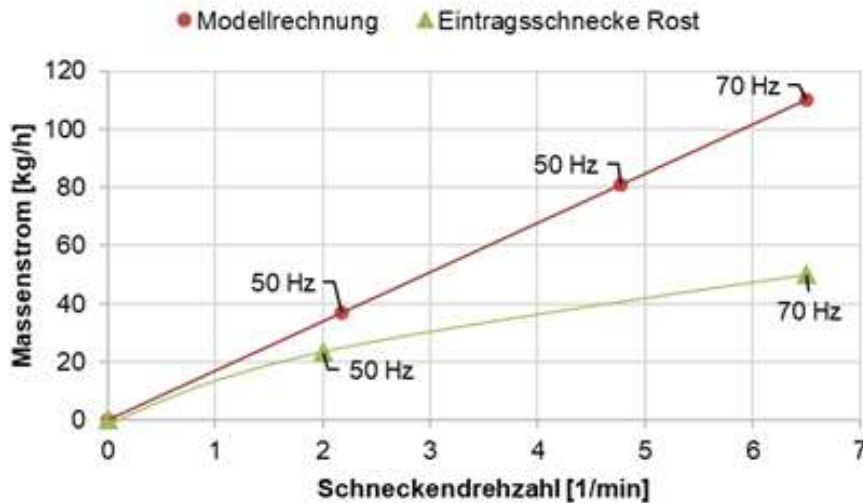


Abbildung 10: Vergleich Modellrechnung mit der experimentell ermittelten Schneckenkennlinie

Es ist deutlich zu sehen, dass die experimentell ermittelte Kennlinie von der Modellrechnung mit steigender Drehzahl mehr und mehr abweicht. Der Massenstrom der Mischung kann dabei auch durch die Erhöhung der Frequenz des Antriebs nur minimal angehoben werden. Der Kaltversuch machte deutlich, dass mit der genannten Mischung nur ein maximaler Massenstrom von 50 bis 60 kg/h möglich ist.

Im Versuch zeigte sich weiterhin, dass sich aufgrund der geringen Schüttdichte (60 bis 100 kg/m<sup>3</sup>) sowie relativ hohen Partikelgrößen (60 bis 150 mm) Brücken im Ausfallschacht des Schubbodens bildeten. Daher musste eine ständige Kontrolle des Eintrags erfolgen. Um die Brückenbildung zu vermeiden, wurde deshalb das Material in regelmäßigen Abständen manuell in den Schacht zur Eintragungsschnecke gedrückt.

#### 4.2.3.5 Anpassungen am Prozessleitsystem

Die Anlagen der Abt. Thermische Prozesstechnik arbeiten bei Steuerung und Aktorik mit dem System S7 der Fa. SIEMENS. Zur Visualisierung dient das Programm WinCC des gleichen Unternehmens. Die Leitwarte ist elektronisch nach außen entkoppelt, um einen externen Zugriff per Software zu verhindern. Es war zu Projektbeginn die Aufgabe zu bewältigen, wie der Projektpartner EVT parallel zum Versuchsbetrieb oder zeitnah an die Messdaten herankommt.

Wegen der Basis mit SIEMENS-Hard- und Software fiel die Entscheidung zur Nutzung der Siemens-Schnittstelle Open Platform Communications (OPC). Diese ist speziell für den Datentransfer konzipiert.

Die Messrechner arbeiten aus Lizenzgründen teilweise noch mit dem Betriebssystem Windows XP. Im ersten Schritt wurde auf ihnen ein OPC-Server installiert (s. Abbildung 11).

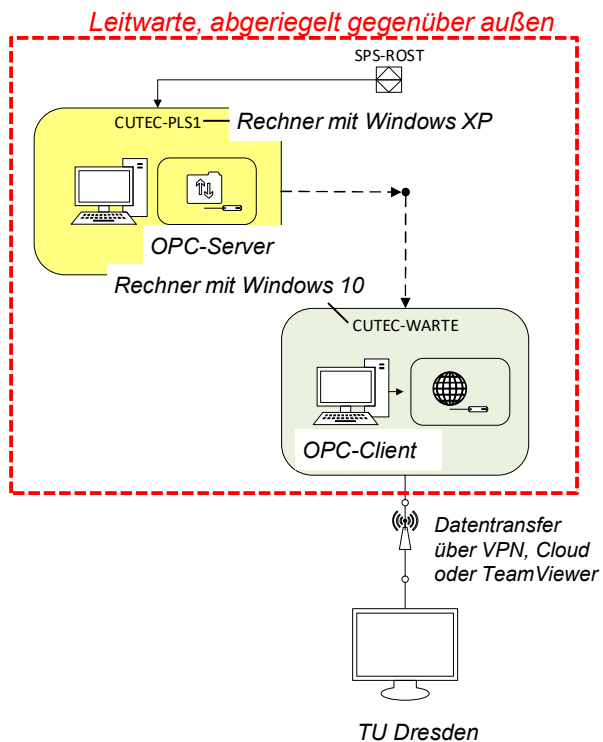


Abbildung 11: Konzept zum Datentransfer

Dieser schiebt die Messdaten auf einen OPC-Client, welcher auf einem Rechner mit dem sicheren Betriebssystem Windows 10 installiert wurde. Auf den Computer kann EVT mittels der Software Python zugreifen und die gewünschten Daten herüberziehen.

Insgesamt handelt es sich um 46 Messstellen. Während des Versuchsbetriebes wurden sie als 1-Minuten-Mittelwerte in Exceltabellen abgespeichert. Auf diese Dateien griff EVT zu.

#### 4.2.3.6 Versuchsplanung und Umsetzung

Während der Projektlaufzeit wurden insgesamt vier Versuchswochen durchgeführt. Zu nennen sind die KWs. 16 und 39 in 2021, die KW. 17 in 2022 sowie die KW. 17 in 2023.

Folgende Parametervariationen fanden statt:

- Brennstoffart
- Brennstoffzusammensetzungen
- Luftverteilungen Primär-/Sekundärluft
- Gesamtluft ( $\lambda$ -Wert)
- Rezigasführung: Mit / Ohne sowie Menge
- Stationärer Betrieb sowie einmalige Aufgabe einer Fraktion auf eine Brennstoffmischung („Instationärer Betrieb“).

Um die Abhängigkeit der Gaszusammensetzung von den Brennstoffen zu ermitteln, wurden Monofractionen bis hin zu Gemischen von vier Fraktionen aufgegeben. Die Variationen zeigt Tabelle 2.

Tabelle 2: Brennstoffmischungen gemäß der Versuchsplanung

	Stationäre Betriebszustände	Haupt-Mischungsverhältnis (ca.) [Ma.-%]
<b>Mono:</b>	Holz (4x) PPK	
<b>Duo:</b>	Holz / PPK Holz / Kompost (2x) Holz / Kunststoffgemisch (2x) Holz / PE Holz / PET Tetra Pak / Kompost PPK / Kompost	40 / 60 75 / 25 85 / 15 und 92 / 8 84 / 16 87 / 13 32 / 68 35 / 65
<b>Trio:</b>	Holz / PPK / PE Holz / PPK / PET Holz // PPK // PE/PVC/PET Holz / PPK / Tetra Pak Holz / PPK / Kompost	34 / 51 / 15 32 / 48 / 20 36 / 54 / 10 17 / 50 / 33 13 / 38 / 50
<b>Quartett:</b>	Holz / PPK / Kompost / Tetra Pak (9x)	15 / 37 / 22 / 26 und 14 / 26 / 22 / 38

Des Weiteren wurden im instationären Betrieb noch Sprungantworten provoziert durch einmalige Aufgabe definierter Brennstoffmengen. Die Bedingungen sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Brennstoffmischungen im „Instationären Betrieb“

Instationäre Betriebszustände mit:	Addiert:
<b>Monofraktion:</b> Holz	12 kg PET 22,5 kg PE 35,5 kg Kompost
<b>Grundmischung:</b> Holz / PPK / Kompost / Tetra Pak	10 kg PET 10 kg PE / PET / PVC

Zunächst wurde immer mit dem Warmfahren der Anlage mit Erdgas und getrockneten Holzhackschnitzeln begonnen. Anschließend erfolgte die erste Brennstoffumstellung auf feuchte Hackschnitzel.

Um besser auf Prozessstörungen reagieren zu können, erfolgte der Brennstoffwechsel in den Folgetagen aufgrund der besseren Verfügbarkeit des Betriebspersonals vorwiegend in den

Früh- und Tagschichten. Jede Versuchsphase dauerte mindestens sechs Stunden. Die jeweils letzten zwei bis vier Stunden wurden als stationärer Zustand angesehen, in welchem repräsentative Proben von Rostschlacke und -durchfall sowie Filterstaub genommen wurden.

Die Temperatur über dem Rost wird über Thermoelemente gemessen, welche auf beiden Seiten in Abständen (ca. 44 cm zwischen den ersten vier, 95 cm vom vierten zum fünften) über die Länge des Rostes hin angeordnet sind. In MOAB hat man allerdings folgende Aufgaben zu lösen:

- zeitliche und örtliche Schwankung des Brennstoffes auf dem Rost
- unbekanntes Verbrennungsverhalten synthetischer Mischungen auf dem Rost
- geringes Inventar auf dem Rost der Technikumsanlage

Um sich ein besseres Bild der Vorgänge in und um die Hauptverbrennungszone zu verschaffen, stellte die Fa. MARTIN® GmbH für Umwelt- und Energietechnik (München) eine Infrarotkamera, dessen Typ vom Unternehmen vertrieben wird, auf eigene Kosten für zwei Versuchswochen (KWs. 39.2021+17.2022) zur Verfügung. Die Kamera ist in der Lage, die Brennbettoberflächentemperaturen im interessanten Verbrennungsbereich zu messen und die Hauptreaktionszone zu ermitteln (s. Abbildung 12).

Die Temperaturdaten der IR-Kamera können im laufenden Betrieb mit den Messwerten der Thermoelemente entlang der Rostzonen verglichen werden. Das Sichtfeld ist in Zonen eingeteilt mit der Anzeige von Mittel- und Maximaltemperaturen.

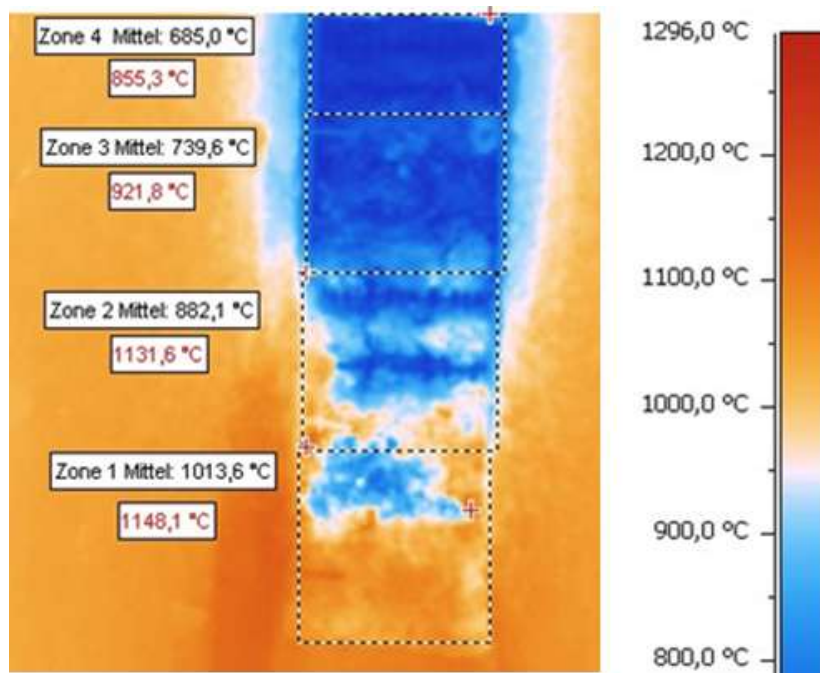


Abbildung 12: Bild der IR-Kamera im Versuchsbetrieb

Mit der Arbeitsweise ist es möglich, optisch die Entstehung von Agglomerationen (Schlackebrocken) zu erkennen. Für die Anlagenfahrer wird es damit leichter, rechtzeitig durch Umverteilung der Primärluft oder Erhöhung der Roststabgeschwindigkeit das Feuer auseinanderzuziehen oder zu verschieben.

Es stellte sich heraus, dass bei den instationären Versuchen mithilfe der IR-Kamera ein zeitlicher Zusammenhang zwischen der Temperaturänderung der Hauptbrennzone sowie der Rohgaskonzentration an CO<sub>2</sub> ermittelbar ist (s. Abbildung 13).

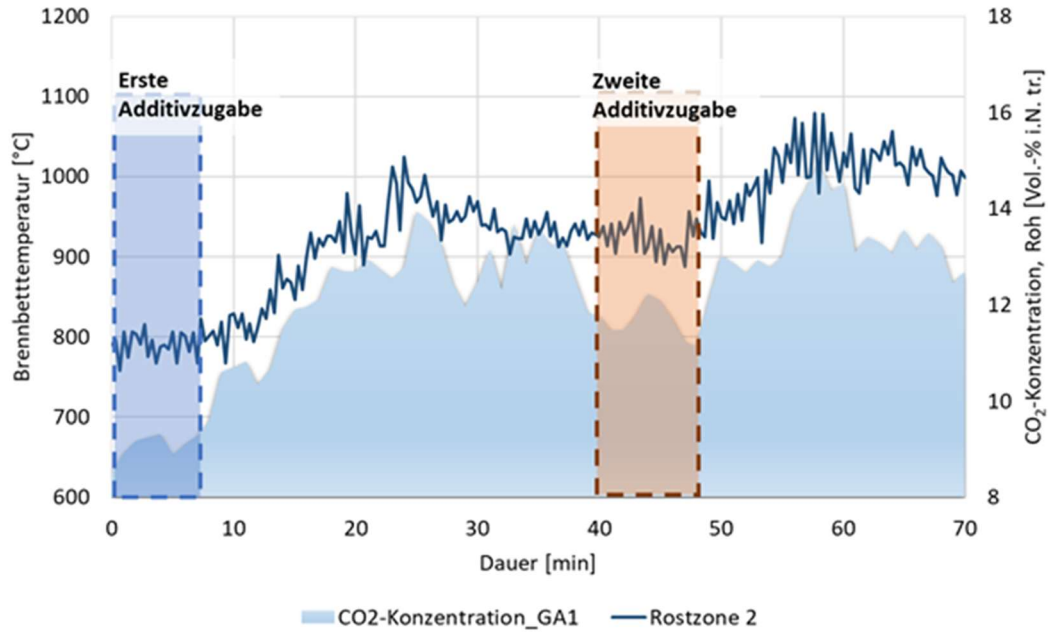


Abbildung 13: Brennbetttemperatur in Rostzone 2 + CO<sub>2</sub>-Konzentration über der Versuchsdauer (Versuch Nr. 09 in KW. 17.2022)

## 4.2.4 Ergebnisse aus den Versuchen an der Technikumsanlage des CUTEC

### 4.2.4.1 Vergleich Ein- und Ausgang der für das Berechnungswerkzeug wesentlichen Komponenten

Gemäß des MOAB-Zieles des Verbleibs wesentlicher Elemente in der Gasphase als Funktion der Brennstoffzusammensetzung erfolgte die Auswertung der Versuche. Als erstes soll das Element Kohlenstoff betrachtet werden.

Abbildung 14 zeigt wesentliche Größen rund um das Element für eine Versuchswoche. Zu sehen ist, dass sich gemäß des Kohlenstoffgehaltes im Brennstoff der Heizwert sowie der CO<sub>2</sub>-Gehalt im Rohgas entwickeln.

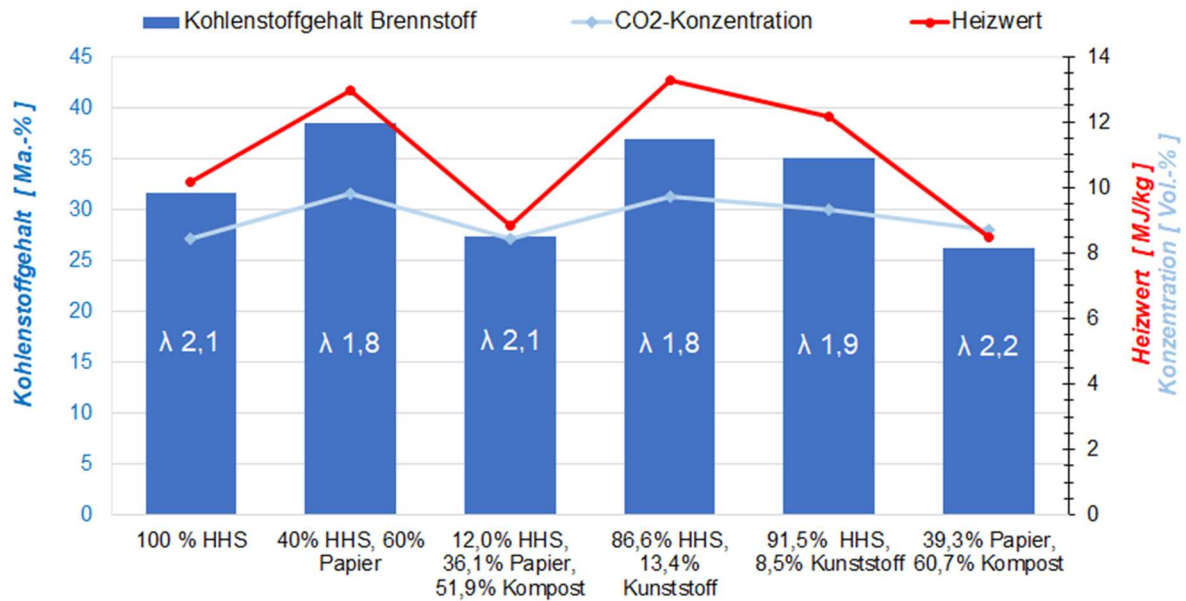


Abbildung 14: CO<sub>2</sub>-Konzentration und Heizwert als Funktion der Brennstoffmischung, exemplarisch dargestellt für Versuchswoche KW. 16 in 2021

Für die Grundidee von MOAB, nämlich aus der Abgaszusammensetzung auf die brennenden Brennstoffe zu schließen, ist die Frage entscheidend, wieviel Kohlenstoff als CO<sub>2</sub> in die Gasphase geht. Ideal wäre ein Übergang von nahezu 100 %, unabhängig vom Abfall.

Abbildung 15 zeigt das Ergebnis der Basisuntersuchung, durchgeführt schon für die erste Versuchswoche. Mit einem Übergang des Kohlenstoffs von 99 bis 100 % selbst bei völlig unterschiedlichen Brennstoffen ist die grundlegende Annahme eindrucksvoll bestätigt.

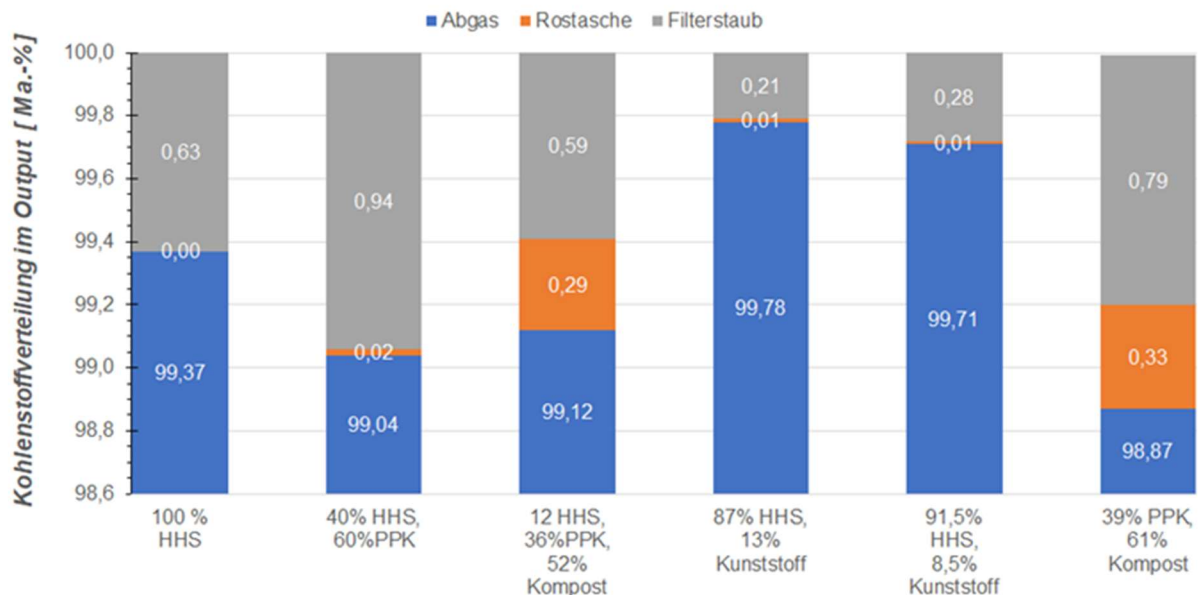


Abbildung 15: Verbleib des Kohlenstoffs aus dem Brennstoff, exemplarisch dargestellt für Versuchswoche KW. 16 in 2021

Das Gleiche gilt auch für den Zusammenhang von Wasser im Brennstoff und dem sich einstellenden Wassergehalt im Abgas. Je mehr Wasser im Eintrag, desto mehr Wasser befindet sich im Ausgang (s. Abbildung 16).

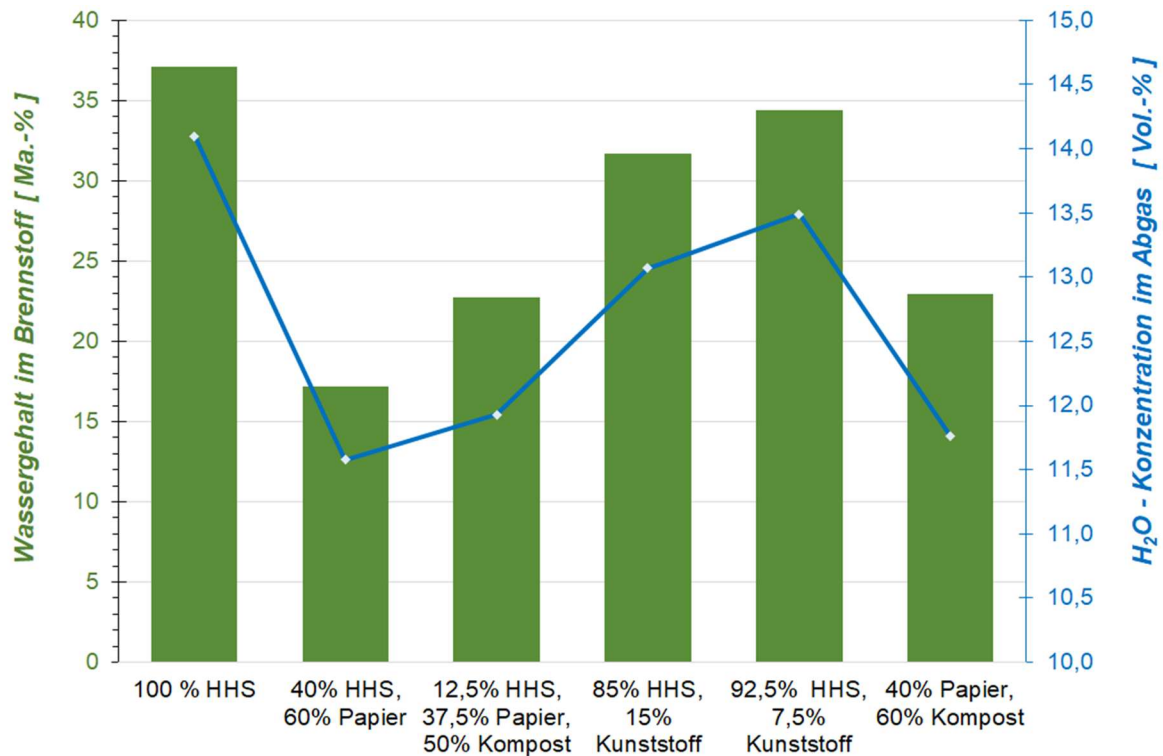


Abbildung 16: Wassergehalte in Brennstoff und Abgas für Versuchswoche KW. 16 in 2021

#### 4.2.4.2 Vergleich Ein- und Ausgang für emissionsrelevante Elemente

Die eingesetzten Brennstoffe enthielten i.a. wenig emissionsrelevante Elemente wie Chlor oder Schwefel. Eine Ausnahme bzgl. des Elementes Chlor bildet die anfangs eingesetzte Kunststoffmischung mit PVC.

Wie Abbildung 17 zeigt, lassen sich zwei entsprechende Versuchspunkte mit signifikanten Mengen auswerten. Aufgeführt ist einerseits der Eintrag über den Brennstoff, errechnet aus der Brennstoffanalytik und den gemessenen Massenströmen. Daneben stehen die Brennstoffströme an HCl im Abgas, gemessen durch den Volumenstrom des Gesamtgases sowie die Konzentrationen an HCl, bestimmt durch die Verfahren FTIR und Laser.

Deutlich zu sehen ist, dass anscheinend mehr Chlor aus- als eintritt. Der Unterschied dürfte auf Messungenauigkeiten zurückzuführen sein. Es bestätigt sich die in der Müllverbrennung seit Jahrzehnten gemachte Erfahrung, dass Chlor nahezu vollständig ins Abgas übergeht. Dies bestätigt auch Abbildung 18 anhand der Reststoffanalytik, wenn nur Versuche mit nennenswertem Vorhandensein von Chlor ausgewertet werden.

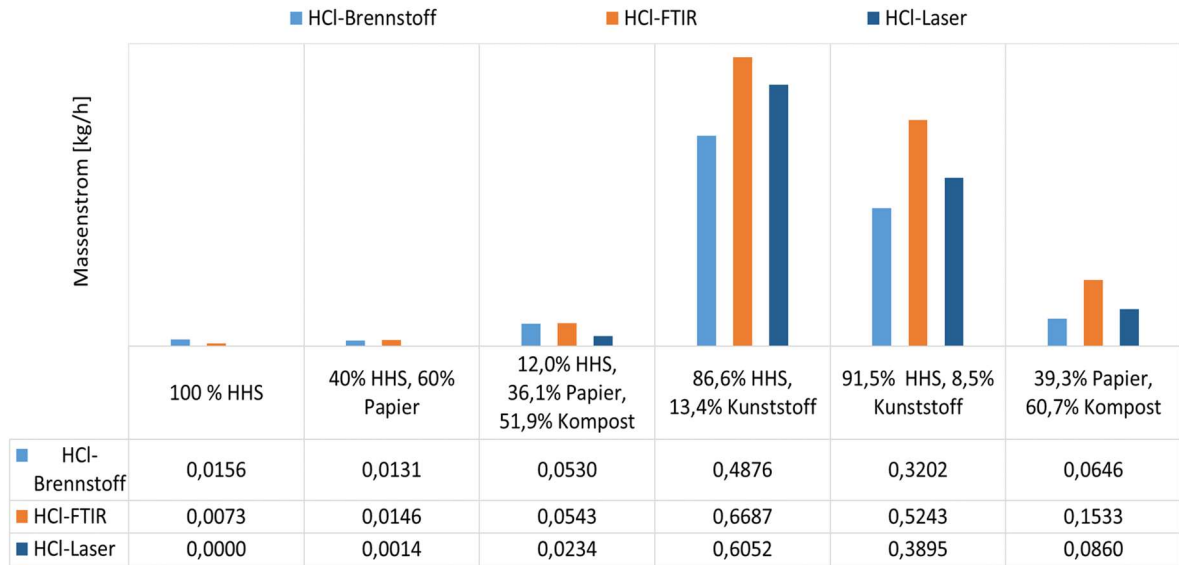


Abbildung 17: Bilanz von HCl in Ein- und Ausgang in Versuchswoche KW. 16 in 2021

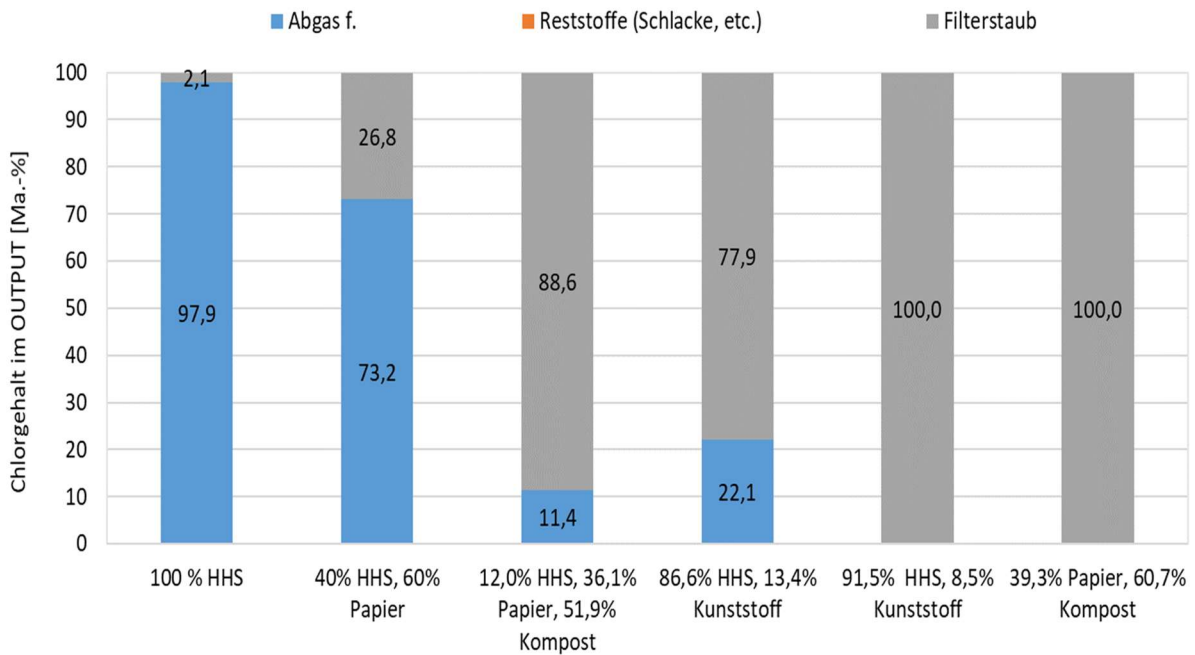


Abbildung 18: Bilanz von HCl in Ein- und Ausgang in Versuchswoche KW. 16 in 2021

Beim Schwefel ist ebenfalls zu beobachten, dass mit dem Schwefelgehalt in der Brennstoffmischung die SO<sub>2</sub>-Konzentration im Abgas entsprechend schwankt, sofern man einen gemeinsamen Bezugspunkt von 11 % tr. O<sub>2</sub> verwendet (s. Abbildung 19). Da Schwefel aber in der Müllverbrennung nicht vollständig verbrennt, ist der SO<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas kein zuverlässiger Sensor für die Schwefelkonzentration im Brennstoff.

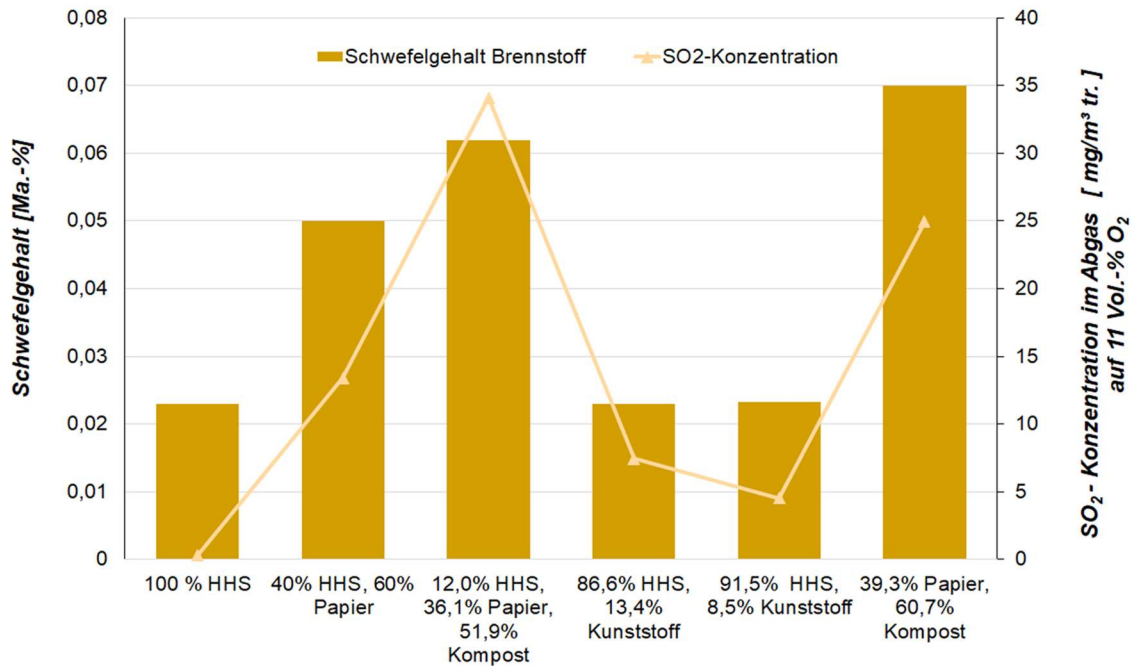


Abbildung 19: Zusammenhang von SO<sub>2</sub>-Konzentration im Abgas und Schwefelgehalt der Brennstoffmischung in Versuchswoche KW. 16 in 2021

Das gleiche Ergebnis ist auch für das Element Stickstoff festzustellen (s. Abbildung 20).

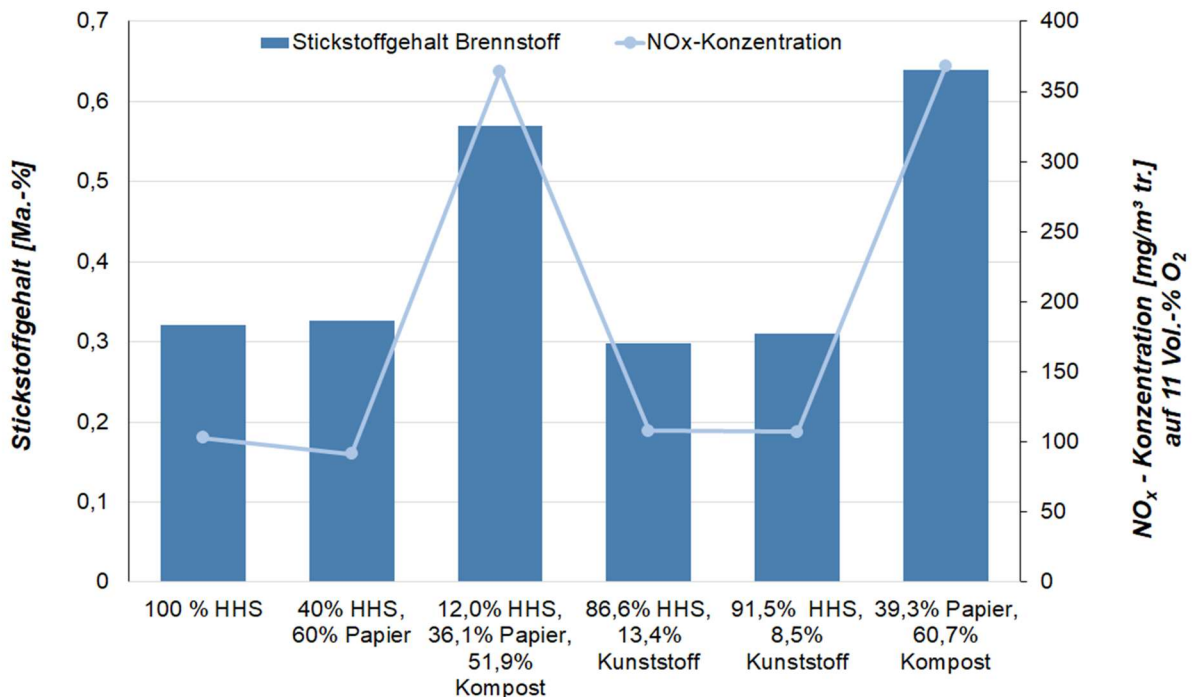


Abbildung 20: Zusammenhang von NO<sub>x</sub>-Konzentration im Abgas und Stickstoffgehalt der Brennstoffmischung in Versuchswoche KW. 16 in 2021

**Fazit:** Es sind für kein Element evtl. auf die Anlagentechnik zurückzuführende Anomalien erkennbar, z.B. Freisetzung oder Bildung von Inventar in Feuerraum oder Abgasleitung.

#### 4.2.4.3 Bilanzierung wesentlicher Elemente

Interessant ist weiterhin eine Betrachtung, welchen Weg in welcher Menge wesentliche Elemente wie Kohlenstoff, Schwefel und Stickstoff gehen. Abbildung 21 zeigt dies exemplarisch

für einen Versuchspunkt in der Einheit [kg/h]. Das Ergebnis ist charakteristisch für alle durchgeführten Versuche.

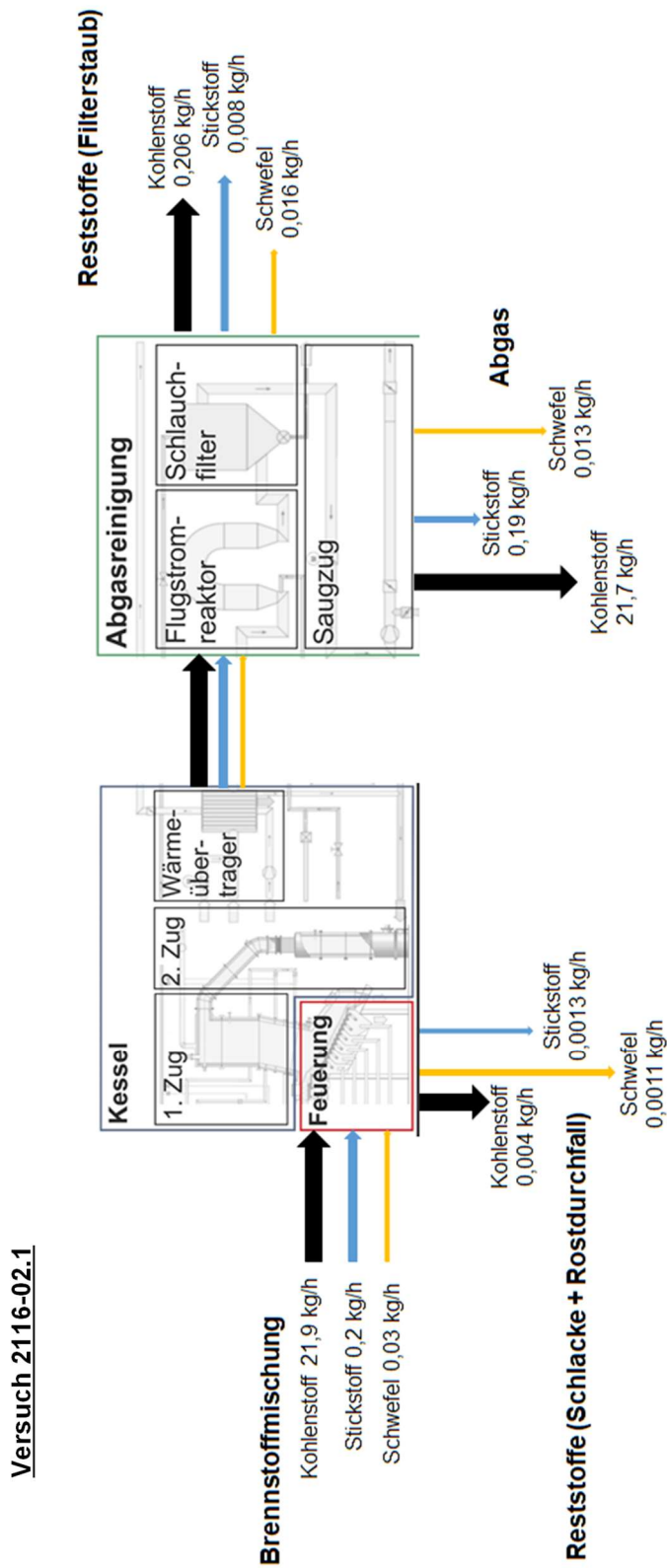


Abbildung 21: Sankeyähnliches Diagramm für C, S und N für den Versuch 02 in KW 16.2021

Umgerechnet in die Einheit [%] ergibt sich Abbildung 22.

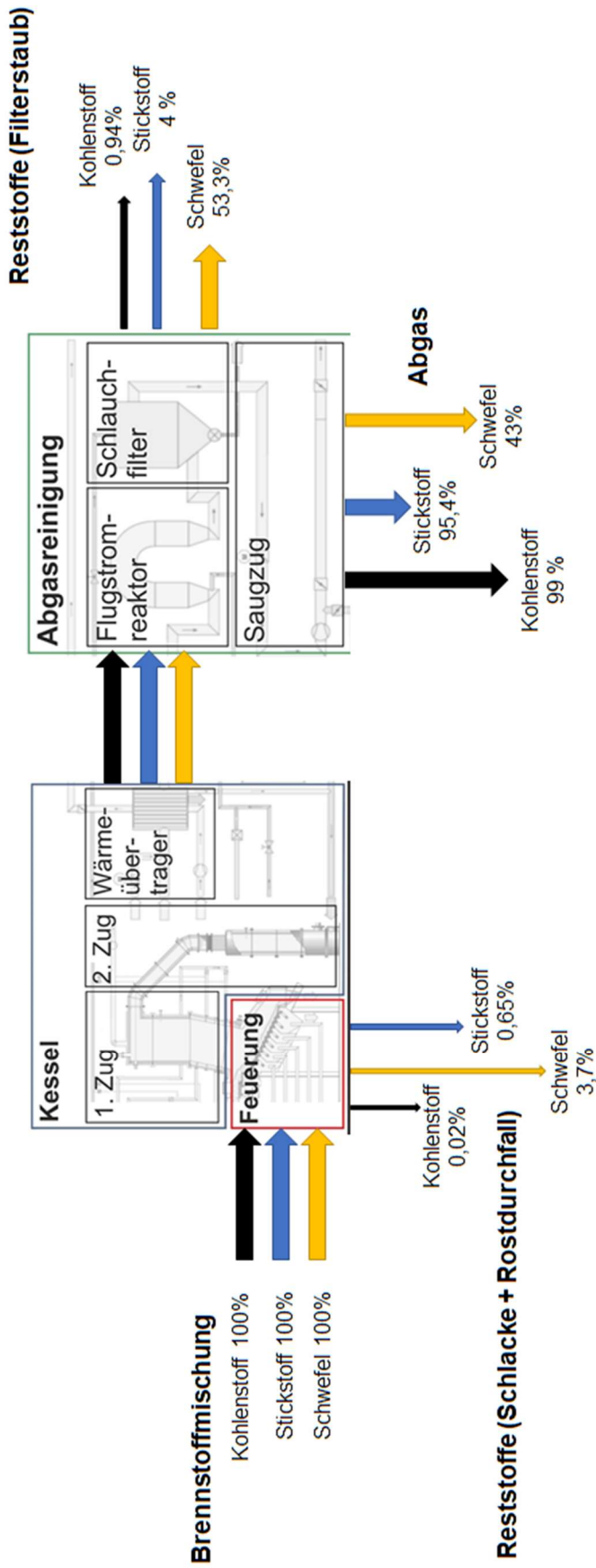
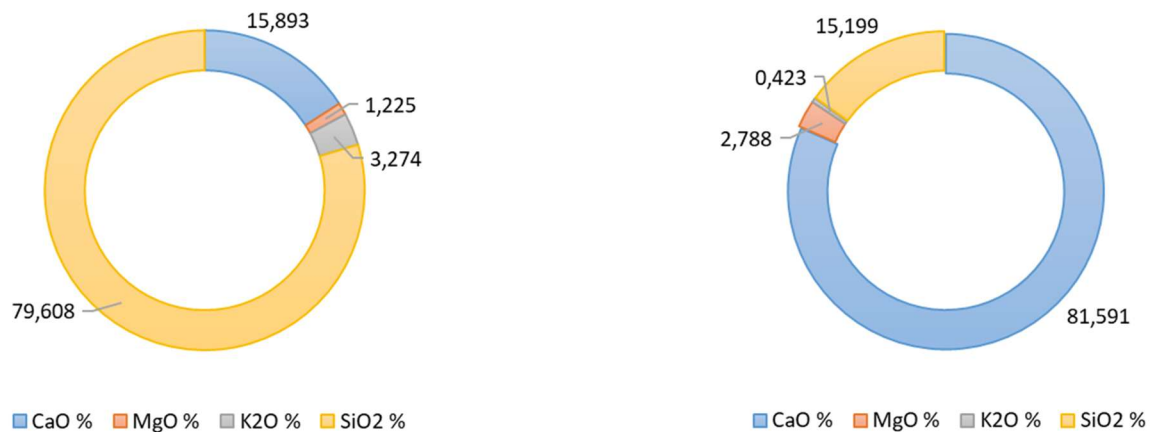


Abbildung 22: Diagramm für C, S und N in der Einheit [Ma.-%]

#### 4.2.4.4 Verbleib von Alkali, Erdalkali und Silizium

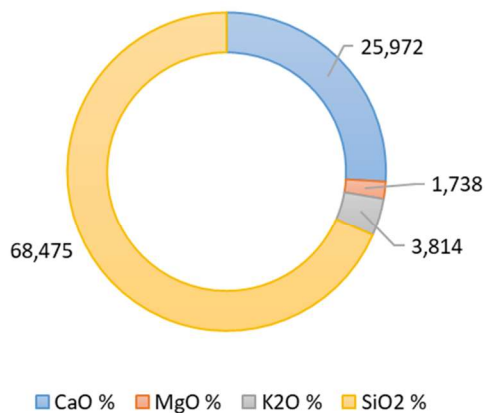
Abschließend sei noch eine kurze Betrachtung zu den Elementen Kalium, Calcium, Magnesium und Silizium angestellt. Alle Elemente sind als Feststoffe in der Rost-, Kessel- und Filterasche zu erwarten. Für die Gasphase spielen sie keine Rolle.

Die Zusammensetzung der Feststoffe wird von den Brennstoffen bestimmt. Exemplarisch sei dies an der Rostasche gezeigt: Während bei den biomassebasierten Abfällen Silizium überwiegt, überwiegt bei PPK naturgemäß das Element Calcium (s. Abbildung 23).



**12 % Holz, 52 % Kompost, 36 % PPK**

**40 Ma.-% Holz, 60 % PPK**



**87 % Holz, 13 % Kunststoffmischung**

Abbildung 23: Verteilung von Alkali, Erdalkali und Silizium in der Rostasche in Abhängigkeit von der Brennstoffzusammensetzung

#### 4.2.5 Vergleich von Theorie und experimentellen Ergebnissen

##### 4.2.5.1 Rostmodell

Bei bekannter Brennstoffzusammensetzung und dem Luftüberschuss der Verbrennung kann, aufbauend auf der Brennstoffanalytik der Einzelfractionen, die spezifische Abgaszusammensetzung wichtiger Komponenten wie CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> und HCl berechnet werden, bestimmt als [kg Komponente X/kg Abfall]. Um bei Bedarf weitere Messgrößen wie die Temperaturen oberhalb des Rostbettes oder am Ende der Sekundärluftzone sowie schnell Variationen durchführen zu können, um damit Sensitivitäten zu ermitteln, wurde ein chemisch-physikalisches Rostmodell erstellt. Als Werkzeug diente das Programmpaket ChemCAD.

Gemäß gängiger Literatur, z.B. [4], wurde der Rost über seine Länge in die Prozesse Trocknung, Entgasung, Zündung, Vergasung, Verbrennung und Ausbrand aufgeteilt. Dazu wurden die ersten beiden Vorgänge in Zone 1 zusammengefasst; Zündung, Vergasung, Verbrennung in Zone 2 sowie Ausbrand und Aschekühlung in Zone 3 (s. Abbildung 24). Wasseraufnahme der Rostasche sowie Dampffreisetzung erfolgten im Nassentschlacker, sodass eine feuchte Rostasche den Bilanzraum verlässt.

Das die Rostzone verlassende Abgas tritt in die Sekundärluftzone ein. Anschließend folgt eine SNCR, welche für die MOAB-Berechnungen allerdings deaktiviert wurde, da die Technikumsanlage keine Entstickung besitzt.

Für den Wärmehaushalt dient die Baugruppe Kessel. Sie ist so gestaltet, dass

- 1) eine definierte Abgastemperatur am Kesselende eingestellt wird und
- 2) die Energiebilanz aufgeht, d.h. die Summe aller eintretenden Energien ist gleich der Summe der Austretenden, bestimmt durch die an der Technikumsanlage nicht vorhandene Dampfmenge. An der CUTEC-Anlage wird Kühlluft eingesetzt. Da damit die Ergebnisse allerdings nicht auf konventionelle Anlagen übertragbar sind, wurde die realistischere Variante Dampf gewählt.

Rezigas kann nach dem Kessel abgezogen werden. Seine Menge wird durch den Stream Divider 40 entsprechend der experimentellen Einstellungen bestimmt.

Am Ende wird durch den Component Separator 37 noch in trockenes Rauchgas und Wasser aufgeteilt, so dass die Gaszusammensetzungen sowohl für trockenes als auch feuchtes Rauchgas direkt abgelesen werden können.

Im Einzelnen arbeitet das Rostmodell wie folgt:

Vor Zone 1 sind die verschiedenen Fraktionen als Einzelströme aufgeführt. Jeder Strom ist gemäß der Brennstoffanalytik aus Stoffen der ChemCAD-Datenbank zusammengesetzt. Der jeweilige Massenstrom richtet sich nach den experimentellen Einstellungen.

### **Zone 1: Trocknung und Entgasung**

Die Trocknung erfolgt im *Component Separator 1* bei einer Temperatur von 100 °C. Der Sensor 7 *Trockenenergie* misst die dabei aufzuwendende Wärme.

Über den *Wärmetauscher 4 Entgasungs-T* wird auf eine geschätzte Vergasungstemperatur von 300 °C aufgeheizt. Der *Sensor 2* misst wiederum die benötigte Wärme.

Im *Multipurpose Flash 3 Entgasung* werden Gas und Feststoff voneinander getrennt.

### **Zone 2: Zündung, Vergasung und Verbrennung**

Im *Equilibrium Reactor 9 Vergasung* erfolgt die Vergasung charakteristischer organischer Stoffe so, dass sich CO-Werte einstellen, wie sie in einem alten HGF-Verbundprojekt [5] an der CUTEC-Anlage ungefähr gemessen wurden.

Anschließend erfolgt die Oxidation brennbarer Substanzen im *Equilibrium Reactor 10 P-Verbren*. Der *Controller 11* zieht Primärluft so, dass knapp überstöchiometrische Verhältnisse oder bei bekanntem  $\lambda$  des Experiments der entsprechende Wert eingestellt wird. Der Umsatz der Organik ist nicht vollständig, um noch einen Rest für den Ausbrand sowie den Kohlenstoffgehalt der Rostschlacke übrig zu lassen; Chlorverbindungen werden zu 100 % und Schwefelverbindungen zu ca. 50 % umgesetzt.

Der folgende *Sensor 17 Wärmeverlust* stellt den Strahlungsverlust des Feuerraums über die Wände fest. Eingestellt ist ein Wert von 0,6 % der Feuerungswärmeleistung (Abk.: FWL). Anschließend wird im *Sensor 19 Wärmeabbau* ein Wert von 15 % der FWL errechnet.

Die folgenden *Wärmetauscher 6 Trocknung, 21 Entgaswärme, 18 Wärmeverlust* und *20 Wärmeabbau* nehmen die durch die vorherigen Sensoren errechneten Wärmebedürfnisse auf und kühlen das Produktgas entsprechend ab.

Im *Component Separator 12* werden Rostasche und Gas voneinander getrennt.

Die Gase aus den vorherigen und nachfolgenden Zonen werden dann im *Mixer 13* gemischt und in die Sekundärluftzone geführt.

### **Zone 3: Ausbrand + Ascheabkühlung**

Im *Equilibrium Reactor 14 Nachvern+Küh* findet dann weiterer Restausbrand bis auf einen Kohlenstoffgehalt von ca. 1 Ma.-% statt. Der *Regler 16* zieht so viel Primärluft, dass auf eine Aschetemperatur von 400 °C gekühlt wird.

Im abschließenden *Component Separator 15* werden dann wieder Feststoff und Gas voneinander getrennt. Das Produktgas wird mit einem frei festzulegenden Falschluffstrom sowie einem geringen Wasserdampfstrom aus dem Nassentschlacker gemischt.

### **Nassentschlacker**

Der *Controller 27* zieht so viel Wasser, dass ein Wassergehalt in der Rostasche von 25 Ma.-% eingestellt wird. Den Bilanzraum verlässt dann feuchte Rostasche.

### **Sekundärluftzone**

Im *Equilibrium Reactor 23 Sekverbrenn* findet die vollständige Verbrennung der verbliebenden brennbaren Bestandteile statt. Der in der Praxis nicht vorhandene *Separator 36* trennt in trockenes Abgas sowie Wasserdampf auf. So wird es möglich, dass der *Regler 24* den O<sub>2</sub>-Gehalt im trockenen Gas misst und gemäß eines Sollwertes so viel Sekundärluft zieht, dass der experimentell gemessene O<sub>2</sub>-Gehalt des Kesselende eingestellt wird.

### **SNCR**

Im *Equilibrium Reactor 30* reagieren NO und NO<sub>2</sub> zu N<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O. Der *Controller 29* zieht so viel 25 Ma.-% Ammoniakwasser, dass ein NO<sub>x</sub>-Wert von 400 mg/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> eingestellt wird.

### **Kessel**

Der *DampfErz 1* erzeugt aus Speisewasser so viel Dampf, dass das Abgas auf eine Kesselaustrittstemperatur von 220 °C abgekühlt wird. Der *DampfErz 2* nimmt die in Zone 2 abgebaute Wärmeenergie auf, um daraus Dampf zu produzieren. Die Dampfparameter betragen 400 °C/40 bar.

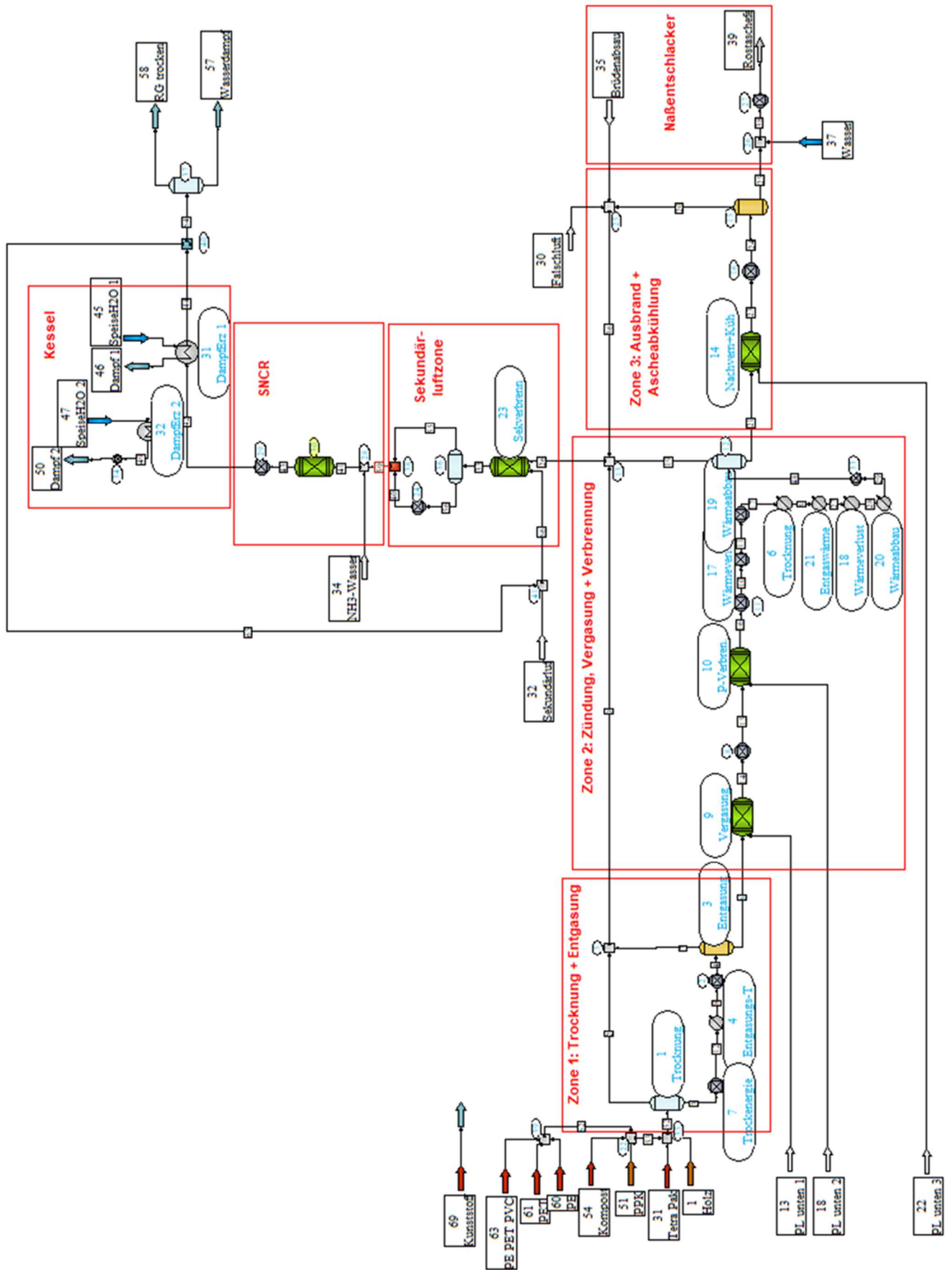


Abbildung 24: Grundfließbild des Rostmodells

#### 4.2.5.2 Vergleich Ist- und Sollwerte der experimentellen Einstellungen

##### 4.2.5.2.1 Versuchswoche KW. 16 in 2021

Für die erste Versuchswoche konnten sechs stabile Versuchspunkte ausgewertet werden (s. Tabelle 4). Da die Technikumsanlage nicht für die Verbrennung von reinem Holz ausgelegt ist, wurde der Versuchspunkt 1, wie in den folgenden Versuchswochen auch, nicht für die zahlenmäßige Auswertung herangezogen. Ferner fällt auf, dass auch der Versuch 2116\_02 noch eine gravierende Abweichung des CO<sub>2</sub>-Messwertes vom Sollwert entgegen dem Trend der folgenden Versuche besitzt. Daher ist auch er nicht herangezogen worden.

Tabelle 4: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 1

	Meßwerte an GA 1			Errechnet		Abweichung		korrigierte Meßwerte			
	O <sub>2</sub> -Konz. <sub>fe</sub> [ Vol.-% ]	CO <sub>2</sub> -Konz. <sub>fe</sub> [ Vol.-% ]	H <sub>2</sub> O-Konz. [ Vol.-% ]	CO <sub>2</sub> -Konz. [ Vol.-% ]	H <sub>2</sub> O-Konz. [ Vol.-% ]	CO <sub>2</sub> [ % ]	H <sub>2</sub> O [ % ]	CO <sub>2</sub> -Konz. [ Vol.-% ]	rel. Differenz [ % ]	H <sub>2</sub> O-Konz. [ Vol.-% ]	rel. Differenz [ % ]
2116_01	10,80	9,20	14,7	9,64	13,84	4,78	-5,85				
2116_02	9,35	10,70	11,9	11,24	11,98	5,05	0,67				
2116_04	10,87	10,13	12,4	9,51	12,35	-6,12	-0,40	9,48	-0,27	12,18	-1,38
2116_05	8,60	12,40	14,5	11,59	13,71	-6,53	-5,45	11,61	0,17	14,24	3,88
2116_06	9,10	11,90	14,9	11,18	14,39	-6,05	-3,42	11,14	-0,34	14,63	1,70
2116_07	10,50	10,50	13,0	9,79	13,28	-6,76	2,15	9,83	0,42	12,77	-3,85
2116_01: (reines Holz)						-6,37	-1,78				
						(ohne 01, 02)					

Auffällig ist, dass bei den Versuchen 04 bis 07 der Messwert für CO<sub>2</sub> bei der relativen Abweichung ( $(\text{Sollwert}-\text{Messwert})/\text{Messwert} \cdot 100$ ) in einem sehr geringen Bereich von 6,12 bis 6,76 % oberhalb des Sollwertes liegt. Korrigiert man die Messwerte mit dem Mittelwert von -6,37 %, stimmen die korrigierten Messwerte sehr genau mit den realen Messwerten überein.

Bei der H<sub>2</sub>O-Konzentration ist kein Trend ablesbar. Die relative Abweichung schwankt zwischen -5,45 und +2,15 %.

Zur Messstelle GA 2 steigt der O<sub>2</sub>-Gehalt bei jedem Versuchspunkt leicht an (s. Tabelle 5). Damit ist zu erwarten, dass die CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Konzentrationen sinken. Dies ist auch der Fall.

Tabelle 5: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 2

	Meßwerte an GA 2			Errechnet		Abweichung		korrigierte Meßwerte				
	O <sub>2</sub> -Konz. <sub>fe</sub> [ Vol.-% ]	CO <sub>2</sub> -Konz. <sub>fe</sub> [ Vol.-% ]	H <sub>2</sub> O-Konz. [ Vol.-% ]	CO <sub>2</sub> -Konz. [ Vol.-% ]	H <sub>2</sub> O-Konz. [ Vol.-% ]	CO <sub>2</sub> [ % ]	H <sub>2</sub> O [ % ]	CO <sub>2</sub> -Konz. [ Vol.-% ]	rel. Differenz [ % ]	H <sub>2</sub> O-Konz. [ Vol.-% ]	rel. Differenz [ % ]	
2116_01	11,32	8,42	14,1	9,14	13,26	8,55	-5,96					
2116_02	9,72	9,81	11,6	10,88	11,66	10,91	0,52					
2116_04	11,19	8,43	11,9	9,22	12,04	9,37	1,18	8,99	-2,46	11,67	-3,04	
2116_05	9,80	9,71	13,1	10,46	12,62	7,72	-3,66	10,36	-0,97	12,85	1,83	
2116_06	10,25	9,33	13,5	10,10	13,24	8,25	-1,93	9,95	-1,45	13,24	0,03	
2116_07	11,51	8,72	11,8	8,84	12,23	1,38	3,64	9,30	5,23	11,58	-5,35	
						Ø:	6,68	-0,19				
						(ohne 01, 02)						

Auffällig ist, dass nun die relative Abweichung beim CO<sub>2</sub>-Wert deutlich positiv ist bei einem Mittelwert von +6,68 %.

An Messstelle 3 steigt der O<sub>2</sub>-Gehalt deutlich an (s. Tabelle 6). Verursacht wird er vermutlich über einen deutlichen Falschlufteintrag über den Gas-/Gaswärmetaucher im Abgasweg.

Tabelle 6: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 3

	Meßwerte an GA 3			Errechnet		Abweichung		korrigierte Meßwerte			
	O <sub>2</sub> -Konz. <sub>fe</sub>	CO <sub>2</sub> -Konz. <sub>fe</sub>	H <sub>2</sub> O-Konz.	CO <sub>2</sub> -Konz.	H <sub>2</sub> O-Konz.	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> -Konz.	rel. Differenz	H <sub>2</sub> O-Konz.	rel. Differenz
	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ % ]		[ Vol.-% ]	[ % ]	[ Vol.-% ]	[ % ]
2116_01	13,05	8,13	12	7,51	11,29	-7,63	-5,92				
2116_02	12,66	8,63	9,0	8,04	9,09	-6,84	1,00				
2116_04	13,55	7,73	9,4	6,99	9,59	-9,57	2,02	7,15	2,34	9,70	1,16
2116_05	12,03	8,81	10,9	8,37	10,51	-4,99	-3,58	8,15	-2,60	11,25	7,03
2116_06	12,40	8,48	11,2	8,07	11,03	-4,83	-1,52	7,85	-2,76	11,56	4,79
2116_07	13,28	8,04	9,9	7,20	10,33	-10,45	4,34	7,44	3,34	10,22	-1,10
	Ø:					-7,46	0,32				
						(ohne 01, 02)					

Auffällig ist, dass wie an GA 1 auch, der CO<sub>2</sub>-Messwert oberhalb des Sollwertes liegt. Die mittlere Abweichung liegt bei -7,46 %.

#### 4.2.5.2.2 Versuchswochen KW. 39 in 2021

In der Versuchswochen wurde Tetra Pak als typisches Verbundmaterial in die Brennstoffpalette aufgenommen. Hinzu kamen ebenfalls die sortenreinen Kunststoffe PE und PET. Die Verbrennung der verschiedenen Brennstoffmischungen wurde bei stationären Betriebszuständen, aber unterschiedlichen Prozessparametern (Feuerungswärmeleistung, λ-Wert, Luftverteilung) durchgeführt.

In Tabelle 7 spiegeln sich die Prozessparameter sofort am gemessenen O<sub>2</sub>-Gehalt wider. Man erkennt eine hohe Variation von 5,29 bis 12,44 Vol.-%<sub>tr</sub>. Zur Erläuterung der Nomenklatur: Die ersten vier Ziffern geben Jahr und Kalenderwoche an, dann folgt die Nummer der Brennstoffmischung und die letzte Ziffer kennzeichnet eine Änderung der o.g. Prozessparameter.

Tabelle 7: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 1

	Meßwerte an GA 1			Errechnet		Abweichung		korrigierte Meßwerte			
	O <sub>2</sub> -Konz. <sub>tr</sub>	CO <sub>2</sub> -Konz. <sub>tr</sub>	H <sub>2</sub> O-Konz.	CO <sub>2</sub> -Konz.	H <sub>2</sub> O-Konz.	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> -Konz.	rel. Differenz	H <sub>2</sub> O-Konz.	rel. Differenz
	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ % ]		[ Vol.-% ]	[ % ]	[ Vol.-% ]	[ % ]
2139_01	8,93	11,93	11,2	11,44	15,89	-4,13	41,88	11,22	-1,94		
2139_02	9,22	11,58	14,7	11,03	16,23	-4,74	10,41	10,88	-1,32	15,31	-5,70
2139_03.1	10,38	10,49	9,7	10,12	9,92	-3,56	2,27	9,86	-2,52	10,10	1,81
2139_03.2	5,97	14,11	13,9	14,32	13,19	1,50	-5,11	13,26	-7,38	14,47	9,72
2139_03.3	11,62	9,20	8,7	8,97	8,99	-2,51	3,33	8,65	-3,57	9,06	0,76
2139_04.1	9,64	11,81	10,3	9,96	10,15	-15,68	-1,46				
2139_04.2	5,81	15,41	13,0	13,32	12,88	-13,58	-0,92				
2139_04.3	12,44	9,06	7,7	7,50	8,04	-17,26	4,42				
2139_05.1	10,50	10,92	9,6	9,80	10,22	-10,24	6,46	10,26	4,74	10,00	-2,20
2139_05.2	5,29	15,48	14,2	14,68	14,22	-5,15	0,14	14,55	-0,88	14,79	3,97
2139_05.3	12,04	9,20	9,2	8,36	8,98	-9,15	-2,39	8,65	3,48	9,58	6,67
2139_06	9,19	11,05	10,9	10,12	11,96	-8,45	9,72	10,39	2,69	11,35	-5,11
2139_07	8,73	12,13	11,8	11,34	11,46	-6,48	-2,88	11,40	0,52	12,29	7,21
2139_08	9,34	11,67	11,6	10,72	12,06	-8,10	3,97	10,97	2,30	12,08	0,15
2139_09.1	10,03	11,00	10,8	10,08	11,47	-8,33	6,20	10,34	2,56	11,24	-1,96
2139_09.2	10,11	10,83	10,5	10,01	11,40	-7,54	8,57	10,18	1,68	10,93	-4,10
2139_09.3	8,79	12,06	11,1	11,22	12,53	-6,98	12,88	11,34	1,07	11,56	-7,76
	Ø:					-5,99	4,12				
						(ohne 2139_01)					
						(ohne Versuche 04)					

Beim CO<sub>2</sub>-Wert liegt die relative Abweichung ähnlich wie in der letzten Versuchswochen; zahlenmäßig diesmal bei einem Mittelwert von -5,99 %. Auffällig ist, dass die drei Werte des Versuches 04 komplett und in der gleichen Richtung daneben liegen. Dies weist darauf hin, dass

die Brennstoffmischung real anders war als für die Berechnung angenommen. Daher wurde der Versuch aus der Auswertung herausgenommen.

Während des Versuchsbetriebes wurde festgestellt, dass die Sauerstoffmessung an GA 2 defekt war. Sie war ab Versuch 07 wieder einsatzbereit. Daher wurde ein Behelf dadurch hergestellt, dass mit dem errechneten Falschluffstrom aus Versuch 16.2021 aus der O<sub>2</sub>-Messung in GA 1 auf den Wert für GA 2 geschlossen wurde. Dies stellt die erste Spalte in Tabelle 8 dar.

**Tabelle 8: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 2**

		Meßwerte an GA 2			Errechnet		Abweichung		korrigierte Meßwerte			
		O <sub>2</sub> -Konz. <sub>tr</sub>	CO <sub>2</sub> -Konz. <sub>tr</sub>	H <sub>2</sub> O-Konz.	CO <sub>2</sub> -Konz. <sup>1)</sup>	H <sub>2</sub> O-Konz.	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> -Konz.	rel. Differenz	H <sub>2</sub> O-Konz.	rel. Differenz
		[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ % ]		[ Vol.-% ]	[ % ]	[ Vol.-% ]	[ % ]
9,78	2139_01	8,4	9,95	11,5	10,60	14,95	6,54	30,00	10,47	-1,18		
10,10	2139_02	8,8	9,63	15,0	10,19	15,23	5,81	1,53	10,14	-0,50	14,83	-2,65
11,36	2139_03.1	10,1	8,61	9,9	9,20	9,17	6,85	-7,37	9,07	-1,47	9,79	6,71
6,54	2139_03.2	5,7	11,96	14,1	13,94	12,90	16,56	-8,51	12,59	-9,68	13,94	8,03
12,73	2139_03.3	11,3	7,55	8,9	7,89	8,09	4,55	-9,10	7,94	0,70	8,80	8,74
10,55	2139_04.1	9,4	9,77	10,3	9,16	9,48	-6,22	-7,96				
6,36	2139_04.2	5,6	13,11	13,1	12,84	12,50	-2,08	-4,58				
13,62	2139_04.3	12,3	7,33	7,8	6,46	7,13	-11,84	-8,59				
11,49	2139_05.1	10,3	8,93	9,7	8,87	9,42	-0,63	-2,89	9,40	5,95	9,59	1,78
5,80	2139_05.2	5,2	13,13	14,2	14,20	13,84	8,15	-2,54	13,82	-2,65	14,04	1,41
13,19	2139_05.3	11,9	7,46	9,3	7,28	8,02	-2,38	-13,76	7,85	7,85	9,19	14,61
10,06	2139_06	8,9	9,19	11,0	9,38	11,24	2,03	2,18	9,68	3,19	10,87	-3,27
	2139_07	9,57	10,17	11,0	10,57	10,81	3,97	-1,73	10,50	-0,69	11,76	8,78
	2139_08	10,27	9,59	10,7	9,86	11,27	2,86	5,33	9,90	0,38	11,44	1,49
	2139_09.1	10,74	9,18	10,1	9,42	10,86	2,64	7,52	9,48	0,59	10,80	-0,58
	2139_09.2	10,86	9,00	9,8	9,32	10,76	3,52	9,80	9,30	-0,26	10,48	-2,64
	2139_09.3	9,76	10,00	10,3	10,33	11,70	3,28	13,59	10,33	-0,02	11,01	-5,89
							Ø:	5,28	-1,16	(02 bis 06 ohne 04)		
							Ø:	3,25	6,90	(07 bis 09)		

**Orange:** Um 9,5 % nach oben korrigierte Meßwerte entsprechend Falschluffeintrag von 07 bis 9 sowie der Falschluffeinträge der letzten Versuche in KW. 16

<sup>1)</sup> Gerechnet mit den orange markierten O<sub>2</sub>-Werten

Wieder fällt auf, dass die relative Abweichung beim CO<sub>2</sub>-Wert positiv ist. Der H<sub>2</sub>O-Wert schwankt ohne Tendenz im niedrigen einstelligen Bereich. Das sich Änderungen des λ-Wertes oder der Luftverteilung irgendwie auswirken, ist erwartungsgemäß nicht festzustellen.

Das Ergebnis für GA 3 aus der letzten Versuchswoche bestätigt sich (s. Tabelle 9).

Tabelle 9: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 3

	Meßwerte an GA 3			Errechnet		Abweichung		korrigierte Meßwerte			
	O <sub>2</sub> -Konz. <sub>tr</sub>	CO <sub>2</sub> -Konz. <sub>tr</sub>	H <sub>2</sub> O-Konz.	CO <sub>2</sub> -Konz.	H <sub>2</sub> O-Konz.	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> -Konz.	rel. Differenz	H <sub>2</sub> O-Konz.	rel. Differenz
	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ % ]		[ Vol.-% ]	[ % ]	[ Vol.-% ]	[ % ]
2139_01	11,05	10,22	9,5	9,45	13,62	-7,54	43,37	9,53	0,85		
2139_02	11,44	9,78	12,3	8,97	13,74	-8,31	11,71	9,12	1,69	12,97	-5,64
2139_03.1	12,50	8,41	8,0	8,11	8,27	-3,62	3,37	7,85	-3,26	8,43	1,97
2139_03.2	9,63	10,94	11,1	10,88	10,53	-0,54	-5,14	10,20	-6,25	11,70	11,12
2139_03.3	13,21	7,60	7,4	7,44	7,71	-2,15	4,19	7,09	-4,71	7,80	1,17
2139_04.1	11,83	9,60	8,5	8,04	8,51	-16,21	0,12				
2139_04.2	9,79	11,72	10,1	9,83	10,04	-16,15	-0,59				
2139_04.3	13,91	7,48	6,5	6,22	5,79	-16,83	-10,92				
2139_05.1	13,07	8,27	7,5	7,40	8,12	-10,57	8,27	7,71	4,26	7,91	-2,64
2139_05.2	10,29	10,90	10,3	10,00	10,40	-8,25	0,97	10,16	1,63	10,86	4,40
2139_05.3	14,12	7,02	7,3	6,41	7,23	-8,73	-0,96	6,55	2,16	7,69	6,43
2139_06	11,88	8,60	8,7	7,82	9,68	-9,06	11,26	8,02	2,53	9,17	-5,26
2139_07	11,66	9,28	9,3	8,64	9,17	-6,89	-1,40	8,65	0,14	9,80	6,90
2139_08	12,23	8,74	9,0	8,06	9,55	-7,75	6,11	8,15	1,07	9,49	-0,66
2139_09.1	12,42	8,54	8,7	7,89	9,38	-7,60	7,82	7,96	0,91	9,17	-2,23
2139_09.2	12,07	8,81	8,8	8,20	9,69	-6,92	10,11	8,21	0,17	9,28	-4,27
2139_09.3	11,16	9,68	9,2	9,04	10,49	-6,64	14,02	9,03	-0,13	9,70	-7,55
						Ø: -6,76	5,41				
											(ohne 2139_01)
											(ohne Versuche 04)

#### 4.2.5.2.3 Versuchswoche KW. 17 in 2022

In dieser Versuchswoche sollte der im Antrag sog. „Instationäre Betrieb“ durchgeführt werden. Dies geschah dadurch, dass während eines stationären Betriebes aus dem kleinen Zusatzbunker einmalig eine bestimmte Menge einer Brennstofffraktion aufgegeben wurde. Außerdem wurde bei den Versuchen 10 bis 12 Rezigasbetrieb realisiert. Der Anteil des zurückgeführten Rauchgases variierte von Versuch zu Versuch.

Die Ergebnisse für O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O an Messstelle GA 1 im stationären Betrieb (soweit als möglich) zeigt Tabelle 10. Es ist deutlich zu sehen, dass bei den Versuchen 02, 03, 05 und 08 keine Auswertung möglich ist.

Es bestätigen sich die Tendenzen aus den beiden vorhergehenden Versuchswochen.

Die Schlussfolgerung kann auch für die Messstellen GA 2 und 3 gezogen werden (s. Tabelle 11 und Tabelle 12). Eine Auswirkung des Rezigasbetriebes ist nicht festzustellen.

Tabelle 10: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 1

	Meßwerte an GA 1			Errechnet		Abweichung		korrigierte Meßwerte			
	O <sub>2</sub> -Konz. <sub>tr</sub>	CO <sub>2</sub> -Konz. <sub>tr</sub>	H <sub>2</sub> O-Konz.	CO <sub>2</sub> -Konz.	H <sub>2</sub> O-Konz.	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> -Konz.	rel. Differenz	H <sub>2</sub> O-Konz.	rel. Differenz
	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ % ]		[ Vol.-% ]	[ % ]	[ Vol.-% ]	[ % ]
2217_01	11,2	10,30	13,9	9,27	14,16	-10,00	1,87	9,47	2,13	14,39	1,64
2217_02	7,0	14,4	20,6	12,19	17,84	-15,46	-13,40				
2217_03	3,0	16,5	21	16,90	19,44	2,42	-7,43				
2217_05	9,7	10,3	10,1	10,59	16,70	2,82	65,35				
2217_06	9,0	12,1	12,7	11,02	13,13	-8,93	3,39	11,12	0,93	13,15	0,15
2217_07	8,2	12,6	13,3	11,76	13,80	-6,67	3,76	11,58	-1,51	13,77	-0,21
2217_08	10,8	10,3	10,7	8,77	9,96	-14,85	-6,92				
2217_09	8,3	12,5	12,9	11,70	13,15	-6,40	1,94	11,49	-1,79	13,36	1,57
Rezi 2217_10	8,8	12,2	12,4	11,24	13,29	-7,87	7,18	11,21	-0,23	12,84	-3,39
2217_11	6,0	14,7	14,8	13,84	15,22	-5,85	2,84	13,51	-2,37	15,32	0,68
2217_12	8,7	12,3	12,4	11,33	13,50	-7,89	8,87	11,31	-0,21	12,84	-4,90
						Ø: -7,66	4,26				
											(ohne 02,03,05,08)

Tabelle 11: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 2

	Meßwerte an GA 2			Errechnet		Abweichung		korrigierte Meßwerte				
	O <sub>2</sub> -Konz. <sub>tr</sub>	CO <sub>2</sub> -Konz. <sub>tr</sub>	H <sub>2</sub> O-Konz.	CO <sub>2</sub> -Konz.	H <sub>2</sub> O-Konz.	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> -Konz.	rel. Differenz	H <sub>2</sub> O-Konz.	rel. Differenz	
	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ % ]	[ % ]	[ Vol.-% ]	[ % ]	[ Vol.-% ]	[ % ]	
	2217_01	11,9	8,50	12,9	8,6	13,33	1,18	3,33	8,67	0,86	13,49	1,17
	2217_02	8,2	12,1	19,1	11,14	16,62	-7,93	-12,98				
	2217_03	4,6	14,1	19,4	13,40	18,07	-4,96	-6,86				
	2217_05	10,6	9,7	9,4	9,74	15,62	0,41	66,17				
	2217_06	9,9	10,0	11,8	10,19	12,32	1,90	4,41	10,21	0,15	12,34	0,13
	2217_07	9,3	10,4	12,2	10,75	12,82	3,37	5,08	10,61	-1,27	12,75	-0,52
	2217_08	11,6	8,5	10	8,08	9,31	-4,94	-6,90				
	2217_09	9,2	10,4	12	10,87	12,38	4,52	3,17	10,61	-2,36	12,54	1,33
Rezi	2217_10	9,6	10,3	11,6	10,51	12,57	2,04	8,36	10,51	0,01	12,13	-3,53
	2217_11	7,2	12,4	13,7	12,73	14,23	2,66	3,87	12,65	-0,60	14,32	0,65
	2217_12	9,7	10,2	11,6	10,41	12,60	2,06	8,62	10,41	-0,01	12,13	-3,76
							Ø:	2,53	5,26			
								(ohne 02,03,05,08)				

Tabelle 12: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 3

	Meßwerte an GA 3			Errechnet		Abweichung		korrigierte Meßwerte				
	O <sub>2</sub> -Konz. <sub>tr</sub>	CO <sub>2</sub> -Konz. <sub>tr</sub>	H <sub>2</sub> O-Konz.	CO <sub>2</sub> -Konz.	H <sub>2</sub> O-Konz.	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> -Konz.	rel. Differenz	H <sub>2</sub> O-Konz.	rel. Differenz	
	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ % ]	[ % ]	[ Vol.-% ]	[ % ]	[ Vol.-% ]	[ % ]	
	2217_01	12,9	8,3	11,7	7,65	12,12	-7,83	3,59	7,67	0,22	12,26	1,12
	2217_02	9,8	11,5	17,2	9,75	14,93	-15,22	-13,20				
	2217_03	6,7	13,3	17,5	13,43	16,22	0,98	-7,31				
	2217_05	11,8	9,5	8,5	8,62	14,15	-9,26	66,47				
	2217_06	11,0	10,0	10,8	9,18	11,31	-8,20	4,72	9,24	0,62	11,31	0,03
	2217_07	10,5	10,3	11,2	9,64	11,73	-6,41	4,73	9,51	-1,31	11,73	0,02
	2217_08	13,5	7,5	8,2	6,45	7,74	-14,00	-5,61				
	2217_09	10,9	9,9	10,6	9,30	10,90	-6,06	2,83	9,14	-1,67	11,10	1,87
Rezi	2217_10	10,9	10,1	10,5	9,30	11,38	-7,92	8,38	9,33	0,32	11,00	-3,35
	2217_11	8,8	12,0	12,4	11,26	12,88	-6,17	3,87	11,08	-1,56	12,99	0,85
	2217_12	11,4	9,6	10,0	8,84	11,02	-7,92	10,20	8,87	0,31	10,48	-4,95
							Ø:	-7,21	5,48			
								(ohne 02,03,05,08)				

#### 4.2.5.2.4 Versuchswuche KW. 17 in 2023

In der letzten Versuchswoche wurden ergänzende Versuche durchgeführt. Dabei wurde in den ersten fünf Punkten erneut Rezigasbetrieb angewendet; erst in Punkt 6 wurde er eingestellt.

Die Wassergehaltsmessung im Abgas war während der Versuchswoche vermutlich nicht i.O..

Tabelle 13, Tabelle 14 und Tabelle 15 bestätigen die bisherigen Erkenntnisse.

Tabelle 13: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 1

	Meßwerte an GA 1			Errechnet		Abweichung		korrigierte Meßwerte				
	O <sub>2</sub> -Konz. <sub>tr</sub>	CO <sub>2</sub> -Konz. <sub>tr</sub>	H <sub>2</sub> O-Konz.	CO <sub>2</sub> -Konz.	H <sub>2</sub> O-Konz.	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> -Konz.	rel. Differenz	H <sub>2</sub> O-Konz.	rel. Differenz	
	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ % ]	[ % ]	[ Vol.-% ]	[ % ]	[ Vol.-% ]	[ % ]	
Rezi	2317_01	9,2	12,10	15,4	11,16	15,56	-7,77	1,04	11,09	-0,63		
	2317_03	9,80	10,90	10	10,10	11,88	-7,34	18,80	9,99	-1,09	11,68	-1,72
	2317_04	9,30	11,50	10	10,57	11,91	-8,09	19,10	10,54	-0,29	11,68	-1,96
	2317_05	10,00	11,00	9,8	9,93	11,61	-9,73	18,47	10,08	1,53	11,44	-1,44
	2317_06	9,80	11,90	8,8	10,92	9,74	-8,24	10,68	10,91	-0,13	10,27	5,49
							Ø:	-8,35	16,76			
								(ohne 2317_01)				

Tabelle 14: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 2

		Meßwerte an GA 2			Errechnet		Abweichung		korrigierte Meßwerte			
		O <sub>2</sub> -Konz. <sub>tr</sub>	CO <sub>2</sub> -Konz. <sub>tr</sub>	H <sub>2</sub> O-Konz.	CO <sub>2</sub> -Konz.	H <sub>2</sub> O-Konz.	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> -Konz.	rel. Differenz	H <sub>2</sub> O-Konz.	rel. Differenz
		[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ % ]	[ % ]	[ Vol.-% ]	[ % ]	[ Vol.-% ]	[ % ]
Rezi	2317_01	10,3	10,10	14,1	10,11	14,38	0,10	1,99	10,44	3,30		
	2317_03	10,7	8,90	9,2	9,29	11,09	4,38	20,54	9,20	-0,94	10,88	-1,87
	2317_04	10,2	9,50	9,3	9,76	11,16	2,74	20,00	9,82	0,65	11,00	-1,43
	2317_05	10,6	9,10	9,2	9,39	11,08	3,19	20,43	9,41	0,21	10,88	-1,78
	2317_06	10,4	10,00	8,3	10,33	9,31	3,30	12,17	10,34	0,10	9,82	5,46
	Ø:						3,40	18,29				
							(ohne 2317_01)					

Tabelle 15: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 3

		Meßwerte an GA 3			Errechnet		Abweichung		korrigierte Meßwerte			
		O <sub>2</sub> -Konz. <sub>tr</sub>	CO <sub>2</sub> -Konz. <sub>tr</sub>	H <sub>2</sub> O-Konz.	CO <sub>2</sub> -Konz.	H <sub>2</sub> O-Konz.	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> -Konz.	rel. Differenz	H <sub>2</sub> O-Konz.	rel. Differenz
		[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ Vol.-% ]	[ % ]	[ % ]	[ Vol.-% ]	[ % ]	[ Vol.-% ]	[ % ]
Rezi	2317_01	10,8	10,60	13,7	9,64	13,83	-9,06	0,95	9,85	2,17		
	2317_03	11,4	9,20	8,7	8,65	10,46	-5,98	20,23	8,55	-1,17	10,29	-1,61
	2317_04	11,0	9,70	8,7	9,03	10,47	-6,91	20,34	9,01	-0,19	10,29	-1,71
	2317_05	11,6	9,20	8,5	8,48	10,20	-7,83	20,00	8,55	0,81	10,05	-1,42
	2317_06	11,9	9,60	7,3	8,87	8,22	-7,60	12,60	8,92	0,57	8,64	5,05
	Ø:						-7,08	18,29				
							(ohne 2317_01)					

#### 4.2.5.2.5 Übergreifende Auswertung

Vergleicht man die Ergebnisse der vier Versuchswochen miteinander, so fallen zwei Punkte besonders auf:

1. Die Abweichung des Sollwertes vom Messwert liegt beim Wasser durchschnittlich bei 0 bis +5,5 % an der Messstelle vor dem Gewebefilter und
2. Beim CO<sub>2</sub> ist klar zu erkennen, dass an den GAs 1 und 3 der Messwert oberhalb des Sollwertes liegt, bei GA 2 dagegen darunter. Auffällig ist die ziemlich genaue Übereinstimmung der durchschnittlichen Messfehler an GA 1 und 3.

Quantitativ ist die Beobachtung in Tabelle 16 mit Zahlen hinterlegt.

Tabelle 16: Vergleich von Ist- und Sollwerten für CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O über die Projektdauer

	Rel. Abweichungen vom Sollwert = (Sollwert - Meßwert)/Meßwert * 100 [ % ]					
	GA 1		GA 2		GA 3	
	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
KW. 16.2021	-6,37	-1,78	6,68	-0,19	-7,46	0,32
KW. 39.2021	-5,99	4,12	3,25	6,90	-6,76	5,41
KW. 17.2022	-7,66	4,26	2,53	5,26	-7,21	5,48
KW. 17.2023	-8,35	16,76	3,40	18,29	-7,08	18,29
Ø	-7,09		3,97		-7,13	

Fehler am FTIR

↑ Errechnung aus GA 3
↑ Errechnung aus GA 3
↑ Entscheidene Werte

## zu 1: Messung Wassergehalt

Der Wassergehalt wird nur einmal mit dem FTIR nach dem Wärmetauscher gemessen. Er ist in Tab. 6.2.5-1 der Messstelle GA 3 zugeordnet. Die Umrechnung auf die anderen Messstellen erfolgt über die unterschiedlichen O<sub>2</sub>-Gehalte. Dabei kann ein kleiner Fehler dadurch entstehen, dass über der Strecke des Filterschichtadsorbers inkl. Gewebefilter Falschluff eintreten kann.

Besonders zu beachten aber ist, dass die vier Versuchswochen verteilt über drei Jahre und bei unterschiedlichen Wetterbedingungen durchgeführt wurden. So ist zu erwarten, dass der Wassergehalt in Primär- und Sekundärluft schwankte. Eine beispielhafte Rechnung, wie sich die absolute Luftfeuchtigkeit, gemessen in [g H<sub>2</sub>O / kg trockene Luft], bei einem Versuchspunkt auswirken kann, zeigt Abbildung 25.

Auf der X-Achse ist ein Bereich von 4 bis 16 g H<sub>2</sub>O / kg trockene Luft aufgetragen, wie er in Deutschland über das Jahr gesehen typischerweise auftreten kann. In ChemCAD gerechnet wurde immer mit einem konstanten Wert von 6,2. Der Sollwert an dem Versuchspunkt 9,1, gerechnet für GA 1, würde dann zwischen ca. 11 und 12 Vol.-% H<sub>2</sub>O (blaue Kurve) schwanken. Dies hört sich erst einmal nicht dramatisch an. Die relative Abweichung des Sollwertes vom Messwert aber steigt dann von 4 auf 16,5 % an (orange Kurve). Da das Numerische Fraktionenmodell sehr empfindlich auf Messfehler reagiert, ist eine wichtige **Schlussfolgerung 1**:

Aus Messungen der Außentemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit sollte die absolute Luftfeuchtigkeit errechnet werden. Diese ist in der Bilanzierung ergänzend zur Brennstofffeuchte zu berücksichtigen.

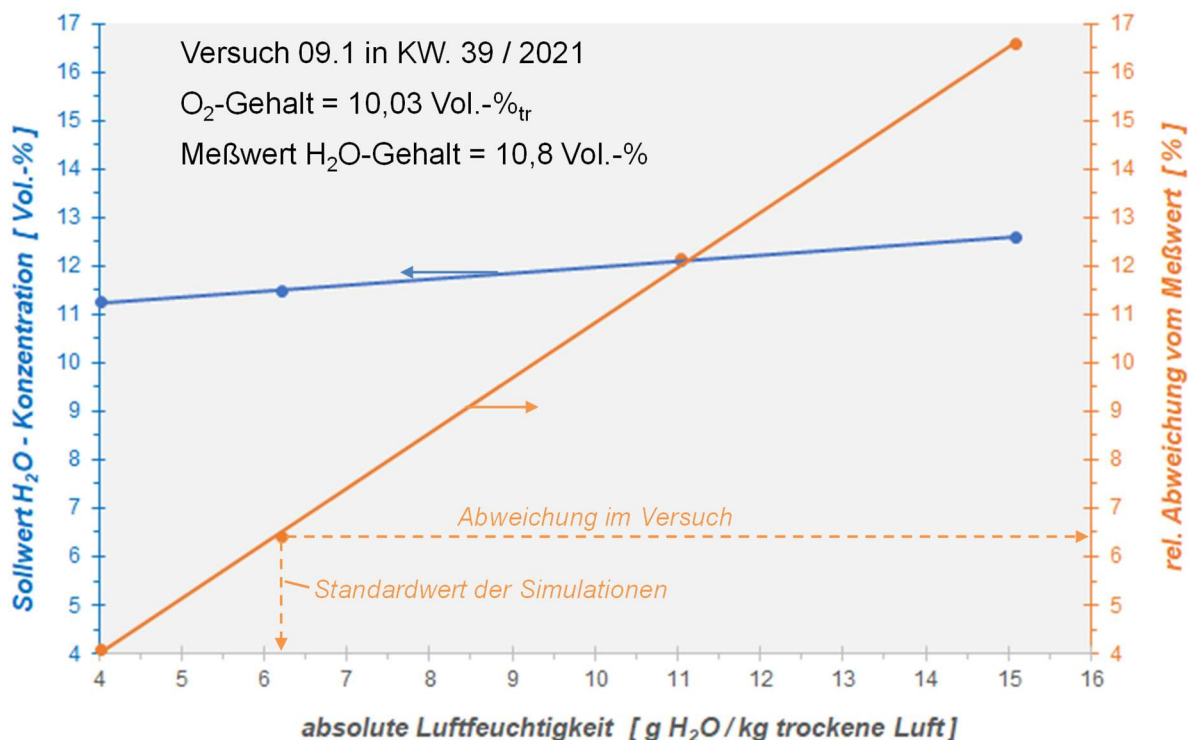


Abbildung 25: Einfluss der absoluten Luftfeuchtigkeit auf den H<sub>2</sub>O-Messwert<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Aufnahmekapazitäten Luft: 5°C = 7 g/m<sup>3</sup>; 30°C = 31 g/m<sup>3</sup> [6]

## zu 2: Messung CO<sub>2</sub>-Gehalt

Um zu überprüfen, ob vielleicht ein Fehler bei der Modellierung vorliegt, wurde mit den experimentellen Daten inkl. der gemessenen Massen- und Volumenströme Verbrennungsrechnungen für alle Versuchspunkte und alle Messstellen durchgeführt. Das Ergebnis zeigt Abbildung 26.

Das blaue Dreieck bildet den errechneten CO<sub>2</sub>-Wert ab. Deutlich zu erkennen ist, dass die Messwerte an den GAs 1 und 3 oberhalb des Sollwertes liegen; die Werte von GA 2 aber darunter. Damit treten die gleichen Tendenzen auf, wie bei der Modellierung. Nur die Zahlenwerte sind anders, da in die Experimentenrechnung auch die absoluten Brennstoff-massenströme eingehen, was einen zusätzlichen Fehler verursacht.

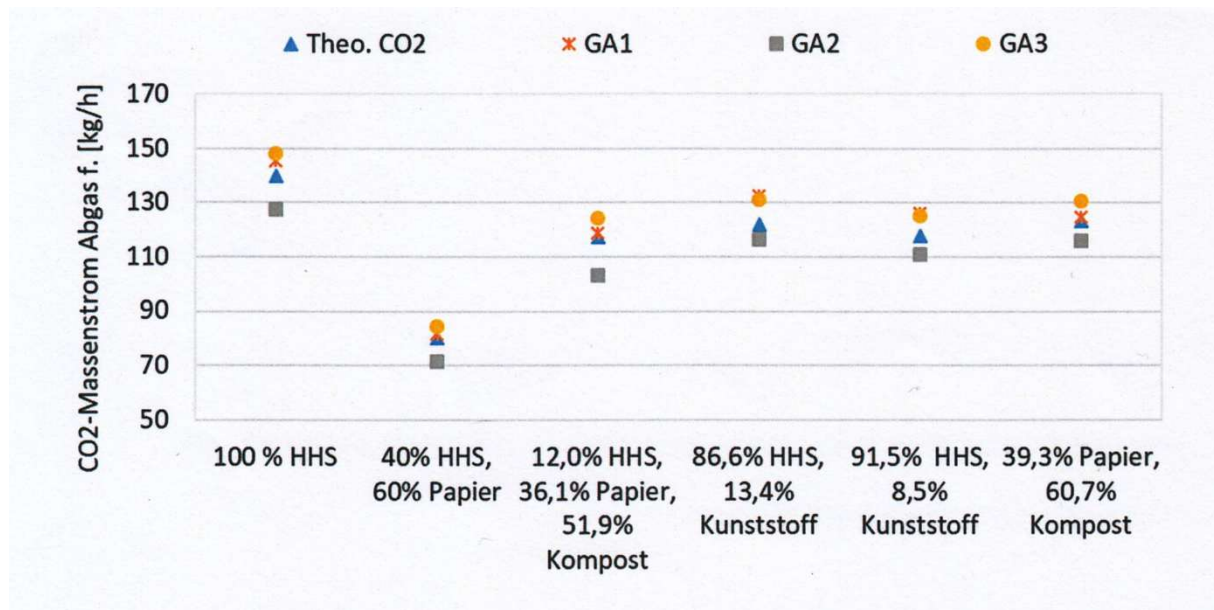


Abbildung 26: Vergleich des CO<sub>2</sub>-Gehalts gemäß Verbrennungsrechnung aus experimentellen Daten mit den Messwerten für die Versuchswoche KW. 16.2021

Dass Messwerte oberhalb eines Sollwertes liegen, ist bei richtig eingestellten Geräten eigentlich unmöglich. Durch Falschluf in der Messleitung kann der Messwert durch Verdünnung nur niedriger werden. Im CUTEC kam daher gegen Ende des Vorhabens ein durch ein Investitionsprojekt angeschaffter Kalibriergasgenerator zum Einsatz. Durch sehr genaue Aufgabe und Verarbeitung von Prüfgas ist er in der Lage, den Sollwert sehr genau vorzugeben. Das Ergebnis für das URAS-Messgerät an GA 1 zeigt Abbildung 27.

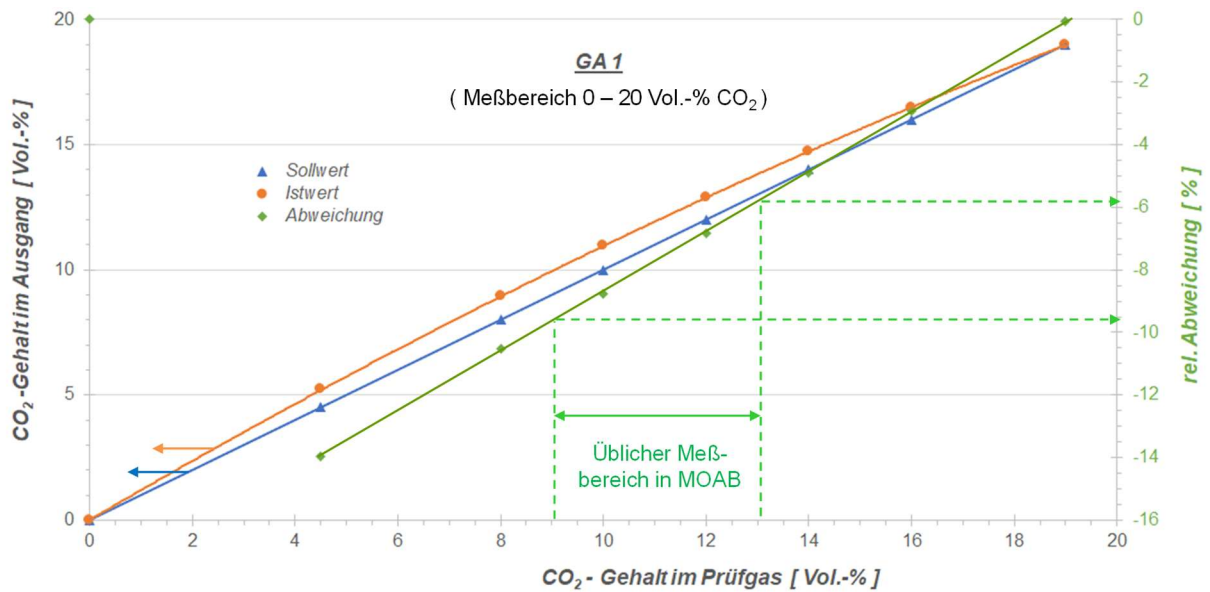


Abbildung 27: Messfehler für CO<sub>2</sub> an GA 1 gemäß Kalibrierung<sup>3</sup>

Die Kurve zeigt zwei Erscheinungen:

1. Anfangs- und Endpunkt stimmen überein und
2. Die Istwertkurve ist nicht linear, so dass der gemessene Wert oberhalb der zugeführten CO<sub>2</sub>-Konzentration liegt.

Die relative Abweichung liegt bei dem in MOAB üblichen Messbereich an GA 1 von 9 bis 13 Vol.-% CO<sub>2</sub> bei 6,0 bis 9,5 %. Es ist offensichtlich, dass bei der Umrechnung gemessener Werte auf den Anzeigewert des Gerätes ein systematischer Fehler vorliegt.

Die für das Messgerät an GA 2 durchgeführte Kalibrierung zeigt Abbildung 28. Mess- und Sollwert sind kaum voneinander zu unterscheiden, d.h. das Gerät ist in Ordnung.

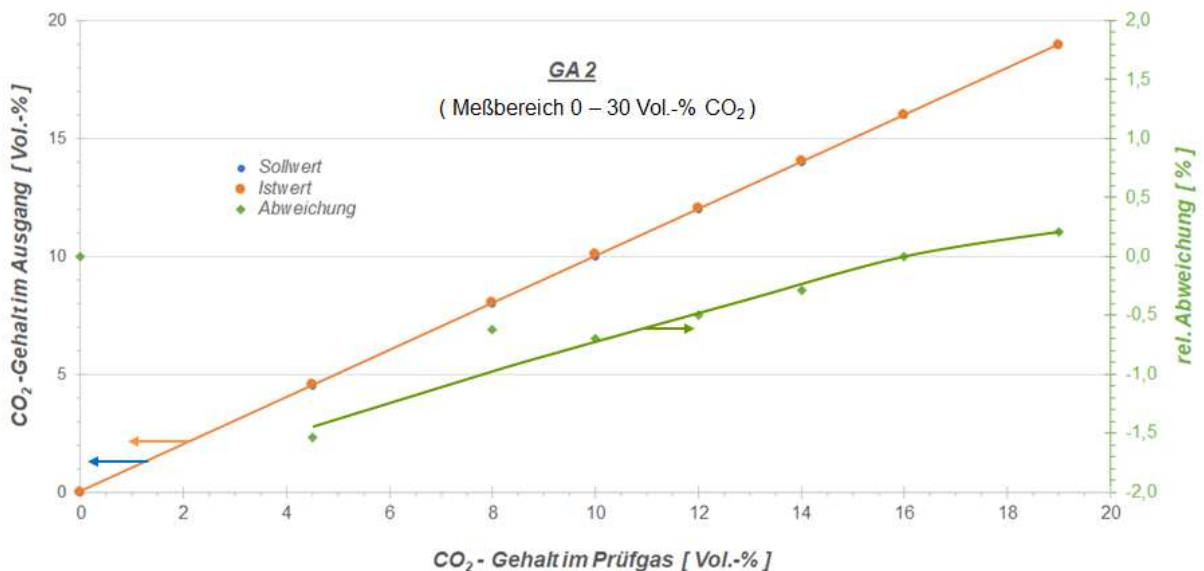


Abbildung 28: Messfehler für CO<sub>2</sub> an GA 2 gemäß Kalibrierung

<sup>3</sup> Eingesetztes Gerät: Kalibriergasgenerator HovaCAL©N 412-MF-C der Fa. IAS - Inspire Analytical Systems (Oberursel)



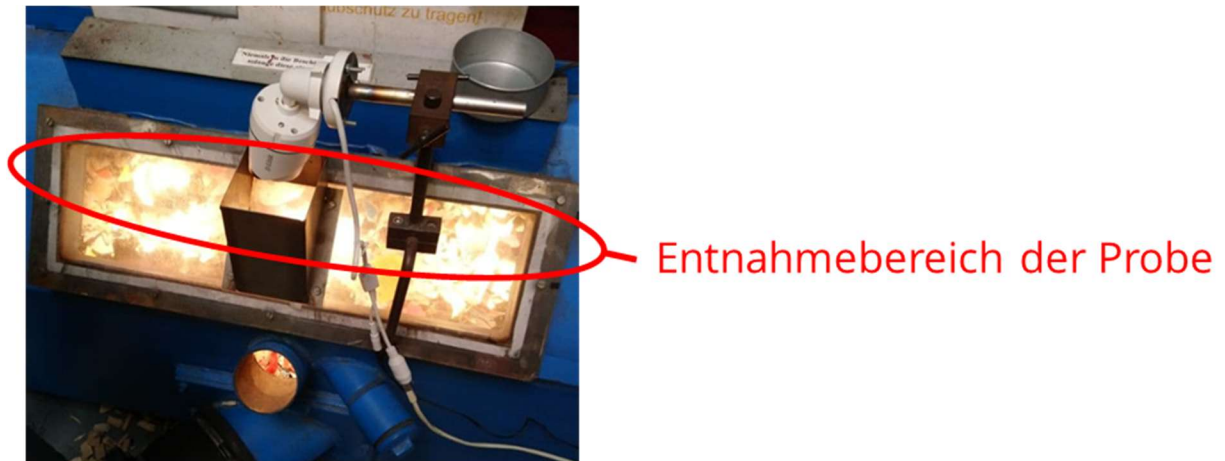


Abbildung 30: Foto des Entnahmebereichs der Proben zur Bestimmung der Brennstoffhomogenität

Beide Proben wurden aus derselben Mulde entnommen, die eine 3-Komponenten-Mischung enthielt. Der gesamte Muldeninhalt bestand aus 17 Ma.-% Holzhackschnitzeln, 33 Ma.-% PPK und 50 Ma.-% Tetra Pak®. Die erste Probe, zu sehen in Abbildung 31, wurde um 9:30 Uhr genommen und bestand aus 10,6 Ma.-% Holzhackschnitzeln, 32,8 Ma.-% Altpapier und 50,0 Ma.-% Tetra Pak®. Die zweite Probenahme, abgebildet in Abbildung 32, erfolgte um 13:00 Uhr. Die Mulde enthielt zu diesem Zeitpunkt nur noch wenig Material. Es wurde eine Zusammensetzung aus 25,7 Ma.-% Holzhackschnitzeln, 36,5 Ma.-% Altpapier und 33,8 Ma.-% Tetra Pak® ermittelt. Zwischen der Zusammensetzung der gesamten Mulde und den Einzelproben bestehen somit Abweichungen. Es ist zu beachten, dass eine repräsentative Probenahme des stückigen Materials schwer umzusetzen war. Dennoch ist davon auszugehen, dass keine durchgängig homogene Mischung der einzelnen Brennstoffbestandteile in den Mulden erreicht werden konnte. In der Auswertung der Berechnungsergebnisse wird deshalb größtenteils auf Mittelwerte über den gesamten Versuchszeitraum zurückgegriffen, bei denen kurzzeitige Schwankungen in der Brennstoffzusammensetzung einen geringen Einfluss aufweisen.

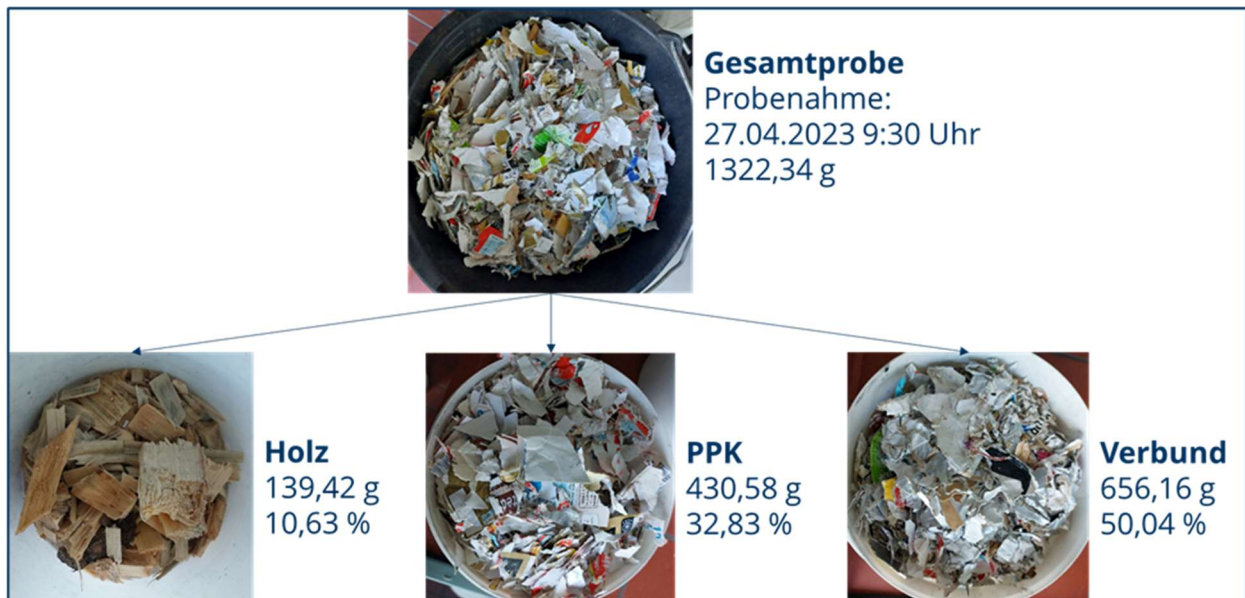


Abbildung 31: Ergebnisse der ersten Sortieranalyse zur Überprüfung der Brennstoffhomogenität

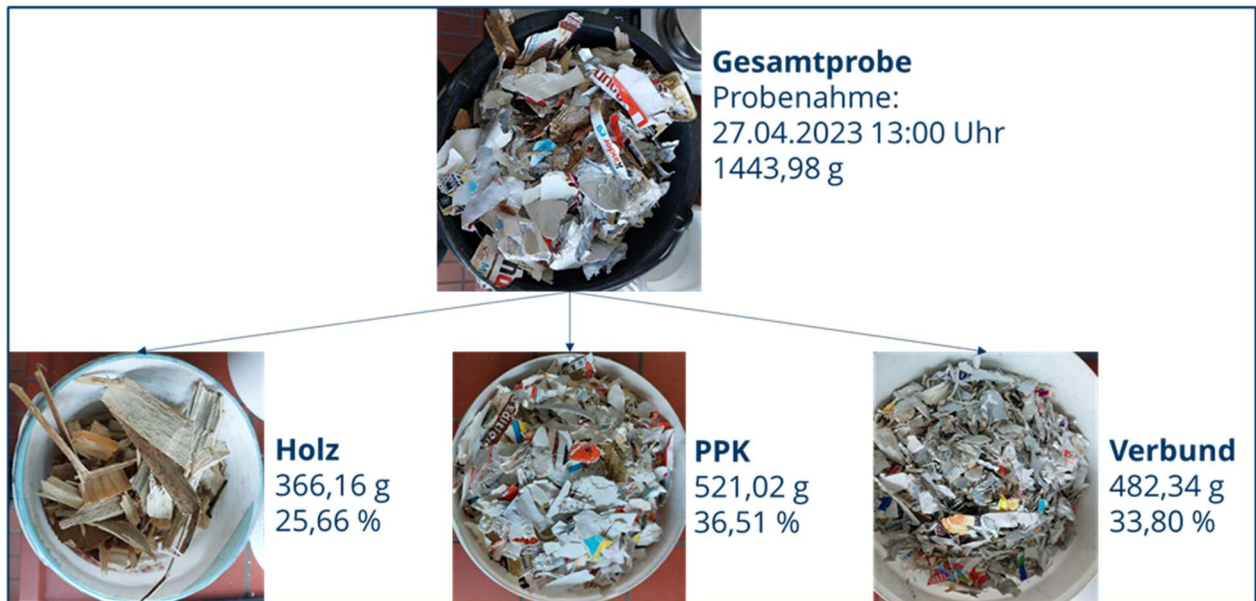


Abbildung 32: Ergebnisse der zweiten Sortieranalyse zur Überprüfung der Brennstoffhomogenität

#### 4.2.6.2 Zustand der Umgebungsluft

Die charakteristischen Parameter der Umgebungsluft werden an der Anlage des CUTEC nicht kontinuierlich gemessen. Dem Verbrennungsprozess werden große Luftmengen in Form von Primär- und Sekundärluft zugeführt bzw. treten als Falschluff in den Prozess ein. Im Projektverlauf bestätigte sich, dass die Lufttemperatur und vor allem die Feuchtigkeit der Umgebungsluft einen nicht zu vernachlässigbaren Einfluss auf die Bilanzierungsergebnisse haben (siehe Kapitel 4.2.5.2.5). Im ersten Schritt wurde deshalb nicht mit konstanten Mittelwerten für die Eigenschaften der Verbrennungsluft gerechnet, sondern reale Messwerte des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Im Rahmen der Versuchswoche KW. 17 in 2023 wurden die Daten des DWD zusätzlich mit Messwerten in der Umgebung der Anlage verglichen. Die Ergebnisse dieses Vergleiches sind in Abbildung 33 und Abbildung 34 dargestellt. Die nächstgelegenen Messstellen des DWD befinden sich in Braunlage und auf dem Brocken. Bereits zwischen den gemessenen Lufttemperaturen und -feuchtigkeiten an beiden Messstellen treten Unterschiede bis 5 °C bzw. 25 % auf, die vor allem mit der unterschiedlichen Höhenlage zu begründen sind. Zusätzlich wurden mit einem Handmessgerät an den vier Versuchstagen der Versuchswoche KW. 17 in 2023 jeweils zwei Messungen durchgeführt. Diese weisen ebenfalls Abweichungen zu den Daten des DWD auf, wobei sie erwartungsgemäß näher an den Werten aus Braunlage liegen.

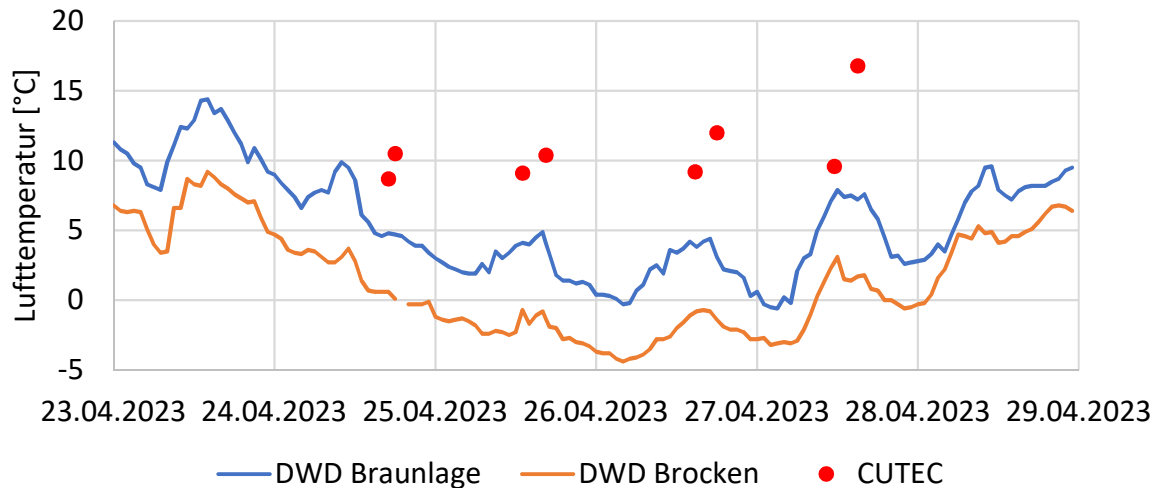


Abbildung 33: Temperatur der Umgebungsluft während Versuchswoche KW. 17 in 2023 aus Messungen des DWD in Braunlage und auf dem Brocken sowie eigene Messungen neben der Anlage des CUTEC

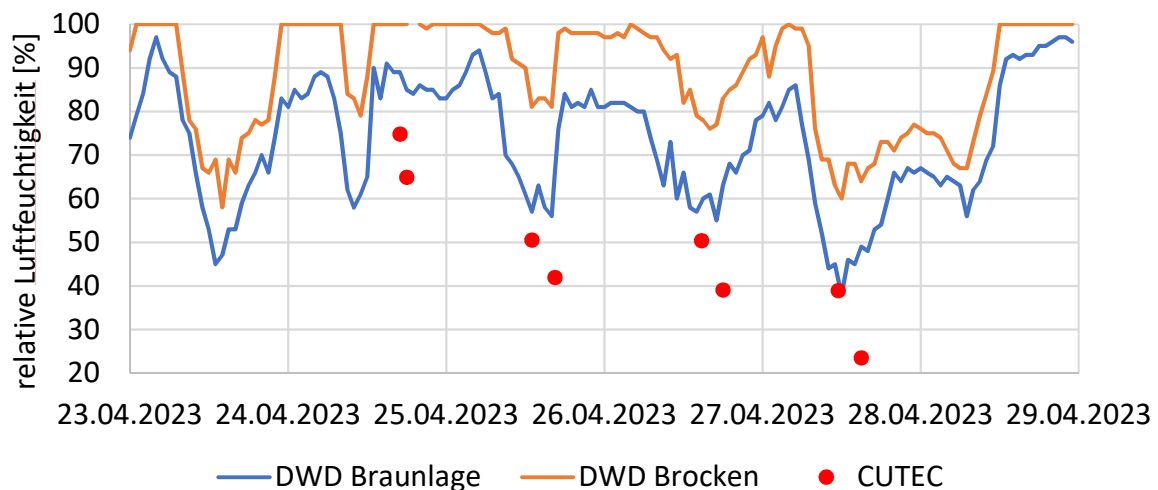


Abbildung 34: Feuchtigkeit der Umgebungsluft während Versuchswoche KW. 17 in 2023 aus Messungen des DWD in Braunlage und auf dem Brocken sowie eigene Messungen neben der Anlage des CUTEC

Weiterhin wurden die Umgebungsluftparameter an verschiedenen Positionen der Anlage, an denen ein Falschlufteintrag erfolgt, aufgenommen und mit den Eigenschaften der Umgebungsluft verglichen (Abbildung 35 und Abbildung 36). Die drei Messstellen in der Halle liegen auf unterschiedlichen Etagen, wobei die Brennstoffzufuhr (BS Zufuhr) oben stattfindet, die Nachbrennkammer (NBK) auf der mittleren Ebene liegt und neben dem Wärmeübertrager vor der Rauchgasreinigung (WÜ) im unteren Bereich gemessen wurde. Neben der NBK traten durchgängig die höchsten Temperaturen auf. Die Temperaturen bei der BS Zufuhr und dem WÜ sind vergleichbar. Alle Temperaturen in der Halle lagen über den Außentemperaturen. Das Verhältnis der Luftfeuchtigkeit ist genau umgekehrt, so dass höhere Temperaturen mit geringerer Luftfeuchtigkeit verbunden sind.

Da die Falschlufthemenge im Vergleich zur eingesetzten Primär- und Sekundärluftmenge gering ist, wurden für die Berechnungen für alle eintretenden Frischluftströme Umgebungsbedingungen außerhalb der Halle angenommen.

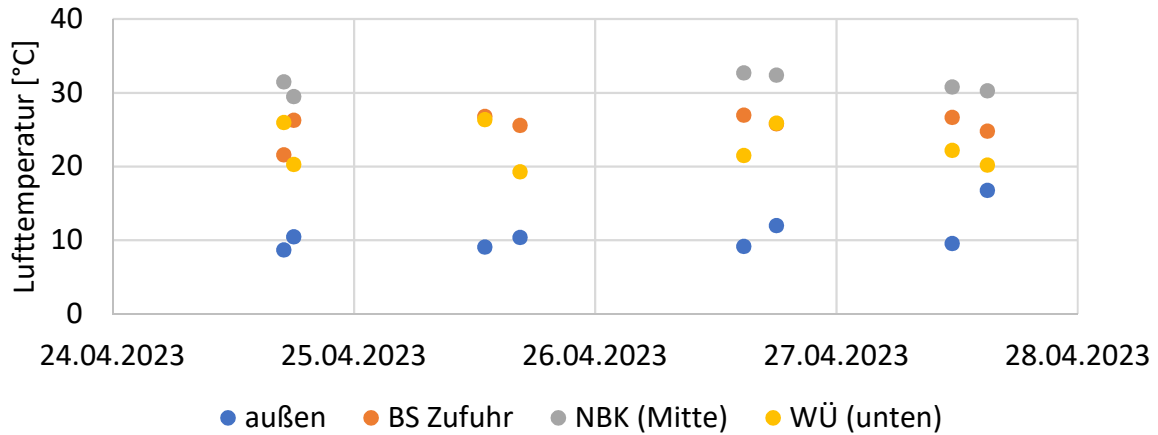


Abbildung 35: Temperatur der Umgebungsluft während Versuchswoche KW. 17 in 2022 außerhalb der Versuchshalle und an verschiedenen Positionen neben der Anlage

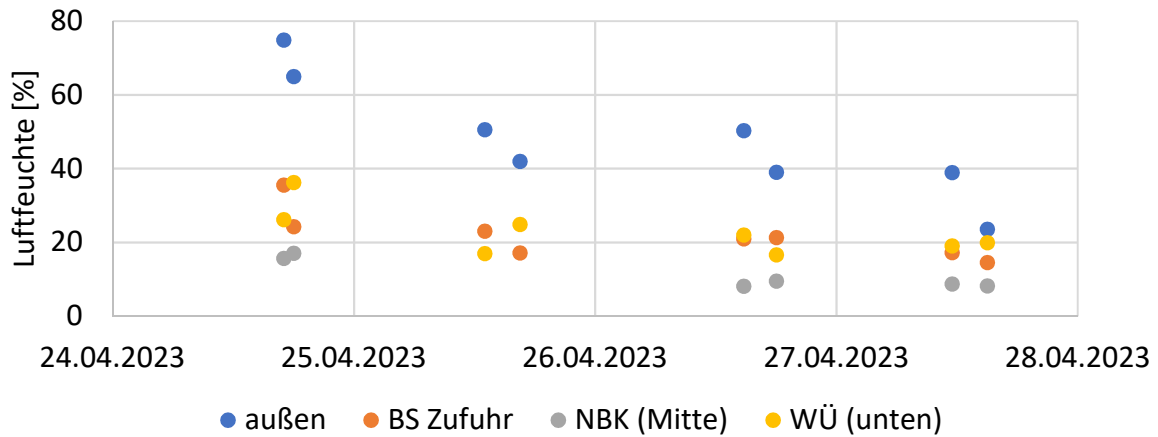
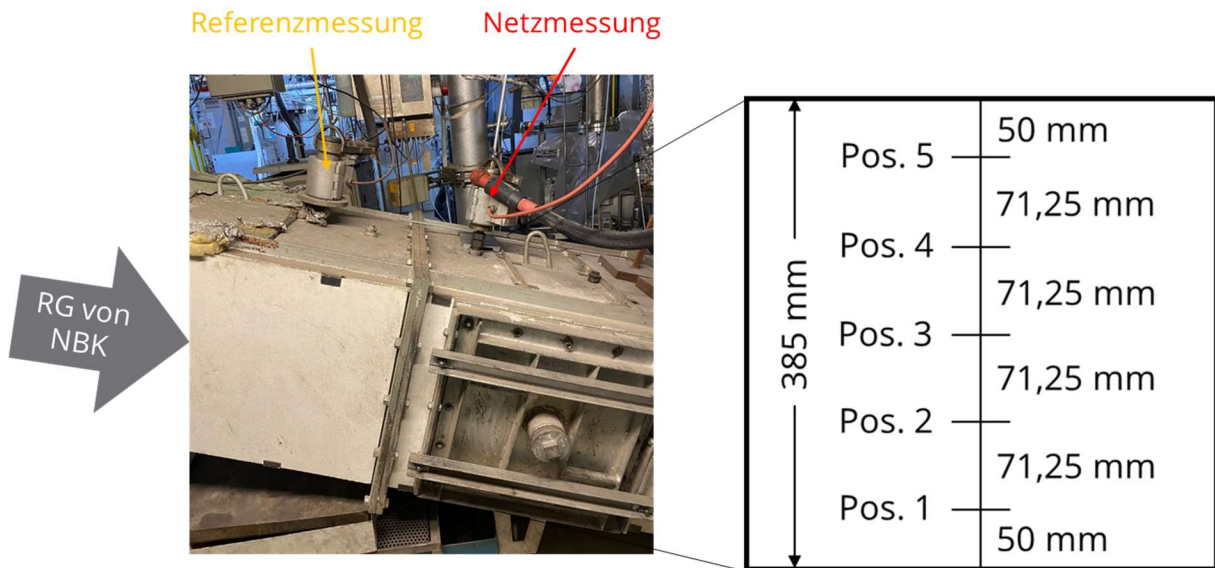


Abbildung 36: Temperatur der Umgebungsluft während Versuchswoche KW. 17 in 2022 außerhalb der Versuchshalle und an verschiedenen Positionen neben der Anlage

#### 4.2.6.3 Prüfung von Strahlenbildung auf die Rauchgasmessung

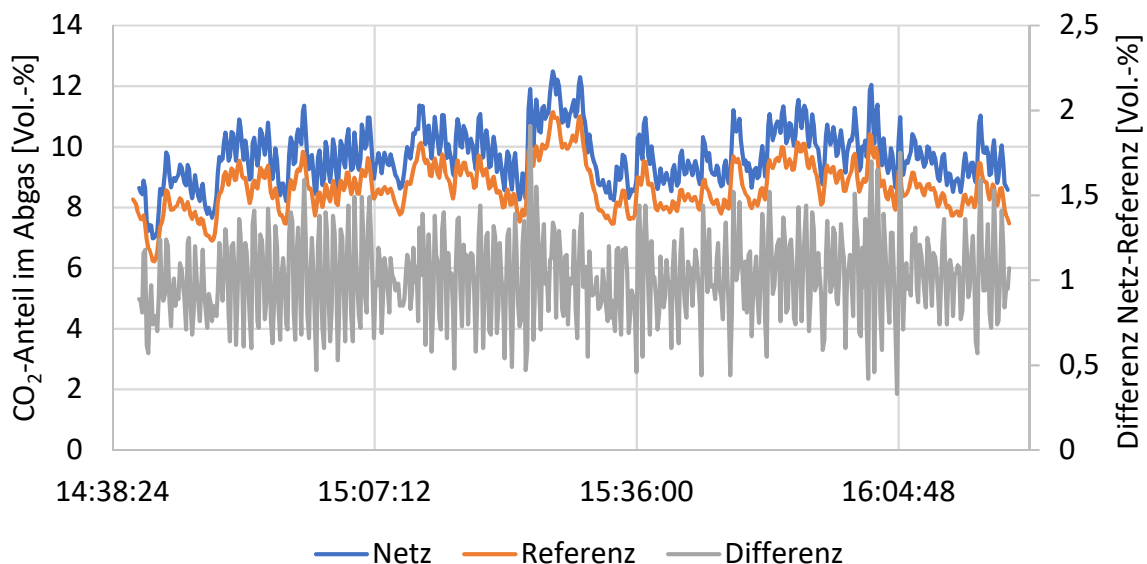
Im Zusammenhang mit der Abgasanalytik wurde im Rahmen der Versuchswoche KW. 17 in 2023 untersucht, ob die Messstelle hinter der NBK von möglicher Strahlenbildung im Rauchgas betroffen ist. Dazu wurde im Rauchgasweg etwa 10 cm hinter der Messstelle GA 2 eine weitere in ihrer Position verstellbare Messsonde installiert. Messung GA 2 wurde in der Kanalmitte belassen, während die andere Messsonde nacheinander auf fünf definierte Höhen im Rauchgaskanal eingestellt und jeweils ca. 15 Minuten dort belassen wurde. Die Messwerte wurden aller 10 Sekunden als Momentanwerte gespeichert. Der Messaufbau sowie die Messpositionen im Rauchgaskanal sind in Abbildung 37 dargestellt.



*Abbildung 37: Messaufbau zur Überprüfung von Strahlenbildung im Rauchgas hinter der NBK*

Zur Auswertung wurden jeweils die CO<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Messwerte der Referenz- und Netzmessung miteinander verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 38 und Abbildung 39 dargestellt. Zusätzlich wurde die Differenz beider Messsignale eingetragen. Die zeitliche Verschiebung beider Messgeräte auf Grund unterschiedlicher Verweilzeiten im Messsystem wurde rechnerisch beglichen.

Auf Grund der Nutzung von Momentan- statt Mittelwerten weisen die Messsignale recht starke Schwankungen auf, die sich auch in den Differenzen beider Messungen wiederfinden. Die Schwankungen treten jedoch für CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> jeweils für den gesamten dargestellten Zeitraum, der alle fünf Sondenpositionen umfasst, um den gleichen Mittelwert auf.



*Abbildung 38: Aufgenommene CO<sub>2</sub>-Anteile im Rauchgas hinter der NBK mit der Referenz- und Vergleichsmessung im Rahmen der Überprüfung auf Strahlenbildung*

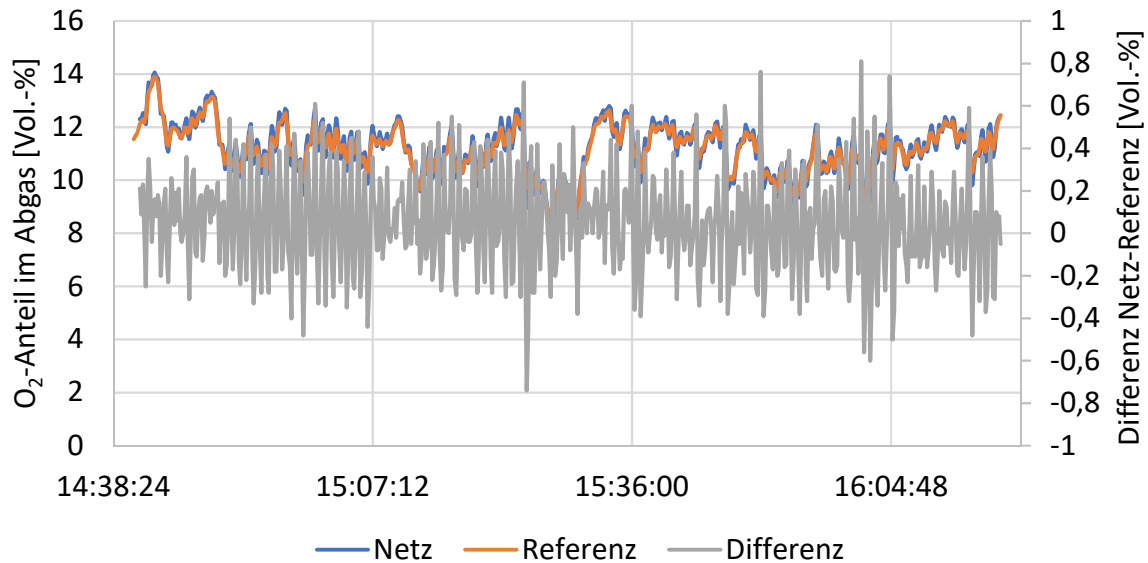


Abbildung 39: Aufgenommene O<sub>2</sub>-Anteile im Rauchgas hinter der NBK mit der Referenz- und Vergleichsmessung im Rahmen der Überprüfung auf Strahlenbildung

Die mittleren Differenzen sind zusätzlich in Tabelle 17 für jede Position der Vergleichssonde aufgetragen. Eine Strahlenbildung konnte damit ausgeschlossen werden.

Auffällig ist jedoch die Abweichung zwischen den Messwerten beider Messgeräte. Während sich für die O<sub>2</sub>-Messung ein vernachlässigbarer Wert von 0,05 Vol.-% ergibt, liegt die Abweichung zwischen beiden CO<sub>2</sub>-Messungen bei ca. 1 Vol.-%. Dies bestätigt die Ergebnisse der ChemCAD-Nachrechnung in Kapitel 4.2.5.2.

Tabelle 17: Differenzen zwischen den Messwerten der Referenz- und Netzmessung für die CO<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Anteile im Rauchgas hinter der NBK bei unterschiedlichen Positionen der Netzmessungssonde

Position	Abstand vom Boden [mm]	Differenz Netz-Referenz [Vol.-%]	
		CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
1	50	0,96	0,07
2	121	1,02	0,06
3	193	1,01	0,06
4	264	1,06	0,03
5	335	1,05	0,01
<b>Mittelwert</b>		<b>1,01</b>	<b>0,05</b>

#### 4.2.7 Schlussfolgerungen für die modelltechnische Auswertung

Die experimentelle Begleitforschung zeigte einige bemerkenswerte Ergebnisse. Im Einzelnen sind festzuhalten:

1. Die Stoffbilanzen bezgl. wichtiger Elemente wie C, H und O in der Auswertung der Experimente sind schlüssig. Es ist weder eine Bildung noch Freisetzung von Inventar aus Rohren oder Feuerraum festzustellen
2. Der H<sub>2</sub>O-Analysewert stellt einen Unsicherheitsfaktor bei der Nutzung im Numerischen Fraktionenmodell dar. Ursachen sind:
  - a) Der Wassergehalt in einer Fraktion kann ungleich verteilt sein, z.B. schicht durch Absinken des Wassers während der Lagerung oder durch Ansammlung der schweren, wasserreichen Teile weiter unten und

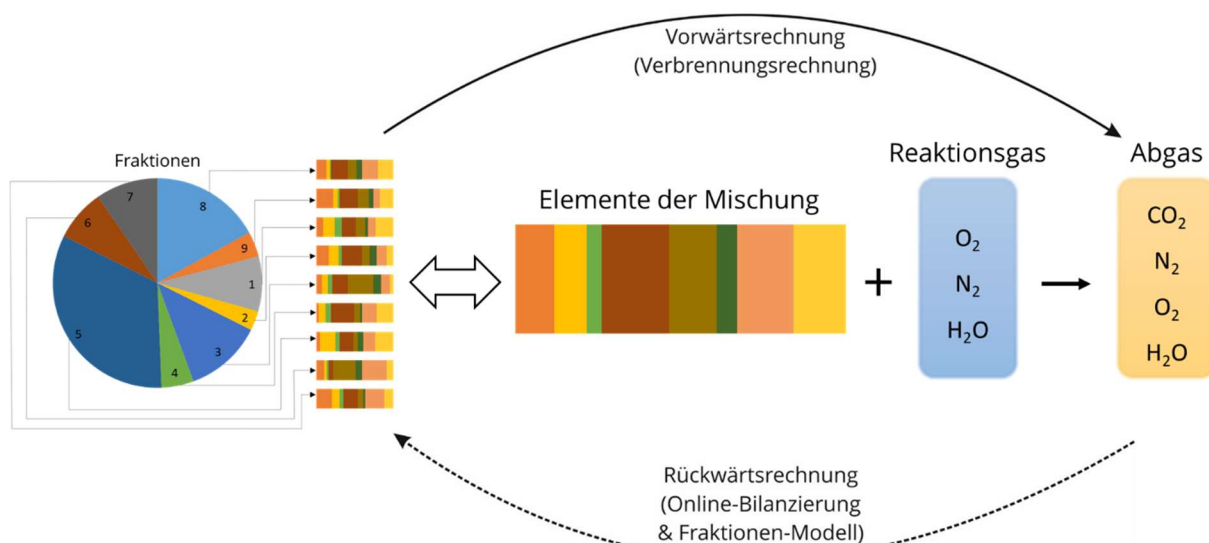
- b) Die Luftfeuchtigkeit von Primär- und Sekundärluft spielt bei der Müllverbrennung eine große Rolle. Die absolute Feuchte ist eine Funktion der Außentemperatur und des Wetters. Ausweg wäre, den Wert ständig zu messen
3. Der O<sub>2</sub>-Messwert ist zuverlässig
4. Chlor ist wegen des 100 %-Übergangs in die Gasphase zur Aufnahme ins Numerische Fraktionenmodell empfehlenswert
5. Kohlenstoff wird zu über 99 % als CO<sub>2</sub> ins Abgas ausgetragen. Der C-Gehalt in Reststoffen in der Bilanz ist vernachlässigbar und damit für das Numerische Fraktionenmodell unwichtig
6. Die Experimente ergaben plausible Zusammenhänge zwischen dem C-Gehalt der Brennstoffe, dem Heizwert und dem CO<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas
7. Bilanzielle Plausibilitätsrechnungen zeigen einen potenziellen Mangel geeicher CO<sub>2</sub>-Messgeräte durch eine unsichere Linearität zwischen den Endwerten im Laufe der Betriebszeit. Folgerung ist, dass eine Korrekturkurve zur rechnerischen Darstellung der Linearität bei den Messgeräten regelmäßig aufgenommen werden sollte

## 4.3 Entwicklung des Modellierungswerkzeugs

### 4.3.1 Erweiterte Online-Bilanzierung

#### 4.3.1.1 Bilanzierung der Rostfeuerungsanlage des CUTEC

Wie in Abbildung 40 dargestellt entspricht die Ermittlung der fraktionsmäßigen Abfallzusammensetzung auf dem Rost einer Umkehrung der Verbrennungsrechnung. Die Rückwärtsrechnung besteht aus zwei hintereinandergeschalteten Modellen. Ausgangspunkt sind die an der Anlage betriebsbegleitend erfassten Messwerte.



*Abbildung 40: Überblick über die Umkehrung der Verbrennungsrechnung mittels erweiterter Online-Bilanzierung und Numerischem Fraktionenmodell*

Im ersten Schritt werden die Eigenschaften der Brennstoffmischung aus den einzelnen Fraktionen mit Hilfe der erweiterten Online-Bilanzierung ermittelt (siehe Abbildung 41). Grundlage dieser Berechnung sind die Massen-, Stoff- und Energiebilanzen um die einzelnen Anlagenteile.

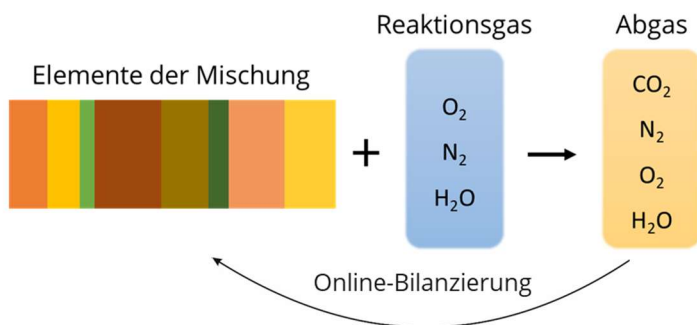


Abbildung 41: Berechnungsschema der erweiterten Online-Bilanzierung

Zum Aufstellen dieser Bilanzen ist zunächst die Erfassung aller vorhandenen Messstellen sowie die Unterteilung der Anlage in Bilanzräume notwendig. Für die Pilotanlage bietet sich eine Unterteilung in die Bilanzräume thermisches Hauptverfahren (THV) und Rauch-gasreinigung (RGR), wie in Abbildung 42 dargestellt, an. In die Berechnung gehen die folgenden Messwerte ein:

- Primär- und Sekundärluftmassenströme und –temperaturen
- Rezigasmassenstrom und-zusammensetzung
- Quenchwasser- und Kühlluftmassenströme
- Rauchgasmassenstrom hinter RGR
- trockene Rauchgaszusammensetzung ( $CO_2$ ,  $O_2$ ) hinter THV und RGR
- Wassergehalt Rauchgas hinter RGR
- Massenstrom der in der RGR eingesetzten Additive (diskontinuierliche Messung)
- gemittelte Reststoffmassenströme (diskontinuierliche Messung)

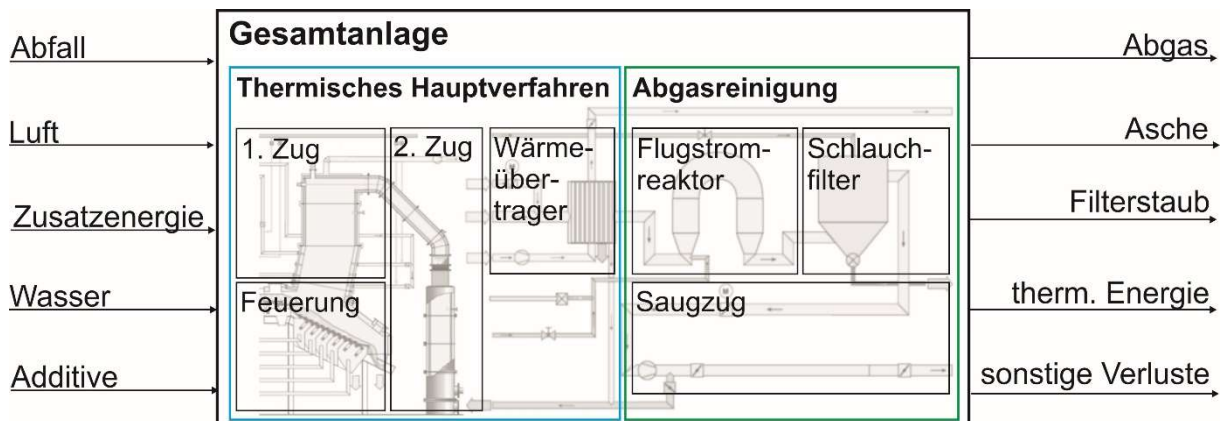


Abbildung 42: Schematische Darstellung der Rostfeuerungs-pilotanlage des CUTEC mit Unterteilung in Bilanzräume

Die Bilanzierung erfolgt rückwärtig, ausgehend vom Abgasstrom, der die RGR verlässt. Dieser ist durch die erfolgenden Messungen vollständig definiert (Massenstrom, Zusammensetzung, Druck, Temperatur). Die Berechnung der Eigenschaften des Rauchgasstromes, der das THV verlässt und in die RGR eintritt, ermöglicht die anschließende Bilanzierung des THVs.

Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 43 die schrittweise Berechnung der einzelnen ein- und austretenden Massenströme um das THV dargestellt. Benötigt werden hierfür die Massenströme an Primärluft, Sekundärluft und Rezigas, die gemessen und im PLS erfasst werden. Zusätzlich wird, wenn vorhanden, der Massenstrom an Zusatzwasser benötigt, der ebenfalls betriebsbegleitend gemessen und gespeichert wird. Auf der Austrittsseite wird der bereits angesprochene Rauchgasmassenstrom, der vom THV in die RGR geleitet wird, benötigt. Dieser ist aus der vorherigen Bilanzierung der RGR bekannt. Weiterhin werden Massenströme für die

Reststoffe Flugstaub, Rostdurchfall und Rostschlacke benötigt. Da diese nicht betriebsbegleitend erfasst werden können, ist hierfür die Annahme von Erfahrungswerten notwendig. Im Versuchsbetrieb wurden die Massen der Reststoffe zu jedem Versuchspunkt anschließend aufgenommen und in der nachträglichen Bilanzierung genutzt. Weiterhin wird der austretende Kühlluftmassenstrom gemessen. Dieser entspricht dem eintretenden Kühlluftmassenstrom, so dass eine direkte Berechnung möglich ist. Die Kühlluft steht nicht im Stoffaustausch mit den anderen Stoffströmen des THV, wird aber für die Energiebilanz benötigt. Im zweiten Schritt der Bilanzierung des THVs kann der eintretende Falschluffmassenstrom aus einer Stickstoffbilanz ermittelt werden. Dazu werden die Stickstoffgehalte von Rauchgas, Reziogas und Frischluft benötigt. Die Berechnung beruht auf der Annahme, dass der im Brennstoff enthaltene Stickstoffanteil vernachlässigbar gering ist. Anschließend kann aus allen anderen Massenströmen um das THV der Abfallmassenstrom als Differenz aus austretenden und den restlichen eintretenden Strömen berechnet werden.

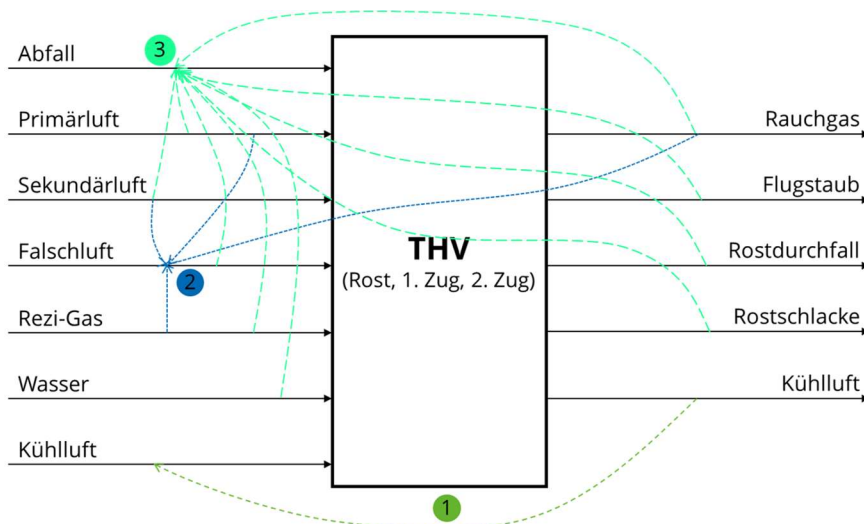


Abbildung 43: Darstellung des Bilanzraumes THV mit allen ein- und austretenden Stoffströmen sowie den geordneten Berechnungsschritten zur Ermittlung des Brennstoffmassenstromes

#### 4.3.1.2 Umsetzung der betriebsbegleitenden Berechnung

Die im Kapitel 4.2.3.5 beschriebene Anbindung an das PLS ermöglicht das betriebsbegleitende Auslesen der Daten aus der vom CUTEC erstellten Excel-Tabelle und Speichern in einer dafür erstellten Datenbank. Anschließend werden die für die Bilanzierung benötigten Werte aus der Datenbank ausgelesen. Die berechneten Ergebnisse werden ebenfalls in die Datenbank geschrieben. Somit ist es möglich grafische Darstellungen, sowohl von Messwerten als auch von Berechnungsergebnissen, direkt aus den in der Datenbank vorhandenen Daten zu erstellen und betriebsbegleitend zu aktualisieren. Eine beispielhafte Darstellung der Abgaszusammensetzung hinter der RGR und des berechneten Brennstoffmassenstromes ist in Abbildung 44 zu sehen. Im vorliegenden Fall wurden Minutenmittelwerte aus dem PLS ausgelesen. Die Berechnung erfolgte ebenfalls minütlich mit dem jeweils neu in die Datenbank übertragenen Datensatz, so dass auch die Abbildungen alle 60 Sekunden aktualisiert und erweitert wurden.

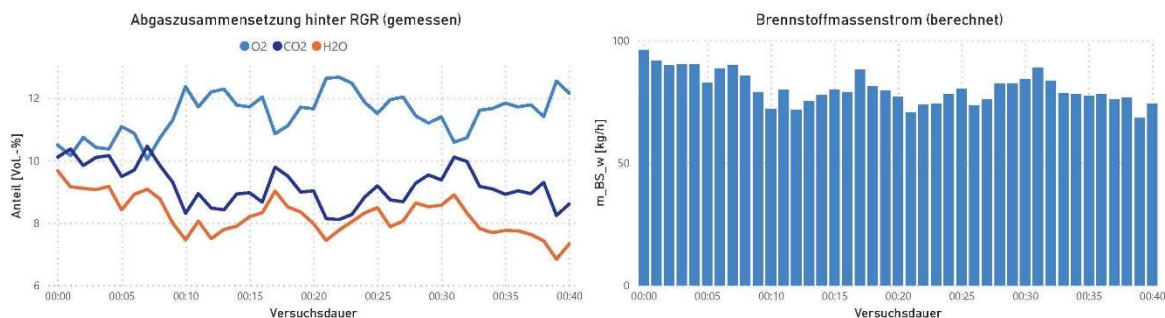


Abbildung 44: Auszug aus den betriebsbegleitend erstellten Visualisierungen von Messwerten und Berechnungsergebnissen

Mit dem Testlauf konnte nachgewiesen werden, dass alle notwendigen Schritte nacheinander in weniger als 60 Sekunden ablaufen und eine betriebsbegleitende Darstellung problemlos möglich ist.

### 4.3.2 Numerisches Fraktionen-Modell

#### 4.3.2.1 Festlegung der repräsentativen Fraktionen und ihrer Eigenschaften

Für das Fraktionenmodell werden die Anteile an Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Wasser und Asche in jeder Fraktion benötigt. Weitere Informationen über die Zusammensetzung der einzelnen Fraktionen erlauben Schlussfolgerungen über die Eigenschaften des Gesamtabfalls, wenn die Fraktionsanteile bekannt sind.

Im ersten Schritt wurden die relevanten Fraktionen basierend auf der Arbeit von Widder [7] festgelegt. Die Daten der Fraktionszusammensetzungen wurden durch eigene Literaturrecherchen erweitert. Es ist zu beachten, dass die Anzahl und Bezeichnungen der einzelnen im Abfall vorhandenen Fraktionen in unterschiedlichen Literaturstellen teilweise voneinander abweichen. Sofern die anders ausgewählten oder bezeichneten Fraktionen den betrachteten zugeordnet werden konnten, wurde dies getan. Abbildung 45 stellt die Ergebnisse grafisch dar. Hierbei wurden für die Fraktionen Papier/Pappe/Karton (PPK), Holz (HOL), Textilien (TEX), Kunststoffe (KUN), Organik (ORG), Verbundmaterial (VER) und Feinfraktion (FFR) Daten für die wasserstofffreien Anteile an Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff, den Wasseranteil im Rohzustand, den wasserstofffreien Ascheanteil sowie den unteren Heizwert zusammengestellt. Es ist zu erkennen, dass teilweise starke Unterschiede zwischen der in unterschiedlichen Literaturquellen angegebenen Zusammensetzung der Fraktionen bestehen. Dies ist vor allem beim Wassergehalt im Rohzustand der Fall.

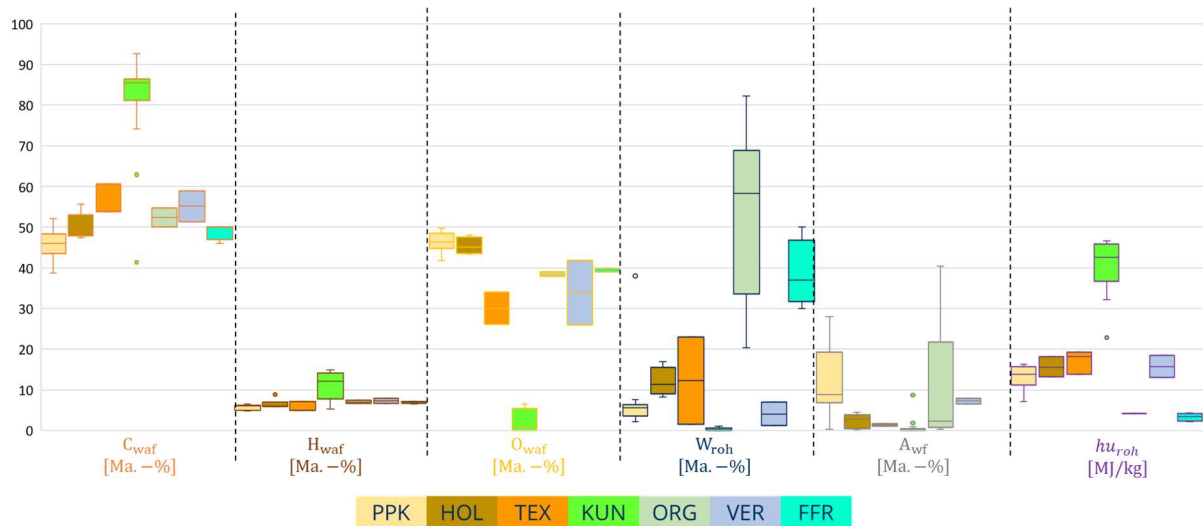


Abbildung 45: Zusammenstellung der Anteile an Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Wasser und Asche sowie der untere Heizwert der einzelnen im Abfall enthaltenen Fraktionen [8–15]

Zusätzlich werden in der Literatur typische Anteile der einzelnen Fraktionen im Restabfall angegeben. Diese sind sortiert nach dem Erscheinungsjahr der Literaturquelle in Tabelle 18 angegeben. Auch hier kann festgestellt werden, dass die Angaben zwischen unterschiedlichen Literaturstellen teilweise stark voneinander abweichen. Ein zeitlicher Trend ist aus den vorhandenen Daten nicht erkennbar.

Tabelle 18: Zusammenstellung der Anteile einzelner Fraktionen im Gesamtabfall [16–22]

	1997 Chandler et al.	1998 Mast	1998 Wiese et al.	1998 Ketelsen et al.	2003 Seifert, Merz	2011 Hoffmann et al.	2020 Dornbusch et al.	
<b>Papier</b>	18.7	12.4	31.4	24	14.5	43	12.1	5.2
<b>Holz</b>		1	18.8	7	1.8	11	1.9	1.3
<b>Textilien</b>	1.5	4.4	14.8	6.4	1.6	6	4.9	3.5
<b>Kunststoff</b>	6.1	8.6	24	13	5.2	10	9.2	6.7
<b>Organik</b>	27	23.2	47.9	17	23	10	30.9	39.3
<b>Verbundmaterial</b>	1.2	2	13	1	4		4.7	4.3
<b>Feinfraktion</b>	8.6	8.2	15	17	30.7	9	14.7	6.3
<b>Elektroschrott</b>		0.2	3.4	0.2	0.6			
<b>Inertmaterial</b>	11.5	1.9	9	4	4.5		4.9	4.6
<b>Andere</b>	25.5			10.4	14.2	12	18.4	28.8

Für die Implementierung der Daten im Fraktionenmodell werden jeweils eindeutige Werte für die Zusammensetzung jeder Fraktion und eine untere und obere Grenze für den Anteil jeder Fraktion im Gesamtabfall benötigt. Daher wurden für die Zusammensetzungen der einzelnen Fraktionen jeweils die Mittelwerte aus den Literaturangaben gewählt. Für die Angabe der Grenzen der Fraktionsanteile im Gesamtabfall wurden jeweils der kleinste und der größte in der Literatur genannte Anteil eingesetzt. Die so entstandenen Randbedingungen für die Fraktionseigenschaften sind in Tabelle 19 zusammengefasst. Die Zusammensetzungen von Elektroschrott (ESC) und Inertmaterial (INE) wurden aus Angaben von Widder [7] ergänzt.

**Tabelle 19: Mittlere Zusammensetzung der Einzelfractionen und typische Grenzen für den Anteil im Gesamtabfall [7–22]**

Fraktion	$h_u$ [kJ/kg]	C H O N S Cl W A									Grenzen	
		[Ma.-% feucht]									min	max
											[Ma.-%]	
<b>Papier</b>	13178	36.79	4.67	37.26	0.20	0.05	0.18	7.72	11.83		5.2	43.0
<b>Holz</b>	15630	43.10	5.62	38.92	0.39	0.09	0.04	11.96	2.33		1.0	18.8
<b>Textilien</b>	17077	48.51	4.93	25.95	2.80	0.20	0.65	12.25	1.34		1.5	14.8
<b>Kunststoff</b>	37218	79.92	10.99	2.22	1.09	0.04	12.54	0.31	0.71		5.2	24.0
<b>Organik</b>	4200	19.30	2.60	14.17	0.61	0.07	0.20	53.65	9.50		10.0	47.9
<b>Verbundmaterial</b>	15760	48.91	6.53	30.04	0.57	0.58	3.90	4.10	7.24		1.0	13.0
<b>Feinfraktion</b>	3300	28.39	4.03	22.74	1.39	1.09	0.49	38.50	3.57		6.3	30.7
<b>Elektroschrott</b>	15400	35.40	4.84	7.33	0.28	0.11		7.00	45.00		0.2	3.4
<b>Inertmaterial</b>	128	0.49	0.10	0.36	0.03	0.00		3.00	96.00		1.9	11.5

Die Anpassung des Fraktionenmodells auf Zustände mit zeitlich veränderlicher Fraktionszusammensetzung (siehe Kapitel 4.4.2.1) erfordert zusätzliches Wissen über die Zusammensetzung der Flüchtigen und des nach der Trocknung und Entgasung verbleibenden Rückstandes der einzelnen Fraktionen. Zur Ermittlung dieser Zusammensetzungen wurden die neun Monofractionen

- Holzhackschnitzel
- Altpapier
- Verbundmaterial (geschreddertes Tetra Pak®)
- Grünschnittkompost
- PE-Granulat
- PET-Granulat
- Kunststoffgranulatmischung aus PE, PET und PVC
- Elektroschrott
- CFK

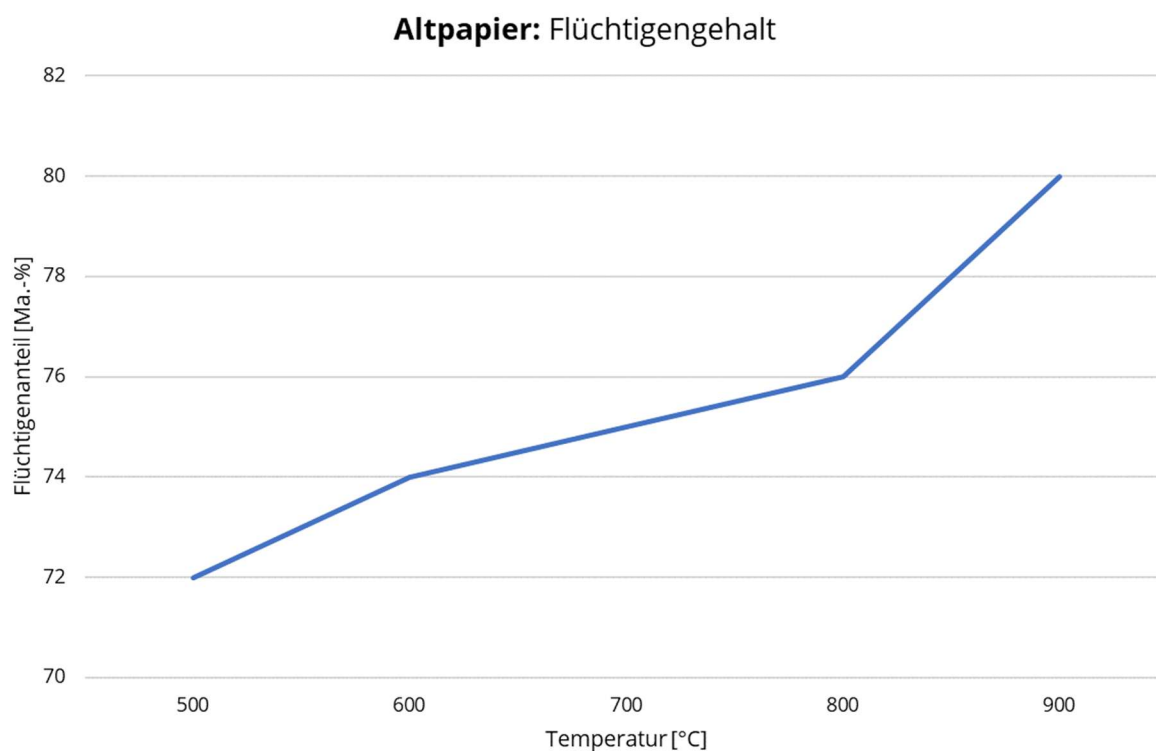
zur Untersuchung an das Fraunhofer UMSICHT gesandt. Dort erfolgte die Ermittlung der Reststoff- und Flüchtigenzusammensetzung bei verschiedenen Temperaturen zwischen 500 °C und 900 °C mittels der Fingerprint-Methode. Dabei wird die Flüchtigenzusammensetzung indirekt bestimmt, indem die Zusammensetzungen der bei der Pyrolyse verbleibenden Rückstände mit der Zusammensetzung einer unbehandelten Probe desselben Materials verglichen wird. Aus den Differenzen in der Zusammensetzung und der Immediatanalyse kann die Flüchtigenzusammensetzung geschlussfolgert werden.

Die Ergebnisse wurden im Rahmen der vAW-Leistungen von dem KMU B&D analysiert.

Wie zu erwarten, steigt der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen für jedes untersuchte Material mit steigender Pyrolysetemperatur an. In Abbildung 46 ist das Verhalten beispielhaft für das Material Altpapier dargestellt. Weiterhin wurde das Gesamtmaterial für die einzelnen Temperaturen in die Bestandteile Asche und Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff jeweils im Rückstand und den Flüchtigen unterteilt (siehe Abbildung 47 für Altpapier).

Da für die Umsetzung der Berechnung bei zeitlich veränderlicher Brennstoffzusammensetzung vor allem die im Rückstand verbleibenden Bestandteile interessant sind, wurden diese detaillierter betrachtet. Die Ergebnisse sind für Altpapier bei den verschiedenen Untersuchungstemperaturen in Abbildung 48 grafisch dargestellt. Zusätzlich zeigt Tabelle 20 die

Reststoffzusammensetzungen aller untersuchten Fraktionen jeweils bei der höchsten Untersuchungstemperatur<sup>4</sup>. Für alle Fraktionen kann der Rückstand mit ausreichender Genauigkeit als Gemisch aus Asche und Kohlenstoff aufgefasst werden.



*Abbildung 46: Ermittelter Flüchtigengehalt von Altpapier bei Pyrolyse bei unterschiedlichen Temperaturen*

<sup>4</sup> Für die Kunststofffraktionen lag nach der Pyrolyse bei Temperaturen oberhalb von 500 °C keine ausreichend große Menge an Reststoffe für die Untersuchung mehr vor. Für die Holzhackschnitzel wurde ebenfalls eine Probe bei 900 °C untersucht. Da diese jedoch zu unlogischen Ergebnisse führte, wurde hier auf die Ergebnisse bei 800 °C zurückgegriffen.

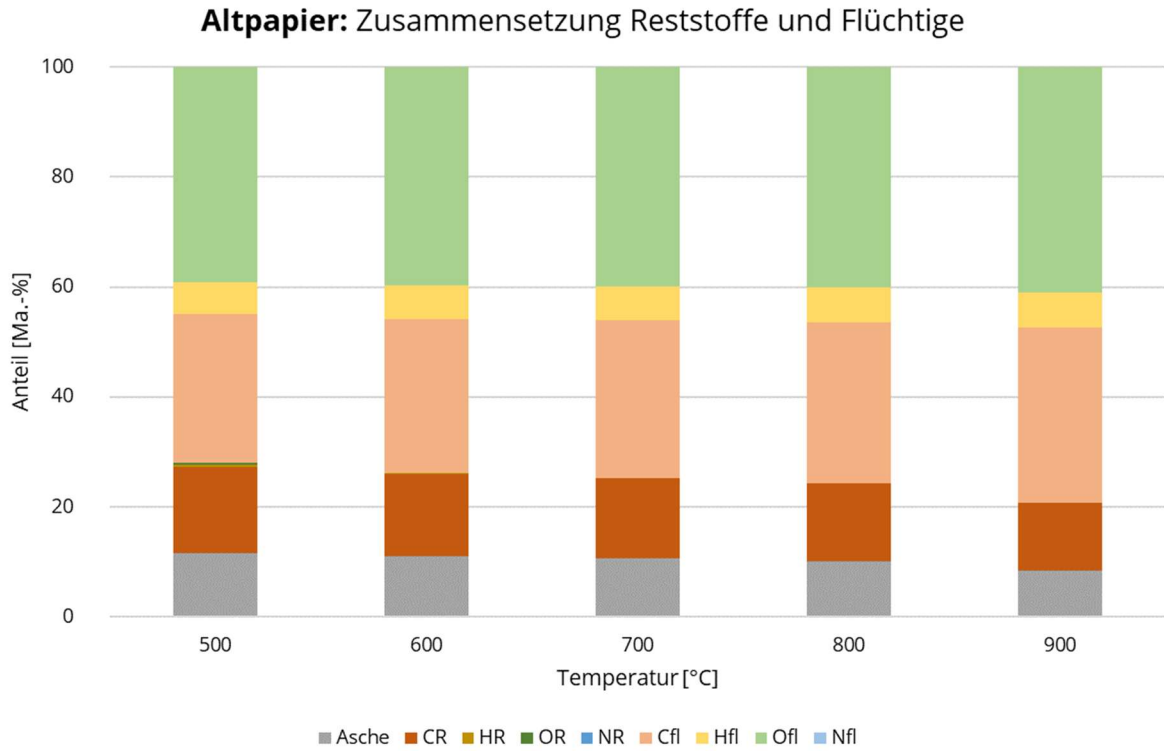


Abbildung 47: Trockene Zusammensetzung der Flüchtigen und Reststoffe bei Pyrolyse von Altpapier bei unterschiedlichen Temperaturen

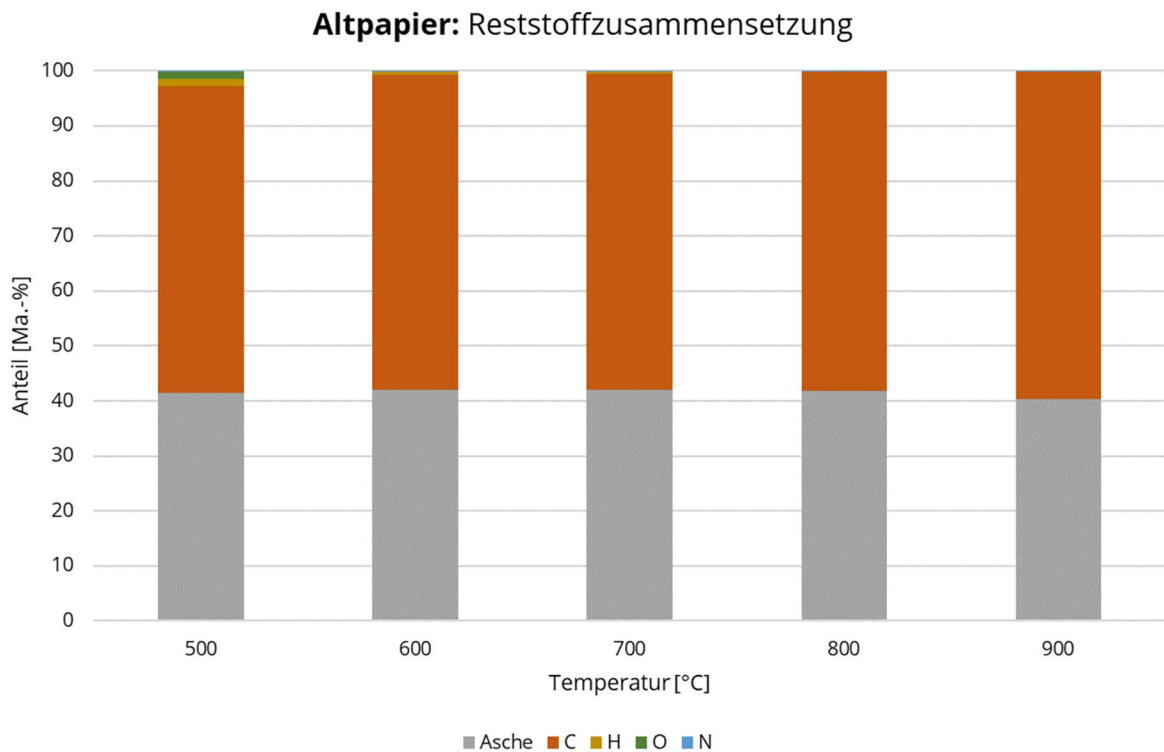


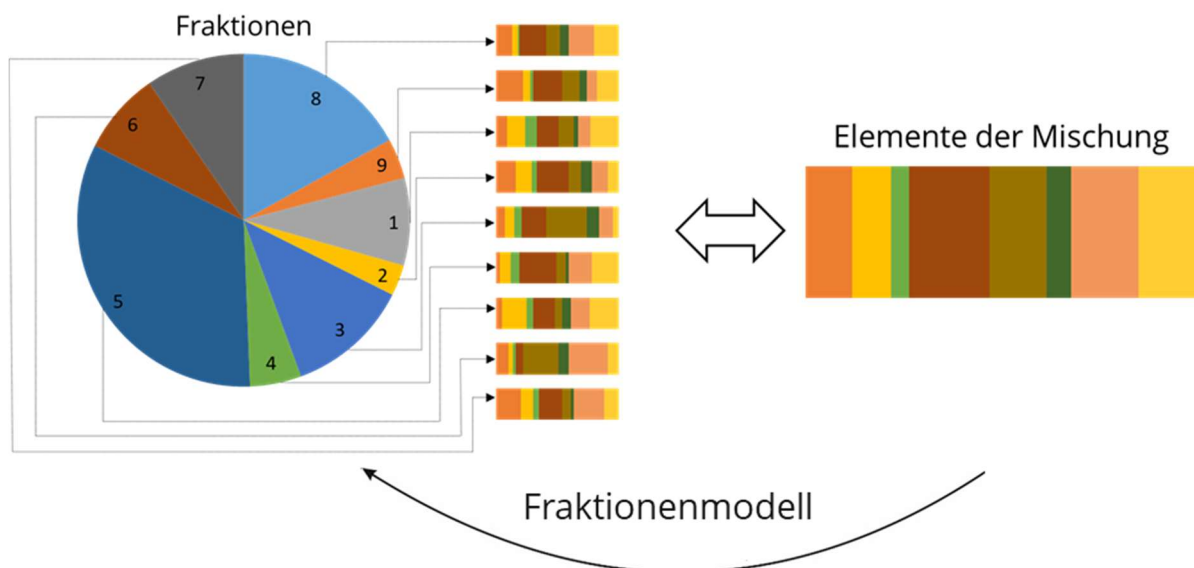
Abbildung 48: Trockene Zusammensetzung der Reststoffe bei Pyrolyse von Altpapier bei unterschiedlichen Temperaturen

*Tabelle 20: Trockene Zusammensetzung der Reststoffe aus der Pyrolyse verschiedener Abfallbestandteile (Pyrolysetemperatur jeweils angegeben)*

Zusammensetzung Rückstand	A	C	H	O	N
	[Ma.-%]				
Holz hackschnitzel (800 °C)	2.35	93.59	0.14	3.66	0.26
Altpapier (900 °C)	40.44	59.45	0.00	0.00	0.12
Tetra Pak® (900 °C)	47.22	48.28	0.00	4.38	0.11
Grünschnittkompost (900 °C)	87.63	9.05	0.00	3.15	0.17
PET (500 °C)	0.83	87.36	2.70	9.07	0.05
Kunststoffmischung (500 °C)	37.50	51.40	1.10	9.85	0.15
Elektroschrott (900 °C)	83.00	16.54	0.00	0.34	0.12

#### 4.3.2.2 Entwicklung des Lösungsalgorithmus

Den zweiten Schritt zur Berechnung der Fraktionszusammensetzung des Abfalls stellt das Numerische Fraktionenmodell dar. Es ermöglicht aus der elementaren Zusammensetzung der Mischung, die mit Hilfe der erweiterten Online-Bilanzierung bestimmt wurde, die Unterteilung des Abfalls in die neun gewählten Abfallfraktionen (siehe Abbildung 49).



*Abbildung 49: Berechnungsschema des Numerischen Fraktionenmodells*

Die Zielfunktion für die Berechnung wird so gewählt, dass die mit den Fraktionsanteilen gewichtet aufsummierten Eigenschaften der Einzelfraktionen den Eigenschaften der Abfallmischung entsprechen. Damit ergeben sich die folgenden sechs Gleichungen:

$$\xi_{C_{OB}} = \sum_i (n_i \xi_{C_i}) \quad (1)$$

$$\xi_{H_{OB}} = \sum_i n_i \xi_{H_i} \quad (2)$$

$$\xi_{O_{OB}} = \sum_i n_i \xi_{O_i} \quad (3)$$

$$\xi_{W_{OB}} = \sum_i (n_i \xi_{W_i}) + \xi_{WW} \quad (4)$$

$$\xi_{AOB} = \sum_i n_i \xi_{A_i} \quad (5)$$

$$h_{uOB} = \sum_i (n_i h_{u_i}) + \xi_{WW} h_{uW} \quad (6)$$

bzw. zusammengefasst in Matrixschreibweise:

$$C \cdot x = d \quad (7)$$

wobei  $C$  die Eigenschaften der Einzelfraktionen beinhaltet,  $d$  die Eigenschaften der Mischung als Ergebnisse der Online-Bilanzierung und  $x$  die Anteile der einzelnen Fraktionen an der Mischung.  $x$  stellt somit die gesuchten Größen dar.

Neben den neun Fraktionen, die als repräsentativ für den Abfall bestimmt wurden, erfolgt die Einführung einer weiteren Hilfsfraktion. Das so genannte Witterungswasser  $WW$  wird zum Ausgleich der starken Schwankungen des Wassergehaltes der einzelnen Fraktionen (siehe Abbildung 45) sowie möglicher Einflüsse der Wetterbedingungen bei der Lagerung des Abfalls auf den Wassergehalt eingeführt. Da der Wassergehalt durch die Einflüsse kleiner oder größer sein kann als der gewählte Mittelwert der Fraktionszusammensetzung, kann der Anteil der Hilfsfraktion Witterungswasser positive und negative Werte annehmen. Der Anteil an Witterungswasser beeinflusst die Wasser- und Heizwertgleichung.

Um den möglichen Ergebnisbereich einzuschränken, kann zusätzlich vorgegeben werden, dass die Summe aller Fraktionsanteile 1 ergeben muss:

$$\sum_i n_i = 1$$

Weiterhin sind die Anteilsgrenzen jeder Fraktion im typischen Restabfall aus der Literaturrecherche bekannt (Tabelle 19) und können ebenfalls als untere und obere Begrenzungen des Ergebnisbereichs vorgegeben werden.

Da das gleichzeitige Lösen aller Gleichungen mit einer Fraktionszusammensetzung und realen Eingangsdaten auf Grund von Schwankungen in den Zusammensetzungen der Einzelfraktionen sowie Unsicherheiten in der Zusammensetzung des Gesamtabfalls nicht vorausgesetzt werden kann, ergibt sich ein Optimierungsproblem. Zur Lösung wurde eine Minimierung der Fehlerquadrate mit Grenzen gewählt:

$$\min_x \frac{1}{2} \|C \cdot x - d\|_2^2 \text{ mit } \begin{cases} A \cdot x \leq b \\ A_{eq} \cdot x = b_{eq} \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (8)$$

Der Lösungsalgorithmus ermöglicht es, die Fraktionszusammensetzung zu finden, deren gewichtet aufsummierte Eigenschaften am besten mit den Eigenschaften der Brennstoffmischung übereinstimmen. Zusätzlich kann als Gleichungsnebenbedingung ( $A_{eq} \cdot x = b_{eq}$ ) vorgegeben werden, dass die Summe aller Fraktionsanteile eins ergeben soll. Der Ergebnisbereich wird über die Vorgabe der bekannten Anteilsgrenzen der einzelnen Fraktionen als untere und obere Grenzen ( $lb, ub$ ) vorgegeben.

Die Implementierung des Lösungsalgorithmus erfolgte in Matlab.

## 4.4 Modellvalidierung an der Pilotanlage

### 4.4.1 Stationärer Betrieb

#### 4.4.1.1 Plausibilitätsprüfung der Eingangsdaten mit Hilfe der erweiterten Online-Bilanzierung

Wie die Nachrechnung der Versuche an der Pilotanlage mit ChemCAD zeigt, bestehen Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten Abgaszusammensetzung, zurückzuführen auf eine fehlerhafte Messung des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes des Abgases. Fehler in der gemessenen

Abgaszusammensetzung können auch mit Hilfe der Auswertungen im Rahmen der erweiterten Online-Bilanzierung nachgewiesen werden.

Abbildung 50 zeigt hierzu den gemessenen Sauerstoffanteil im Rauchgas hinter dem THV (GA 2) und hinter der RGR (GA 3) für Versuch 4 aus Versuchswoche KW. 17 in 2023. Über die RGR erfolgt ein zeitlich konstanter Anstieg des Sauerstoffgehaltes durch das Eindringen von Falschluff ins System. Abbildung 51 stellt vergleichend den Kohlenstoffdioxidanteil im Rauchgas ebenfalls hinter dem THV und hinter der RGR für denselben Zeitraum dar. Da der Kohlenstoffdioxidgehalt der Umgebungsluft, die als Falschluff in die RGR eindringt vernachlässigbar gering ist, wäre eine Verdünnung des Rauchgases und eine Absenkung des Kohlenstoffdioxidgehaltes an GA 3 gegenüber GA 2 zu erwarten. Die Messwerte zeigen jedoch einen gegenteiligen Trend, bei dem der CO<sub>2</sub>-Messwert an GA 3 etwas oberhalb des Messwertes von GA 2 liegt. Dies weist auf einen Fehler bei der Messung des CO<sub>2</sub>-Anteils an mindestens einer der Messstellen hin.

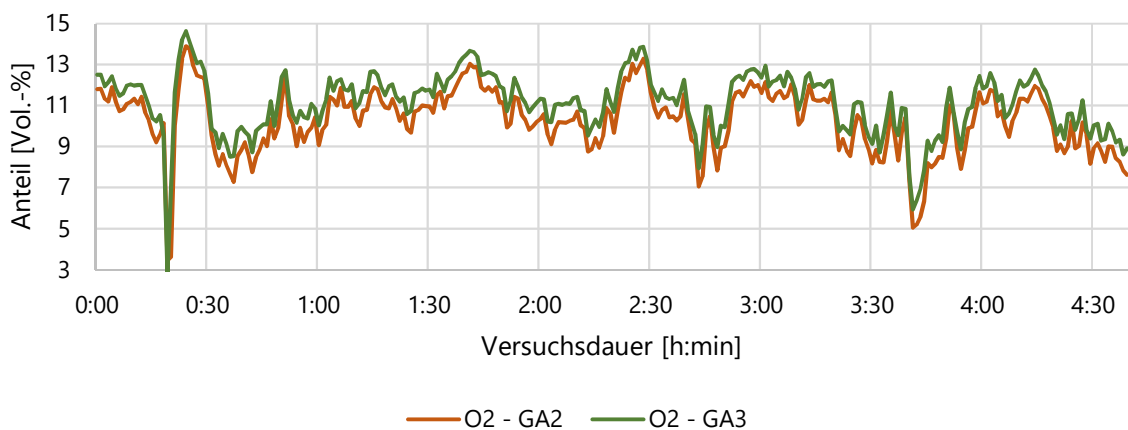


Abbildung 50: Sauerstoffgehalt im Rauchgas hinter dem THV (GA 2) und hinter der RGR (GA 3) während des Versuchs 4 in Versuchswoche KW. 17 in 2023

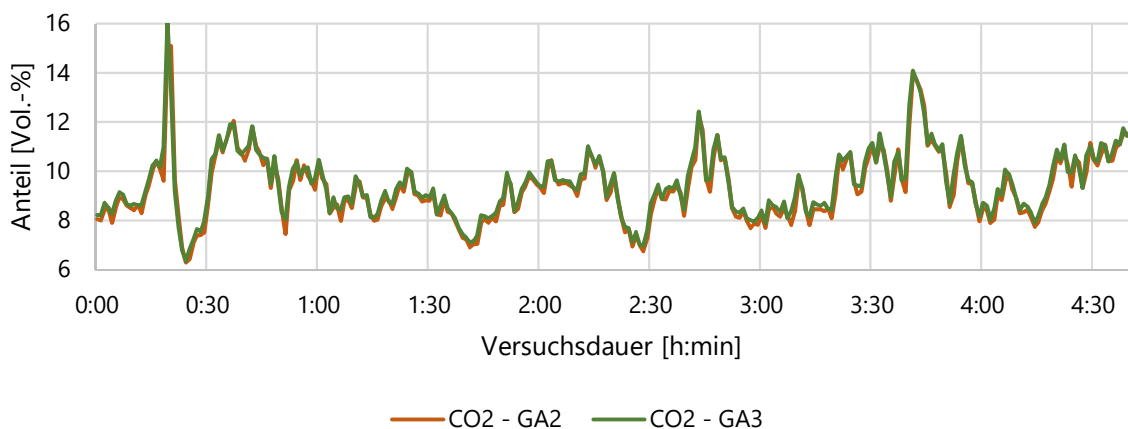


Abbildung 51: Kohlenstoffdioxidgehalt im Rauchgas hinter dem THV (GA 2) und hinter der RGR (GA 3) während des Versuchs 4 in Versuchswoche KW. 17 in 2023

Für die Auswertung der Versuche wurden die aus der ChemCAD-Berechnung ermittelten Korrekturfaktoren für die CO<sub>2</sub>- und Wassergehalte im Rauchgas verwendet. Die Korrekturfaktoren für die CO<sub>2</sub>-Messungen bei GA 2 und GA 3 unterscheiden sich zwischen den einzelnen Versuchskampagnen nur geringfügig. Somit wurde hier für alle Versuchskampagnen ein einheitlicher mittlerer Faktor gewählt. Da für die Wassermessung bei GA 3 stärkere Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchskampagnen auftreten, wurde hierfür der jeweils für die

entsprechende Versuchskampagne ermittelte Faktor eingesetzt. Die daraus für die einzelnen Versuchskampagnen verwendeten Korrekturfaktoren sind in Tabelle 21 zusammengestellt.

*Tabelle 21: Korrekturfaktoren für die Messungen von CO<sub>2</sub> (GA 2 und GA 3) und Wasser (GA 3) im Abgas die für die Berechnungen mit der erweiterten Online-Bilanzierung verwendet wurden, unterteilt nach den durchgeführten Versuchskampagnen*

VK	CO <sub>2</sub> -Messung GA 2	CO <sub>2</sub> -Messung GA 3	Wassermessung GA 3
1	1,0385	0,9277	1,0032
2			1,0541
3			1,0475
4			1,1829

Die Auswertung wird hier beispielhaft für den Versuch 4 aus Versuchswoche KW. 17 in 2023 vorgestellt. Die Vorgaben und Ergebnisse aller anderen Versuche können Anhang A und Anhang B entnommen werden.

#### **4.4.1.2 Vergleich von berechneter und eingestellter Brennstoffzusammensetzung im stationären Betrieb**

In Tabelle 22 sind die Vergleichswerte und Berechnungsergebnisse für die Verbrennung der 4-Komponentenmischung dargestellt. Der Vergleichswert für den Brennstoffmassenstrom wird betriebsbegleitend an der Anlage gemessen und wurde in Form von Minutenmittelwerten zur Verfügung gestellt. Die Vergleichswerte für die Zusammensetzung und den Heizwert der Brennstoffmischung wurden aus den im Labor ermittelten Werten für die Einzelfractionen und den bekannten Anteilen der einzelnen Fraktionen an der Brennstoffmischung ermittelt. Die Berechnung erfolgte ausgehend von Minutenmittelwerten. Bei den Berechnungsergebnissen handelt sich um die über den Versuchszeitraum von 4 Stunden und 40 Minuten gemittelten Werte.

*Tabelle 22: Vergleichswerte und Berechnungsergebnisse aus der Online-Bilanzierung für den stationären Versuch 4 aus Versuchswoche KW. 17 in 2023*

		Vergleichswert	Ergebnis
Brennstoffmassenstrom	[kg/h]	109,2	101,9
Heizwert	[MJ/h]	13,2	14,3
Kohlenstoffanteil	[Ma.-%]	36,8	37,7
Wasserstoffanteil	[Ma.-%]	5,1	4,9
Sauerstoffanteil	[Ma.-%]	29,0	27,6
Wasseranteil	[Ma.-%]	16,1	20,0
Ascheanteil	[Ma.-%]	12,8	9,7

Es kann eine gute Übereinstimmung zwischen den Vergleichswerten und Berechnungsergebnissen festgestellt werden. Kleine Abweichungen bestehen für den Sauerstoff-, Wasser und Ascheanteil im Brennstoff. Ursache dafür können sowohl Abweichungen in den berechneten Werten als auch den Vergleichswerten sein. Abweichungen in den Messwerten treten durch die Fortpflanzung von Unsicherheiten an der Anlage sowie die Annahme von messtechnisch

nicht oder nur schwer erfassbaren Massenströmen auf. Auch die Vergleichswerte sind von Messunsicherheiten betroffen. Zusätzlich können Entmischungserscheinungen kurzfristig zu einer Abweichung der vorgegebenen und tatsächlich vorliegenden Brennstoffzusammensetzung führen. Diesem Einfluss wird jedoch durch die Mittelwertbildung über den gesamten Versuchszeitraum entgegengewirkt.

Tabelle 23 stellt die Vergleichswerte und Berechnungsergebnisse für die Fraktionszusammensetzung für Versuch 4 aus Versuchswoche KW. 17 in 2023 dar. Im Versuch wurde eine Mischung aus Altpapier, Holzhackschnitzeln, Tetra Pak® und Grünschnittkompost eingesetzt. Für die Berechnung mit dem Fraktionenmodell wurden die Fraktionen als mögliche Bestandteile der Mischung vorgegeben. Eine Einschränkung des Ergebnisbereichs erfolgte nur insofern, dass alle berechneten Fraktionsanteile zwischen 0 und 100 Ma.-% liegen mussten. Zusätzlich wurde ein Anteil an der Hilfsfraktion Witterungswasser zwischen -5 % und +5 % erlaubt, um den lagerungsbedingt schwankenden Wassergehalt der Holzhackschnitzel und des Grünschnittkompostes auszugleichen.

*Tabelle 23: Vergleichswerte und Berechnungsergebnisse aus dem Numerischen Fraktionenmodell für den stationären Versuch 4 aus Versuchswoche KW. 17 in 2023*

		Vergleichswert	Ergebnis
Altpapier	[Ma.-%]	28,8	1,05
Holzhackschnitzel	[Ma.-%]	12,8	30,9
Tetra Pak®	[Ma.-%]	40,4	55,3
Grünschnittkompost	[Ma.-%]	18,0	10,5
Zusatzwasser	[Ma.-%]	0,0	1,3

Die eingestellte und berechnete Zusammensetzung weisen teilweise größere Abweichungen auf. Ursache dafür ist einerseits die Fortpflanzung der Abweichungen zwischen der vorgegebenen und mit der Online-Bilanzierung ermittelten Mischungszusammensetzung. Andererseits muss beachtet werden, dass die Zusammensetzungen von Altpapier und Holzhackschnitzeln nur geringe Unterschiede aufweisen. Dies führt zu einer unzureichenden Unterscheidbarkeit dieser beiden Fraktionen für das Modell, die sich in den Berechnungsergebnissen widerspiegelt.

#### **4.4.1.3 Erweiterung des Berechnungswerkzeugs zur Ermittlung der Unsicherheiten**

Auf Grund des starken Einflusses von Messunsicherheiten an der Anlage und im Labor auf die Vergleichswerte und Berechnungsergebnisse bei der Online-Bilanzierung erfolgte eine detaillierte Betrachtung der Fehlerfortpflanzung. Dabei wurden die Unsicherheiten der Berechnungsergebnisse mit Hilfe von Gleichung (9) bestimmt. Hierzu wurde für alle Messgeräte an der Anlage eine Unsicherheit von 3 % des aktuellen Messwertes angenommen.

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\delta y}{\delta x_1}\right)^2 \Delta x_1^2 + \left(\frac{\delta y}{\delta x_2}\right)^2 \Delta x_2^2 + \dots + \left(\frac{\delta y}{\delta x_n}\right)^2 \Delta x_n^2} \quad (9)$$

Zusätzlich wurden die Unsicherheiten der Labormesswerte aus den Ergebnissen der Mehrfachbestimmung und der Ermittlung der Critical Distance bewertet. Hinzu kommen

Ungenauigkeiten bedingt durch die Probenahme, die bei einem heterogenen Einsatzstoff wie Abfall ebenfalls zu beachten sind, zahlenmäßig jedoch nicht allgemeingültig erfasst werden können.

Die Ergebnisse dieser Betrachtungen sind in Abbildung 52 bis Abbildung 54 für Versuch 4 aus Versuchswoche KW. 17 in 2023 dargestellt. Für die Anteile an Kohlenstoff und Sauerstoff im Brennstoff sowie den unteren Heizwert kann eine Überschneidung der Vertrauensbereiche der berechneten und gemessenen Werte über den gesamten Versuchszeitraum festgestellt werden. Für den Wassergehalt treten teilweise Abweichungen auf, die mit den bereits erwähnten, lagerungsbedingten Schwankungen des Wassergehaltes der Holzhackschnitzel und des Grünschnittkompostes zusammenhängen.

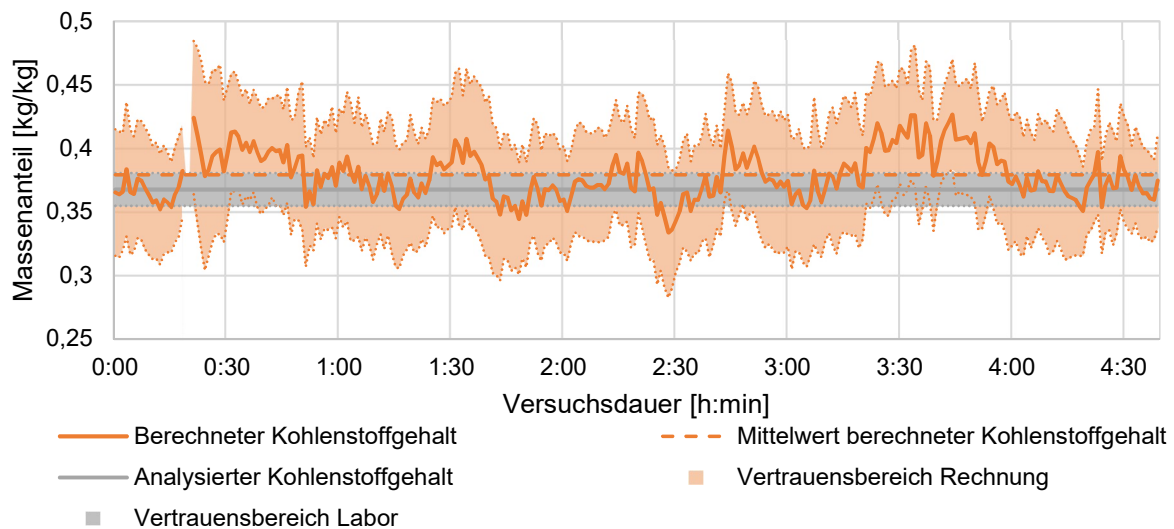


Abbildung 52: Berechneter und im Labor ermittelter Kohlenstoffgehalt der Brennstoffmischung im stationären Versuch 4 aus Versuchswoche KW. 17 in 2023 mit Angabe der Vertrauensbereiche

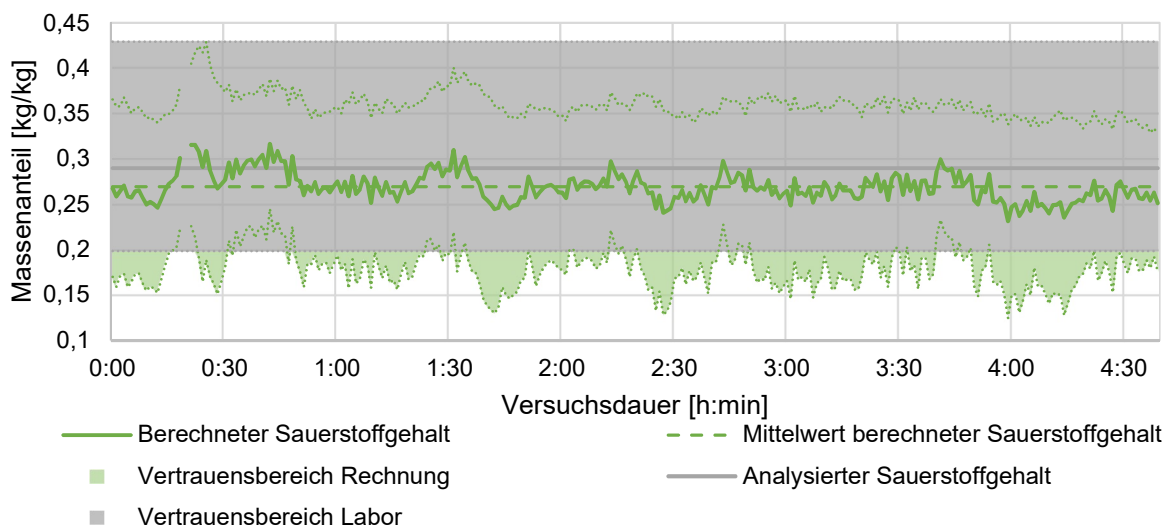


Abbildung 53: Berechneter und im Labor ermittelter Sauerstoffgehalt der Brennstoffmischung im stationären Versuch 4 aus Versuchswoche KW. 17 in 2023 mit Angabe der Vertrauensbereiche

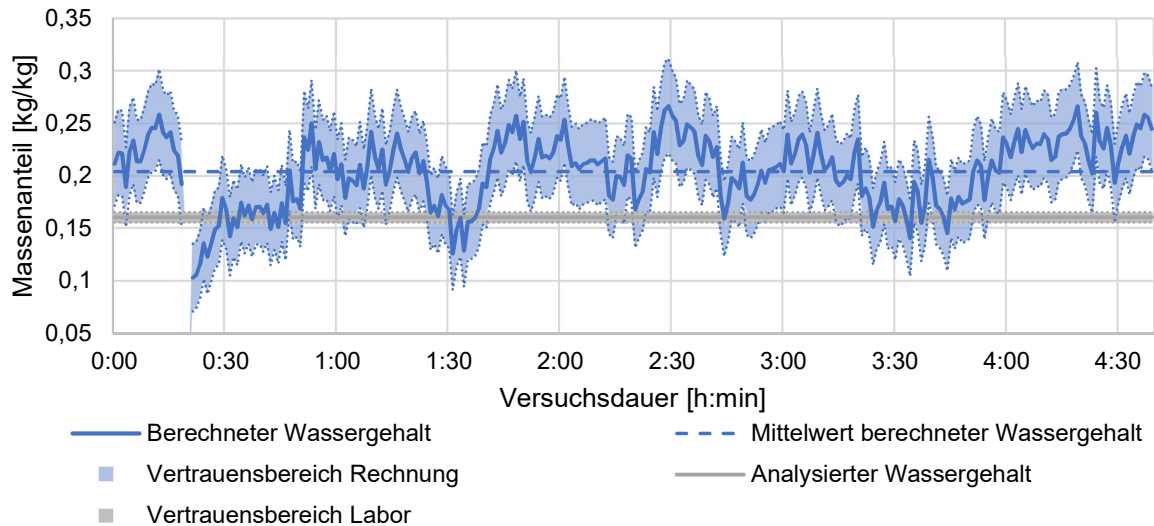


Abbildung 54: Berechneter und im Labor ermittelter Wassergehalt der Brennstoffmischung im stationären Versuch 4 aus Versuchswoche KW. 17 in 2023 mit Angabe der Vertrauensbereiche

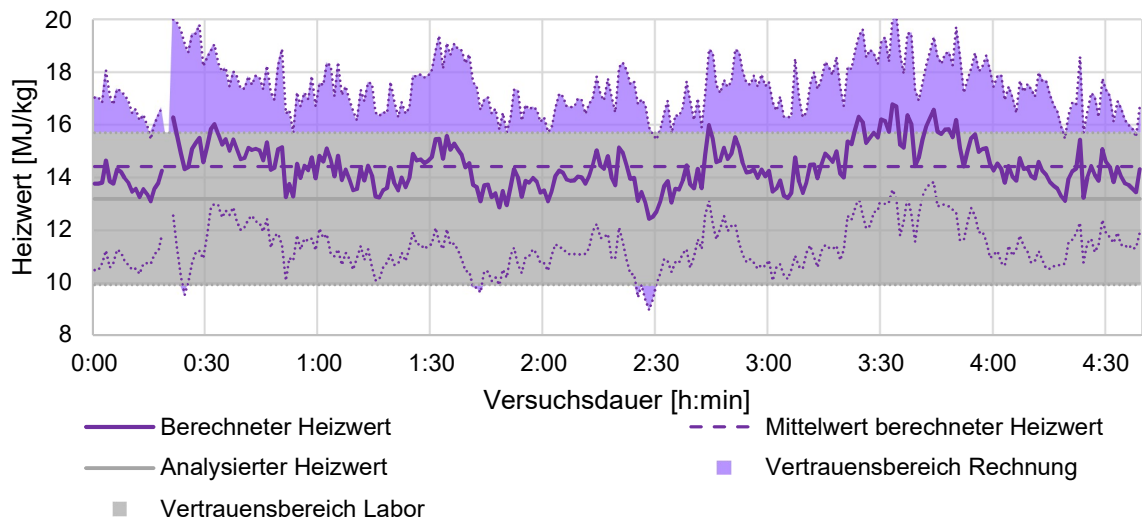


Abbildung 55: Berechneter und im Labor ermittelter unterer Heizwert der Brennstoffmischung im stationären Versuch 4 aus Versuchswoche KW. 17 in 2023 mit Angabe der Vertrauensbereiche

Die breiten Vertrauensbereiche für den Sauerstoffgehalt resultieren aus der Art der Bestimmung des Sauerstoffgehaltes. Im Labor wird dieser nicht direkt gemessen, sondern als Schließgröße aus den anderen Bestandteilen berechnet. Somit gehen die Unsicherheiten aller anderen Bestandteile in diesen Wert ein. In der Online-Bilanzierung gehen die Gehalte an Kohlenstoff, Wasserstoff und Wasser mit in die Berechnung des Sauerstoffgehaltes ein. Somit akkumulieren sich auch hierbei die Unsicherheiten der einzelnen Anteile.

Zusätzlich wurde die Online-Bilanzierung um eine eingangsseitige Prüfung der Messwerte auf Stationarität erweitert. Dazu wird für die wichtigsten Eingangswerte der Mittelwert über die letzten 24 Zeitschritte gebildet und mit dem Mittelwert aus 25 Zeitschritten, unter Einbeziehung des aktuellen Wertes, verglichen. Weisen beide Mittelwerte eine Differenz auf, die größer als die erlaubte Toleranz  $\epsilon_x$  ist, wird der Zeitschritt als instationär bewertet. In diesem Fall wird die Berechnung für diesen Zeitschritt ausgesetzt. Eine Berechnung erfolgt somit nur, wenn (10) erfüllt ist.

$$\left| \frac{\bar{x}_n - \bar{x}_{n-q}}{\bar{x}_n} \right| = \left| \frac{\Delta \bar{x}_n}{\bar{x}_n} \right| < \epsilon_x \quad (10)$$

Da für die Abfallverbrennung keine Vorgaben für die erlaubten Toleranzen  $\epsilon_x$  bekannt sind, wurden im Rahmen von Versuchskampagne 2 sinnvolle Werte bestimmt. Die Wahl der Werte erfolgte so, dass bekannte instationäre Zeiträume über den Stationaritätstest als instationär bewertet wurden, während die stationär eingestellten Versuchszeiträume als stationär bewertet wurden und eine Berechnung erfolgte. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 24 zusammengefasst.

*Tabelle 24: Erlaubte Toleranzen zur Bewertung der Stationarität eines Versuchszeitpunktes*

<b>Untersuchte Messwerte</b>	$\epsilon_x$
Massenstrom des Abgases hinter Rauchgasreinigung	0.005
Massenstrom Primärluft gesamt	0.01
Massenfluss Sekundärluft gesamt	0.01
Trockene Rauchgaszusammensetzung hinter Kessel	0.03
Trockene Rauchgaszusammensetzung hinter Rauchgasreinigung	0.03
Wassergehalt Rauchgas hinter Rauchgasreinigung	0.02

## **4.4.2 Instationärer Betrieb**

### ***4.4.2.1 Anpassung des Berechnungswerkzeugs zur Anwendung im instationären Betrieb***

Instationäre Betriebszustände ergeben sich einerseits durch die schnelle und starke Änderung von Messgrößen. Tritt diese Art von Instationarität auf, ist keine Bilanzierung des Systems möglich und die Zeitpunkte werden durch die eingangsseitige Prüfung des Stationarität herausgefiltert (siehe Kapitel 4.4.1.3). Bei häufigem Auftreten von starken Schwankungen der Messwerte, die eine Bilanzierung ausschließen, kann eine Glättung über die Erweiterung des Betrachtungszeitraum erfolgen. Für die Pilotanlage wurde die Berechnung mit Minutenmittelwerte durchgeführt. Eine Berechnung mit 10-Minuten-Mittelwerten kann weiterhin wertvolle Erkenntnisse für den Anlagenbetrieb liefern, ist aber weniger anfällig für kurzfristige Messwert-schwankungen.

Andererseits ergibt sich ein instationärer Betrieb auch durch die Änderung der Brennstoffzusammensetzung. Auf Grund der Inhomogenität von Abfall tritt diese Art von Instationarität in der großtechnischen Abfallverbrennung permanent auf. Daher muss eine Anpassung der Berechnungsmodelle erfolgen, so dass eine Berechnung auch bei schwankender Brennstoffzusammensetzung möglich ist.

Zur Umsetzung dieser Anpassung wird die Modellvorstellung der Rostverbrennung um eine Unterteilung des Rostes in zwei Zonen erweitert (siehe Abbildung 56). Der frische Abfall gelangt zuerst in Zone A, wo auf Grund der hohen Umgebungstemperaturen die Trocknung und Entgasung stattfindet. Das im Abfall enthaltene Wasser sowie die flüchtigen Bestandteile gehen in die Gasphase über. Der Rückstand bewegt sich anschließend weiter in Rostzone B. Hier findet der Restkoksausbrand statt. Aus den Untersuchungen zur Flüchtig- und Reststoffzusammensetzung des Fraunhofer UMSICHT (siehe Kapitel 4.3.2.1) ist bekannt, dass der Rückstand nach der Trocknung und Entgasung als Mischung aus Asche und fixem Kohlenstoff betrachtet werden kann (vergleiche Tabelle 20). Der Übergang von Aschebestandteilen in die Gasphase kann vernachlässigt werden. Somit erfolgt in Zone B ausschließlich der Übergang des fixen Kohlenstoffes in die Gasphase. Betrachtet man einen festen Zeitpunkt  $t = 0$  befindet sich in der Rostzone A frischer Abfall mit der Zusammensetzung von Brennstoff A. Aus diesem Bereich gehen der gesamte Wasser-, Wasserstoff- und Sauerstoffgehalt sowie der flüchtige

Kohlenstoff aus BS A in die Gasphase über. In Zone B befindet sich der bereits im vorhergehenden Zeitschritt  $t = -1$  getrocknete und entgaste Brennstoff B. Aus diesem Bereich geht der fixe Kohlenstoff von Brennstoff B in die Gasphase über. Die Messung der Abgaszusammensetzung erfolgt hinter dem THV als Mischung aus dem Wasser und den Flüchtigen aus Brennstoff A und dem fixen Kohlenstoff aus Brennstoff B. Unterscheiden sich die beiden Brennstoffe A und B nicht in ihrer Zusammensetzung wird mit der Online-Bilanzierung die Zusammensetzung des frisch auf den Rost kommenden Abfalls berechnet. Liegt eine instationäre Brennstoffzusammensetzung vor, wird die Zusammensetzung des aktuell verbrennenden Abfalls als Mischung aus Wasser und den Flüchtigen aus Brennstoff A und dem fixen Kohlenstoff aus Brennstoff B berechnet.

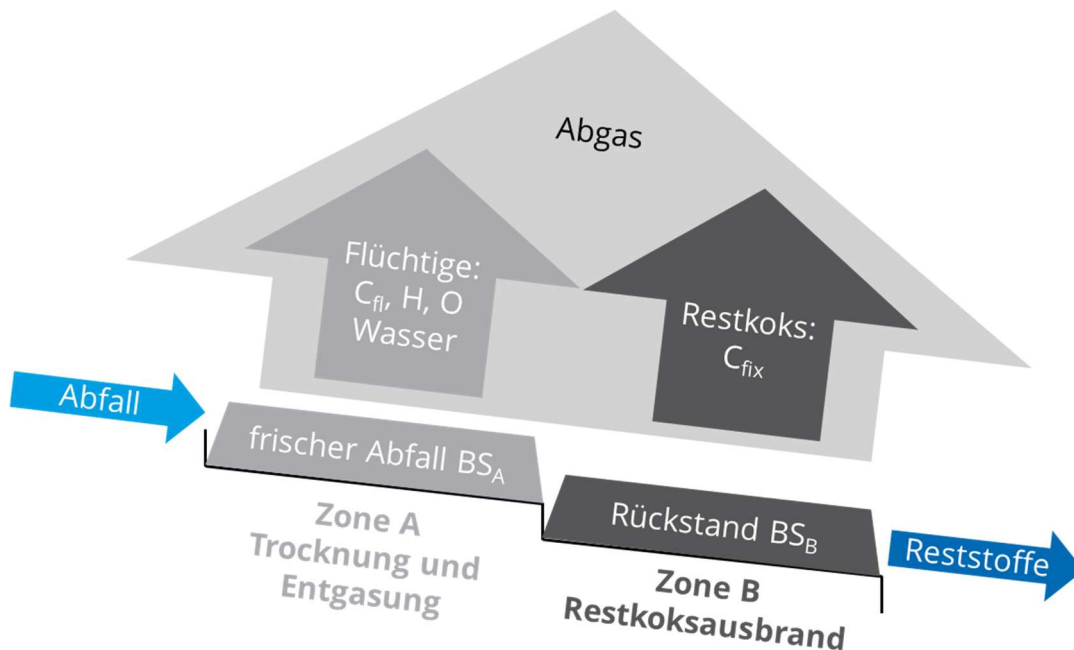


Abbildung 56: Schematische Darstellung der Unterteilung des Verbrennungsrostes in zwei Zonen

Mit Hilfe des Fraktionenmodells soll die Zusammensetzung des frisch auf den Rost kommenden Abfalls ermittelt werden. Bei instationärer Brennstoffzusammensetzung muss die aus der Online-Bilanzierung ermittelte Brennstoffzusammensetzung somit um die Differenz des fixen Kohlenstoffgehaltes der zum Zeitpunkt  $t = 0$  aus Brennstoff B in die Gasphase übergeht und den fixen Kohlenstoffgehalt, der im frischen Abfall A enthalten ist, korrigiert werden. Dazu wird die Hilfsfraktion  $C^*$  eingeführt.

$$C^* = C_{fix}(BS_B) - C_{fix}(BS_A) \quad (11)$$

Es handelt sich dabei um eine fiktive Ausgleichsfraktion, die abhängig von den Gehalten an fixem Kohlenstoff in den Brennstoffen A und B positive und negative Werte annehmen kann. Für die in Tabelle 18 angegebenen typischen Schwankungsbreiten der Anteile der einzelnen Fraktionen ergeben sich mögliche Unterschiede im fixen Kohlenstoffgehalt zwischen -6,5 und +6,5 Ma.-%.

Die Einführung der Hilfsfraktion  $C^*$  führt zur Erweiterung der in der Zielfunktion enthaltenen Gleichungen. Gleichungen (1) und (6) müssen daran wie folgt angepasst werden:

$$\xi_{c_{OB}} = \sum_i (n_i \xi_{c_i}) + \xi_{c^*} \quad (12)$$

$$h_{uOB} = \sum_i (n_i h_{u_i}) + \xi_{c^*} h_{u_c} + \xi_{wW} h_{u_w} \quad (13)$$

#### 4.4.2.2 Vergleich von berechneter und eingestellter Brennstoffzusammensetzung im instationären Betrieb

Die Ergebnisse der erweiterten Online-Bilanzierung für einen instationären Versuchszeitraum sollen hier am Beispiel von Versuch 9 aus Versuchswoche KW. 17 in 2022 vorgestellt werden. Bei diesem Versuch erfolgte die kontinuierliche Zugabe einer Grundmischung bestehend aus den 4 Komponenten Holzhackschnitzel, Altpapier, Tetra Pak® und Grünschnittkompost auf den Rost. Zusätzlich wurde einmalig zum Zeitpunkt  $t = 0$  eine definierte Menge Kunststoff-regranulat in den Aufgabetrichter gegeben. Tabelle 25 können die Zusammensetzungen der Grundmischung sowie des Kunststoffregranulats entnommen werden. Zusätzlich sind die zeitlich gemittelte theoretische und mit der Online-Bilanzierung bestimmte Zusammensetzung der Mischung aufgeführt. Es ist zu beachten, dass die Brennstoffmischung über den Versuchszeitraum bewusst geändert wurde, womit eine zeitliche Mittelung der Werte eine größere Unsicherheit mit sich bringt. Dennoch bietet sie einen ersten Anhaltspunkt zur Bewertung der Ergebnisse.

*Tabelle 25: Vergleichswerte und Berechnungsergebnisse aus der Online-Bilanzierung für den instationären Versuch 9 aus Versuchswoche KW. 17 in 2022*

		Vorgabe/Messwert			berechneter Wert
		Grundmischung (HOL, PPK, VER, ORG)	KUN	zeitlich gemittelt	zeitlich gemittelt
Brennstoffmassenstrom	[kg/h]	96,2	12,9	109,1	89,0
Heizwert	[MJ/h]	12,8	31,6	14,3	11,8
Kohlenstoffanteil	[Ma.-%]	34,0	70,6	39,2	31,4
Wasserstoffanteil	[Ma.-%]	5,0	9,1	5,4	4,1
Sauerstoffanteil	[Ma.-%]	30,3	16,1	25,1	22,6
Wasseranteil	[Ma.-%]	16,7	0,2	17,6	23,1
Ascheanteil	[Ma.-%]	13,9	2,6	12,4	18,8

Erwartungsgemäß zeigt sich eine stärkere Abweichung zwischen den theoretischen und berechneten Eigenschaften der Brennstoffmischung.

Zusätzlich sind in Abbildung 57 bis Abbildung 60 die zeitlichen Verläufe der berechneten Anteile an Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasser im Brennstoff sowie der untere Heizwert grafisch dargestellt. Die jeweils grau eingezeichneten Vergleichswerte aus den Labor-messungen spiegeln die Eigenschaften der Grundmischung ohne Zugabe des Kunststoff-regranulats wider.

Da sich zu Versuchsbeginn noch kein Kunststoff auf dem Rost befand, sollten zu diesem Zeitpunkt die berechnete Zusammensetzung und die Zusammensetzung der Grundmischung übereinstimmen. Hier treten Abweichungen auf. Nach ca. 15 Minuten Versuchszeit gelangt der Kunststoff auf den Rost. Die dadurch bedingten Veränderungen in der Zusammensetzung der Brennstoffmischung werden in Form eines Anstiegs des Kohlenstoffgehaltes und unteren

Heizwertes sowie eines leichten Abfalls von Sauerstoff- und Wassergehalt im Abfall rechnerisch erfasst. Nach etwa 30 Minuten Versuchszeit gleichen sich die berechneten Werte wieder den Startwerten an, der Kunststoff ist umgesetzt.

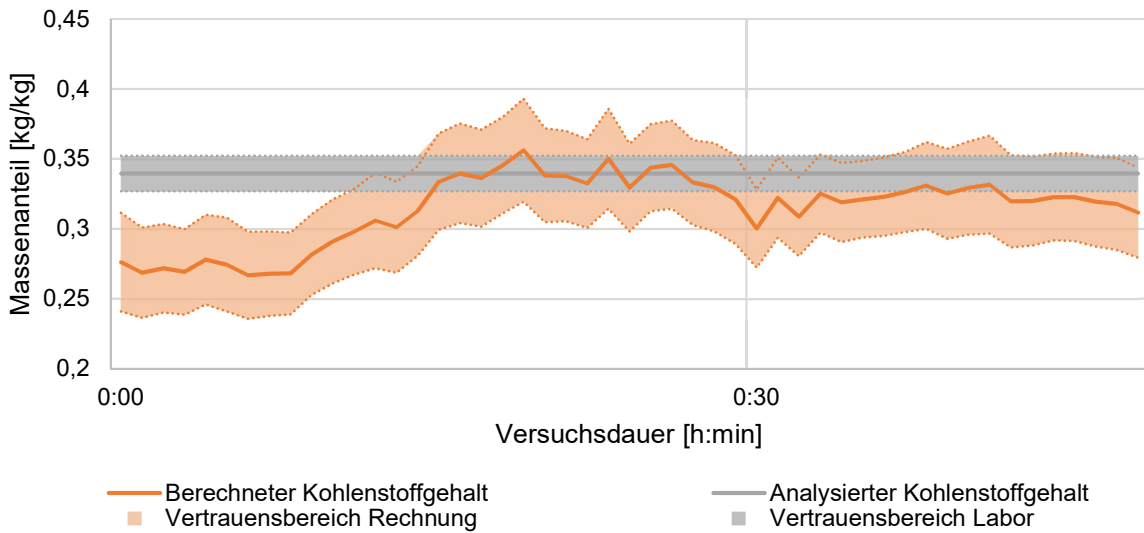


Abbildung 57: Berechneter und im Labor ermittelter Kohlenstoffgehalt der Brennstoffmischung im instationären Versuch 9 aus Versuchswoche KW. 17 in 2022 mit Angabe der Vertrauensbereiche

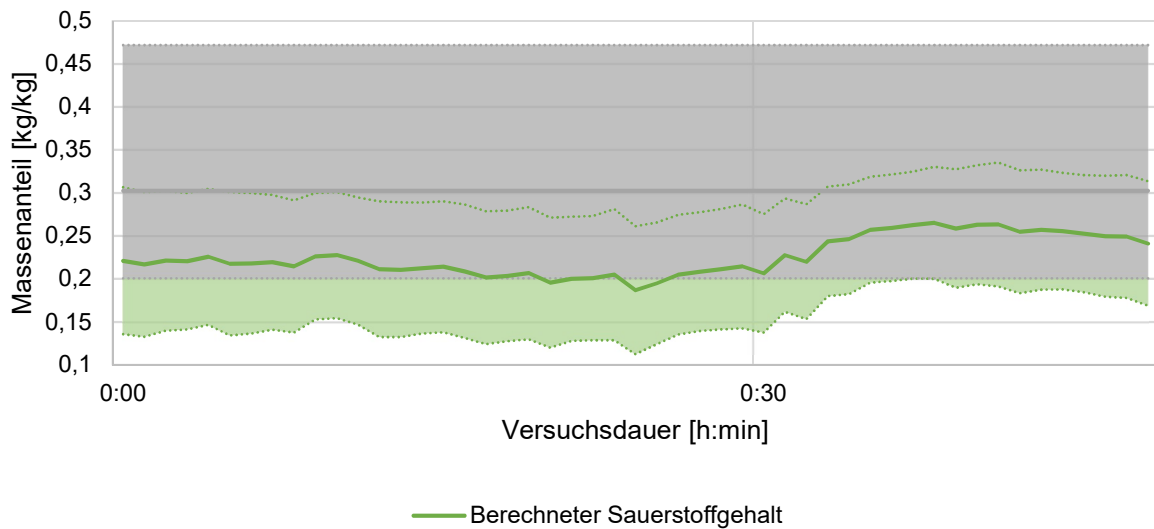


Abbildung 58: Berechneter und im Labor ermittelter Sauerstoffgehalt der Brennstoffmischung im instationären Versuch 9 aus Versuchswoche KW. 17 in 2022 mit Angabe der Vertrauensbereiche

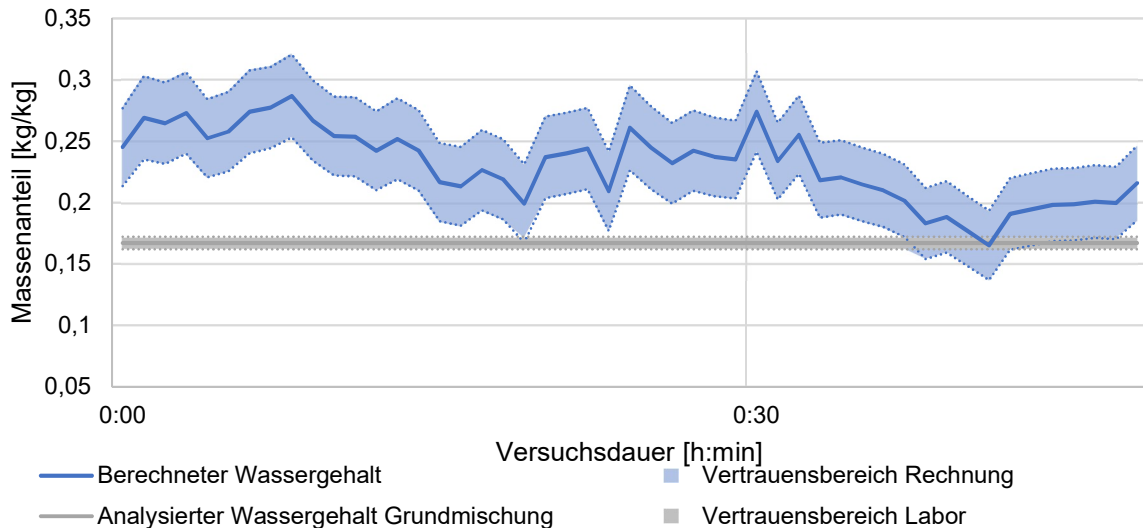


Abbildung 59: Berechneter und im Labor ermittelter Wassergehalt der Brennstoffmischung im instationären Versuch 9 aus Versuchswoche KW. 17 in 2022 mit Angabe der Vertrauensbereiche

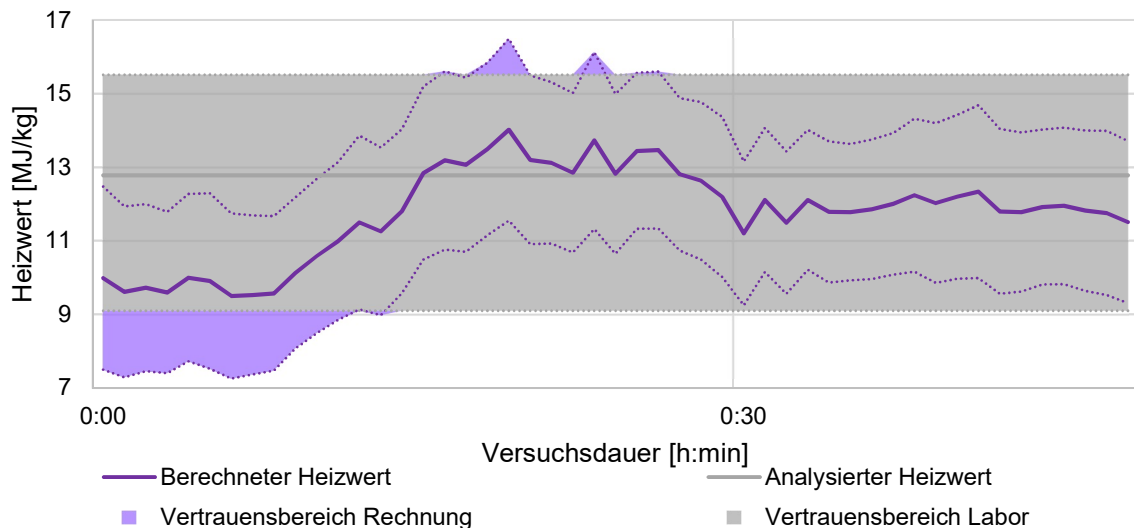


Abbildung 60: Berechneter und im Labor ermittelter unterer Heizwert der Brennstoffmischung im instationären Versuch 9 aus Versuchswoche KW. 17 in 2022 mit Angabe der Vertrauensbereiche

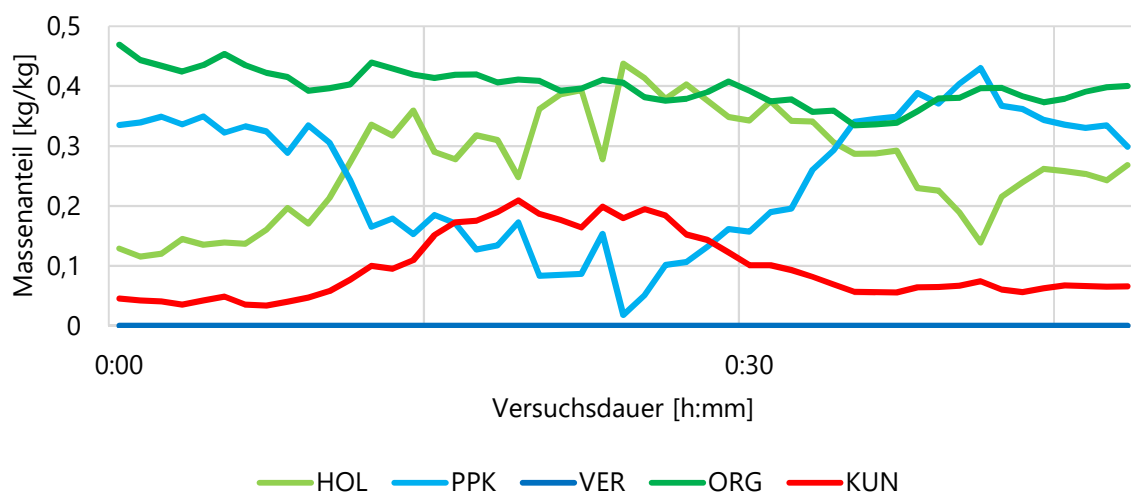
Die berechnete Brennstoffzusammensetzung weist somit für den instationären Fall stärkere Abweichungen auf als im stationären Betrieb. Dennoch können Veränderungen in der Brennstoffzusammensetzung zuverlässig erfasst werden.

In Tabelle 26 sind die vorgegebene und berechnete Fraktionszusammensetzung gemittelt über den Versuchszeitraum aufgetragen. Wie auch bei den Ergebnissen der Online-Bilanzierung ergeben sich hier stärkere Abweichungen zwischen den Werten als im stationären Fall. Diese resultieren einerseits aus den Abweichungen, die bereits in der Online-Bilanzierung aufgetreten sind und sich in der Fraktionsberechnung fortsetzen. Andererseits ist der Einfluss von Entmischungerscheinungen in der Mulde auf Grund des kürzeren Versuchszeitraumes wahrscheinlicher. Für die Hilfsfraktion  $C^*$  kann kein Vergleichswert angegeben werden, da es sich um eine fiktive Fraktion handelt, die nur als Momentanwert bei Änderung der Brennstoffzusammensetzung angegeben werden kann. Da für den Vergleichswert von einer sprunghaften Änderung der Brennstoffzusammensetzung ausgegangen wird, ist eine zeitliche Mittelung nicht sinnvoll.

*Tabelle 26: Vergleichswerte und Berechnungsergebnisse aus dem Numerischen Fraktionenmodell für den instationären Versuch 9 aus Versuchswoche KW. 17 in 2022*

		Vorgabe	berechneter Wert
Holzhackschnitzel	[Ma.-%]	12,7	25,3
Altpapier	[Ma.-%]	32,2	31,7
Tetra Pak®	[Ma.-%]	21,1	0,0
Grünschnittkompost	[Ma.-%]	22,3	37,7
Kunststoffregranulat	[Ma.-%]	11,8	8,7
Zusatzwasser	[Ma.-%]	0,0	-2,5
C*	[Ma.-%]		-0,8

Die Vermutung einer zeitlich schwankenden Zusammensetzung der Mischung in der Mulde, bestehend aus Holzhackschnitzeln, Altpapier und Tetra Pak® wird durch die zeitliche Auftragung der berechneten Brennstoffzusammensetzung unterstützt (Abbildung 61). Hier zeigt sich zwischen einer Versuchsdauer von ca. 10 und 35 Minuten ein berechneter Abfall des Anteils von Altpapier bei gleichzeitigem Anstieg des Anteils an Holzhackschnitzeln. Tetra Pak® wird über den gesamten Zeitraum nicht als einzelne Fraktion erkannt, sondern als Mischung aus Altpapier und Kunststoff berechnet, daher ist bereits zu Versuchsbeginn rechnerisch ein geringer Anteil an Kunststoff (ca. 4 Ma.-%) enthalten.



*Abbildung 61: Zeitlicher Verlauf der berechneten Fraktionszusammensetzung für den instationären Versuch 4 aus Versuchswoche KW. 17 in 2023*

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden in Abbildung 62 die Fraktionen Holzhackschnitzel, Altpapier, Tetra Pak® und Grünschnittkompost zusammengefasst und als Grundmischung aufgetragen. Dabei zeigt sich im Versuchszeitraum zwischen ca. 15 und 30 Minuten ein deutlicher Anstieg des berechneten Kunststoffanteils in der Mischungs-zusammensetzung. Dies stimmt mit dem wahren Versuchsverlauf sowie den Ergebnissen der Online-Bilanzierung überein. Eine Änderung in der Fraktionszusammensetzung kann mit den Fraktionenmodell somit nachgewiesen werden.

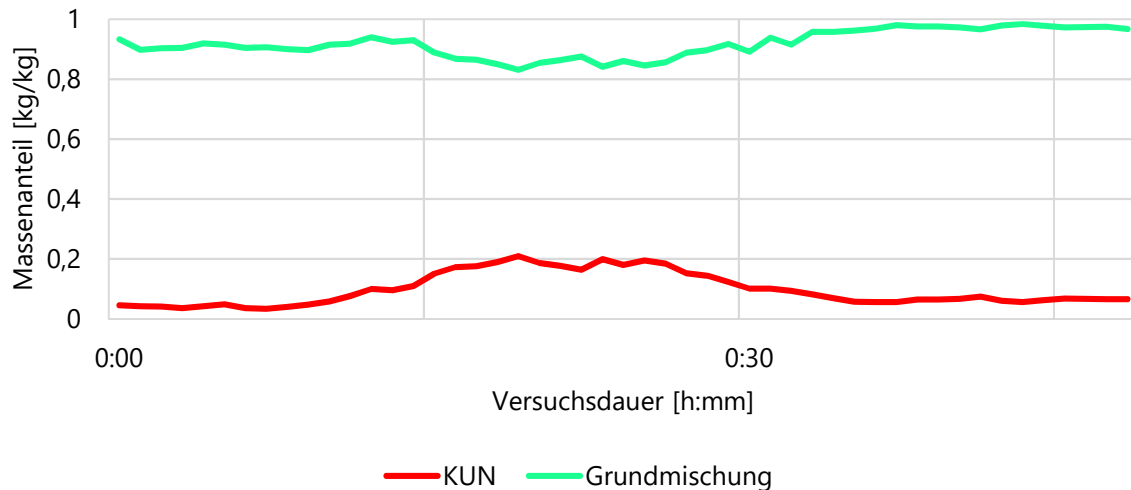


Abbildung 62: Zeitlicher Verlauf der berechneten Anteile an Grundmischung und Kunststoffregranulat für den instationären Versuch 4 aus Versuchswoche KW. 17 in 2023

## 4.5 Modellapplikation an Anlagen des PA als Praxistest

### 4.5.1 Anbindung an das Prozessleitsystem und Visualisierung der Ergebnisse

Im Projektrahmen sollte die Implementierung der Berechnungsmodelle an zwei Müllheizkraftwerken in Coburg und Burgkirchen erfolgen. Für das MHKW Coburg wurde bei der Festlegung der Schnittstellen zum Regelungssystem festgestellt, dass ein direkter Zugriff auf das Prozessleitsystem ohne weitere Vorbereitungen seitens des Herstellers aus sicherheitstechnischen Gründen nicht möglich ist. Auf Grund der Dauer und Kosten der notwendigen Vorbereitungen wurde entschieden archivierte Betriebsdaten durch das MHKW Coburg bereitzustellen. Übermittelt wurden die Daten von 133 Messstellen als Minuten-mittelwerte für den Zeitraum 01.07.2020 bis 30.06.2021.

Für das MHKW Burgkirchen wurde festgestellt, dass eine direkte Implementierung im Regelungssystem prinzipiell möglich, aber ebenfalls mit weiteren Kosten für das MHKW verbunden ist. Aus diesem Grund wurde sich vorerst dagegen entschieden. Von Seiten der Forschungsstellen wurde stattdessen die Bereitstellung von archivierten Daten zur Nachrechnung der Betriebszustände vorgeschlagen. Hierbei stellte sich heraus, dass nicht alle für die Berechnungen notwendigen Daten archiviert werden. Zudem erfolgt die Speicherung der Daten nur über einen begrenzten Zeitraum als Minutenmittelwerte, ältere Daten sind nur noch als Stunden- oder Tagesmittelwerte verfügbar. Da eine Berechnung mit diesen Werten zwar prinzipiell möglich ist, aber wenig Aussagekraft hat, konnte kein geeigneter Zeitpunkt für die Nachrechnung mit einer ausreichenden Menge an vorhandenen Daten gefunden werden. Vom MHKW Burgkirchen wurden folglich keine Betriebsdaten zur Auswertung bereitgestellt. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich deshalb nur auf das MHKW Coburg.

Auf eine direkte Einbindung in das Regelungssystem der Anlagen wurde in Absprache mit den Betreibern vorerst verzichtet. Eine spätere Implementierung der angepassten Berechnungsmodelle ist grundsätzlich möglich, sobald eine betriebsbegleitende Verbindung zur Messwertfassung vorhanden ist. Die grundlegende Möglichkeit zur betriebsbegleitenden Berechnung der Abfallzusammensetzung wurde in Kapitel 4.3.1.2 für die Pilotanlage des CUTEC gezeigt. Die Umsetzung im großtechnischen Maßstab kann auf die gleiche Weise erfolgen.

Trotz des Verzichtes auf die Implementierung der Berechnungsmodelle in das Regelungssystem der Anlagen des PA wurde eine Vorlage für die Nutzeroberfläche erstellt. Für die



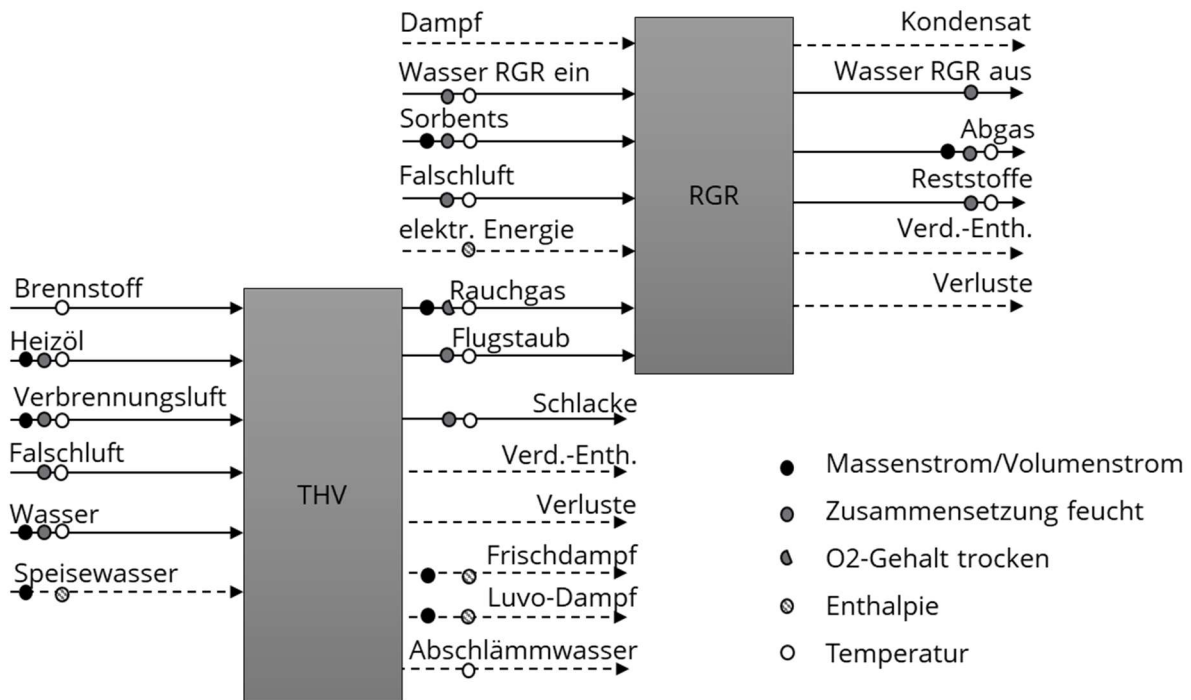


Abbildung 64: Bilanzräume THV und RGR mit allen ein- und austretenden Stoff- und Energieströmen sowie Kennzeichnung der Messstellen für das MHKW Coburg

Im Gegensatz zur Pilotanlage des CUTEC handelt es sich bei der RGR im MHKW Coburg um ein Nassverfahren mit einem Wäscher pro Linie. Da der Massenstrom des in den Wäscher zugeführten Wassers nicht gemessen wird, muss ein weiterer Bilanzraum um den Wäscher eingeführt werden (Abbildung 65).

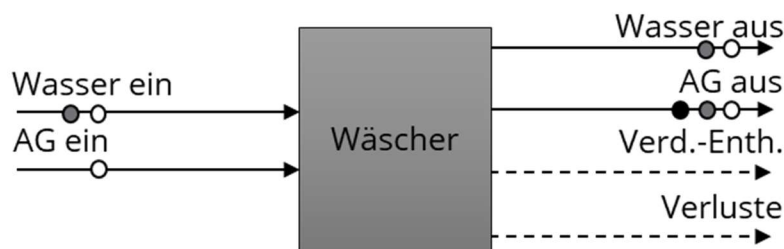


Abbildung 65: Bilanzraum Wäscher mit allen ein- und austretenden Stoff- und Energieströmen für das MHKW Coburg

Die Berechnung erfolgt in der folgenden Reihenfolge:

1. Berechnung des trockenen Rauchgasmassenstromes vor RGR aus der Sauerstoffbilanz um die RGR
2. Berechnung des verdampften Wassermassenstromes in der RGR über die Bilanz um Wäscher

$$m_{W,V} = \frac{m_{AG,aus} \cdot (c_{AG,ein} \cdot \vartheta_{AG,ein} - c_{AG,aus} \cdot \vartheta_{AG,aus}) + m_{W,aus} \cdot c_W \cdot (\vartheta_{W,ein} - \vartheta_{AG,aus})}{h_{V,W} + c_{AG,ein} \cdot \vartheta_{AG,ein} - c_W \cdot \vartheta_{W,ein}} \quad (14)$$

**Annahme:** komplette Verdampfung des in den Sprühabsorber eintretenden Wassers

3. Berechnung des Wassergehaltes des Rauchgases vor RGR über die Wasserbilanz um die RGR
4. Berechnung Falschluffmenge zu THV über Stickstoffbilanz um THV
5. Berechnung Brennstoffmassenstrom über Massenbilanz um THV
6. Berechnung Brennstoffzusammensetzung über Element- und Wasserbilanz um THV

## 7. Berechnung des Brennstoffheizwertes aus der Brennstoffzusammensetzung

Als Ergebnisse erhält man den Brennstoffmassenstrom, die Zusammensetzung (C, H, O, Wasser) sowie den unteren Heizwert des Brennstoffes. Der Aschegehalt des Brennstoffes kann mit den betriebsbegleitend erfassten Messdaten nicht ermittelt werden, stattdessen wurde für die Berechnung ein fester Wert von 20 Ma.-% angenommen.

Die Ergebnisse aus der Online-Bilanzierung konnten anschließend für die Berechnung der Fraktionszusammensetzung mit Hilfe des Numerischen Fraktionenmodells genutzt werden. Hierbei ist keine Anpassung an die spezielle Anlage notwendig, da keine anlagenspezifischen Daten in die Berechnung eingehen.

Die Ergebnisse der Berechnung sind in Abbildung 66 bis Abbildung 69 als Monatswerte dargestellt. Die Berechnung erfolgte von September 2020 bis Juni 2021. Im Juli und August 2020 fand die Anlagenrevision statt, so dass für diese Monate nur sehr wenig auswertbare Betriebsdaten vorlagen.

Abbildung 66 zeigt die Auftragung des monatlich verbrannten Abfallmassenstromes als Vergleich von Messwerten und Berechnungsergebnissen. Die Messwerte wurden vom Kraftwerk in Form der monatlich angelieferten Abfallmenge laut Eingangswaage zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurde die Änderung des Bunkerstandes monatlich visuell eingeschätzt und in die Ermittlung des Vergleichswertes einbezogen. Für die Berechnungsergebnisse wurden die über einen Monat minütlich berechneten Brennstoffmassenströme aufsummiert. Auf Grund von Anlagenstillständen und Messgerätkalibrierungen sowie Ausfällen und Fehlern an Messgeräten konnte nicht für jede Minute ein Brennstoffmassenstrom berechnet werden. Für die Aufsummierung über einen Monat wurde deshalb ermittelt für welchen Anteil an Minuten keine Berechnung stattfinden konnte und der aus den Berechnungsergebnissen aufsummierte Massenstrom entsprechend hochskaliert. Der Vergleich zwischen den berechneten und gemessenen Werten zeigt eine gute Übereinstimmung und bietet somit eine erste Plausibilitätsprüfung der Berechnungsergebnisse.

In Abbildung 67 ist die Brennstoffzusammensetzung laut Online-Bilanzierung aufgetragen. Die Ergebnisse liegen in einem für Abfall typischen Bereich und weisen nur geringe Unterschiede zwischen den Monaten auf. Der daraus berechnete und in Abbildung 68 aufgetragene Heizwert bietet die Möglichkeit eines weiteren Plausibilitätscheck. Dazu sind der mit dem Berechnungswerkzeug ermittelte und sich aus betriebsinternen Auswertungen ergebende untere Heizwert vergleichend aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass der mit Hilfe des Berechnungswerkzeuges ermittelte Heizwert für den gesamten Betrachtungszeitraum über dem intern ermittelten Wert liegt. Als Gründe hierfür können einerseits die nicht emissions-relevante Messung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes im Rauchgas am Kamin und andererseits die Verdunstung eines Teils des im Abfall enthaltenen Wassers im Abfallbunker genannt werden. Die Unsicherheit des CO<sub>2</sub>-Messwertes führt vermutlich zu einer leichten Überschätzung des Kohlenstoffgehaltes in der Abfallmischung. Zusätzlich verdunstet ein Teil des im Abfall enthaltenen Wassers auf Grund der erhöhten Temperaturen bereits im Bunker. Dieses Wasser gelangt mit der Bunkerluft somit bereits gasförmig in den Feuerraum. Die Verläufe weisen jedoch parallele Trends auf. Dabei ergibt sich im September ein unterer Heizwert der deutlich über dem durchschnittlichen Wert liegt. Zu begründen ist dies mit der in den Vormonaten durchgeführten Revision. Während dieser Zeit kann kein Abfall verbrannt werden. Während der Hausmüll auf einer Deponie zwischengelagert wird, sammelt sich der heizwertreichere Sperrmüll im Abfallbunker an. Nach der Revision wird vorrangig Abfall aus dem Bunker verbrannt, welcher durch den hohen Sperrmüllanteil einen höheren Heizwert aufweist. Eine zweite Erhöhung des Heizwertes ist im Dezember festzustellen. Diese lässt sich vermutlich mit dem verringerten Bioabfallaufkommen begründen.

Abbildung 69 stellt weiterhin die fraktionsmäßige Brennstoffzusammensetzung, berechnet mit dem Fraktionenmodell, dar. Ein Vergleich mit Betriebsdaten ist hier nicht möglich, da die Fraktionszusammensetzung eine Information ist, die durch die Anwendung der Modelle zusätzlich bereitgestellt werden kann.

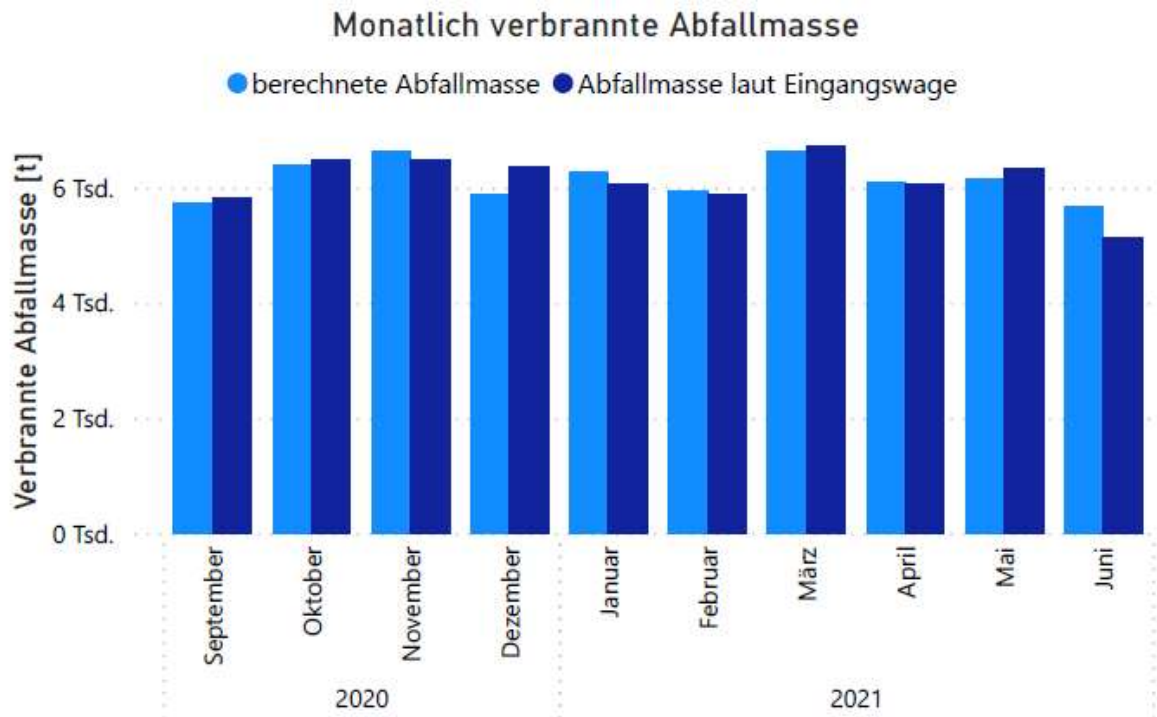


Abbildung 66: Vergleich der berechneten und gemessenen monatlich verbrannten Abfallmasse von September 2020 bis Juni 2021 im MHKW Coburg

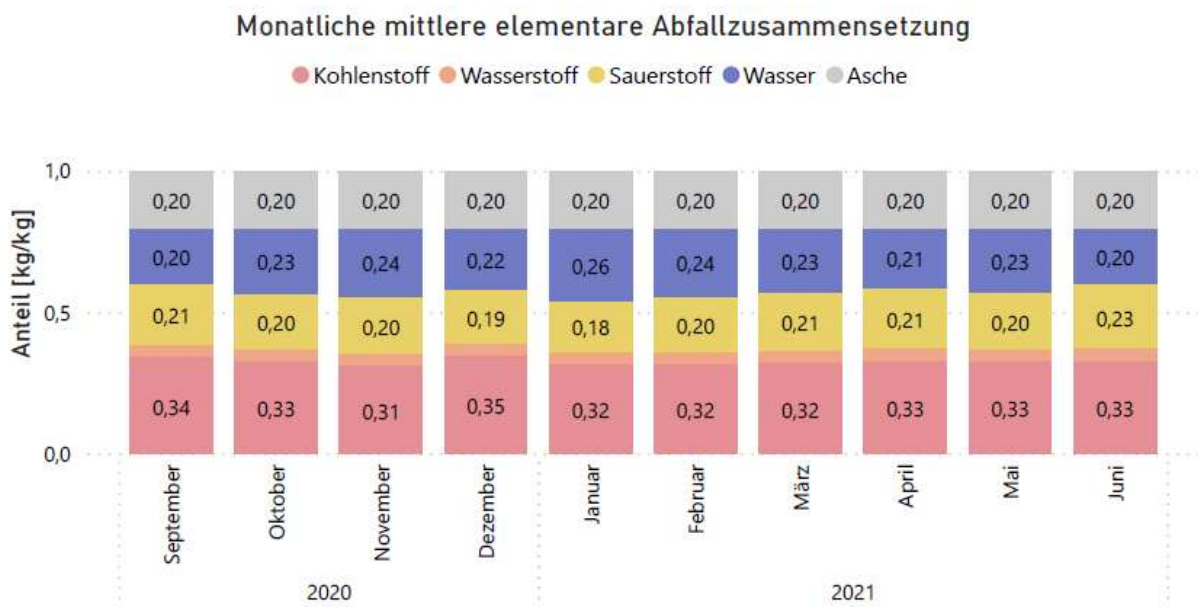


Abbildung 67: Ergebnisse der mittleren monatlichen Brennstoffzusammensetzung berechnet mit der erweiterten Online-Bilanzierung von September 2020 bis Juni 2021 im MHKW Coburg



Abbildung 68: Ergebnisse des mittleren monatlichen Brennstoffheizwertes berechnet mit der erweiterten Online-Bilanzierung und aus internen Berechnungen von September 2020 bis Juni 2021 im MHKW Coburg

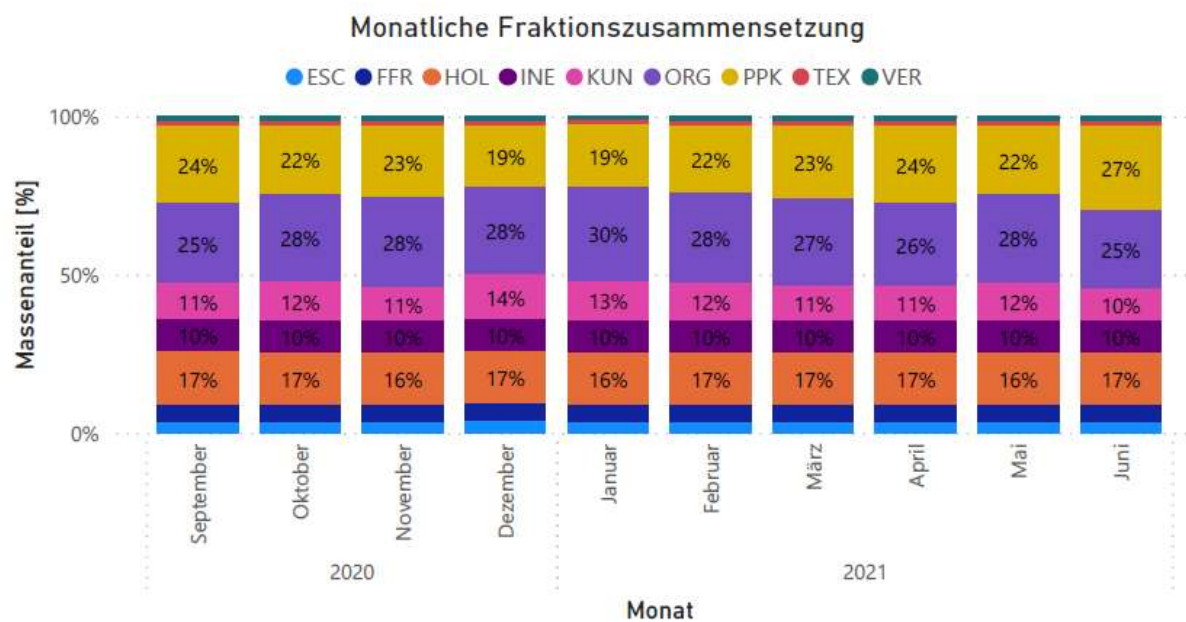


Abbildung 69: Ergebnisse der mittleren monatlichen Brennstoffzusammensetzung berechnet mit dem Numerischen Fraktionenmodell von September 2020 bis Juni 2021 im MHKW Coburg

#### 4.5.3 Möglichkeiten zur automatisierten Prozesssteuerung

Aus den zusätzlichen Informationen, die aus den Berechnungen mit der erweiterten Online-Bilanzierung und dem Numerischen Fraktionenmodell bereitgestellt werden können, lassen sich Hinweise auf die optimale Betriebsführung ableiten. In Abbildung 70 sind für einen zufällig gewählten Zeitraum von 21 Stunden die berechneten Brennstoffzusammensetzungen als Stundenmittelwerte dargestellt. Es zeigt sich, dass teilweise große Unterschiede in verhältnismäßig kurzen Zeiträumen auftreten. Wird das Berechnungswerkzeug mit dem

Prozessleitsystem gekoppelt, können diese Veränderungen betriebsbegleitend erkannt und entsprechende Anpassungen im Betriebsablauf eingeleitet werden.

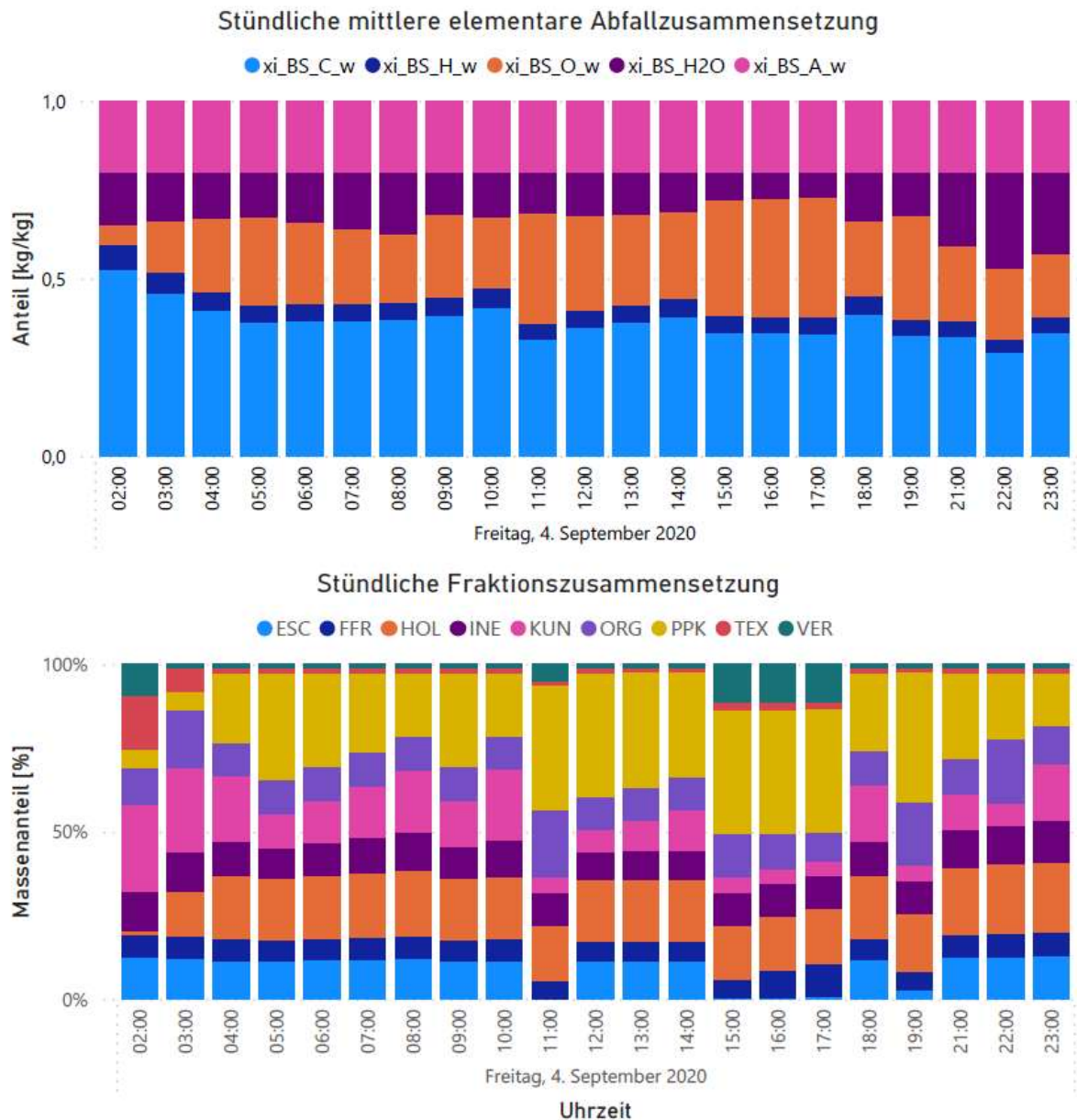


Abbildung 70: Stündlich gemittelte Abfallzusammensetzung im MHWK Coburg für einen Zeitraum von 21 Stunden am 04.09.2020

#### 4.6 Abschließende Betrachtung

Im Rahmen des Projektes wurde ein Berechnungswerkzeug bestehend aus erweiterter Online-Bilanzierung und Numerischem Fraktionenmodell weiterentwickelt, um neben der Anwendung bei gleichbleibender Brennstoffzusammensetzung auch die im großtechnischen Maßstab relevanten Zustände mit wechselnder Brennstoffzusammensetzung abbilden zu können.

Die Validierung des Berechnungswerkzeugs erfolgte im Pilotmaßstab mit synthetisch erzeugten Brennstoffmischungen mit gleichbleibender und wechselnder Zusammensetzung. Für längere Betriebszeiten mit konstantem Brennstoffinput konnte eine gute mittlere Übereinstimmung von berechneter und eingesetzter Brennstoffzusammensetzung sowohl im Sinne der Anteile von Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Wasser und Asche als auch in der

fraktionsmäßigen Aufteilung erreicht werden. Die Veränderung der Brennstoffzusammensetzung innerhalb der Versuchszeitraumes führte zu einer leichten Vergrößerung der Abweichung zwischen der berechneten Zusammensetzung und den Vorgabewerten. Veränderungen in der Zusammensetzung des aufgegebenen Brennstoffes wurden zuverlässig nachgewiesen.

Ein Vergleich der gemessenen Betriebsparameter mit einem im ChemCAD erstellten Modell der Anlage ließ auf eine Ungenauigkeit in der Messung der Rauchgaszusammensetzung hinsichtlich Kohlenstoffdioxid- und Wasseranteil schließen. Die Auswirkungen der an allen Messgeräten auftretenden Messunsicherheiten wurden zusätzlich in einer Fehlerrechnung betrachtet. Die resultierenden Vertrauensbereiche für die Berechnungsergebnisse und die im Labor ermittelten Werte sind unterschiedlich groß und überschneiden sich für fast alle Versuchszeiträume.

Weiterhin wurde die Anbindung des Berechnungswerkzeugs an das Prozessleitsystem und die Umsetzbarkeit der betriebsbegleitenden Berechnung und Visualisierung der gewünschten Abfalleigenschaften im Pilotmaßstab nachgewiesen.

Die Umsetzung im großtechnischen Maßstab wurde anhand der Auswertung von Betriebsdaten aus dem MHKW Coburg durchgeführt. Ein Vergleich mit betriebsintern ermittelten Daten zur verbrannten Abfallmasse und zum unteren Brennstoffheizwert ermöglichte einen Plausibilitätscheck der berechneten Abfalleigenschaften. Dabei ergab sich für den Abfallmassenstrom im Monatsmittel eine gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Werten. Der Brennstoffheizwert folgt im Berechnungswerkzeug direkt aus den ermittelten Anteilen von Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Wasser im Brennstoff und ermöglicht somit eine Plausibilitätsprüfung der berechneten Anteile. Dabei zeigte sich, ähnlich den Ergebnissen im Pilotmaßstab, eine Abweichung zwischen den Absolutwerten des mit dem Berechnungswerkzeug ermittelten und intern angegebenen unteren Brennstoffheizwertes. Veränderungen konnten jedoch in Richtung und Betrag korrekt nachgewiesen werden.

Zusammenfassend kann damit geschlossen werden, dass das entwickelte Berechnungswerkzeug betriebsbegleitend zusätzliche Informationen über die Zusammensetzung des verbrennenden Abfalls auf dem Rost bereit stellen und so zur Optimierung des Anlagenbetriebs beitragen kann.

## **5 Verwendung der Zuwendungen**

### **5.1 Forschungsstelle 1: EVT**

#### **Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 und A.2 des Finanzierungsplanes)**

Im Projekt wurde wissenschaftlich-technisches Personal für 28,5 Monate angestellt. Die im Einzelfinanzierungsplan veranschlagte Summe für wissenschaftlich-technisches Personal wurde leicht überschritten.

Bei den Kostenarten A.4 *Pauschale für sonstige Personalausgaben* sowie D. *Pauschale für Sonstige Ausgaben* wurden die Maximalgrenzen nicht überschritten.

#### **Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)**

Es waren keine Gerätebeschaffungen notwendig.

#### **Leistungen Dritter (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)**

Leistungen Dritter wurden für Fraunhofer/Bestimmung der elementaren Flüchtigenzusammensetzung Abfallfraktionen verausgabt.

### **5.2 Forschungsstelle 2: CUTEC**

#### **Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplanes) und damit verbundene Einzelansätze**

Im Projekt wurde wissenschaftlich-technisches Personal im Umfang von 16,45 Personenmonaten eingesetzt. Das im Einzelfinanzierungsplan bewilligte Limit von maximal 17,00 Personenmonaten wurde leicht unterschritten.

Bei den Kostenarten A.4 *Pauschale für sonstige Personalausgaben* sowie D. *Pauschale für Sonstige Ausgaben* wurden die Maximalgrenzen nicht überschritten.

#### **Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)**

Es waren keine Gerätebeschaffungen notwendig

#### **Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)**

Es waren keine Ausgaben Dritter geplant und auch nicht getätigt.

## **6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten**

Die durchgeführten Arbeiten entsprechen der im Antrag angegebenen Vorgehensweise und waren vor dem Hintergrund der Zielstellung notwendig und angemessen. Dies betrifft sowohl die durchgeführten theoretischen Arbeiten im Bereich der Anlagenbilanzierung und dem Numerischen Fraktionenmodell als auch den experimentellen Untersuchungen an der Rostfeuerung.

## 7 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

### 7.1 Durchgeführte Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

*Tabelle 27: Durchgeführte Maßnahmen zum Ergebnistransfer (Stand zum 30.11.2023)*

Maßnahme	Ziel / Rahmen	Zeitraum
Projektfortschritttreffen mit dem PA	Erste Sitzung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss	15. März 2021
	Zweite Sitzung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss	15. März 2022
	Abschlusstreffen mit dem Projektbegleitenden Ausschuss	30. August 2023
Vorträge der Forschungsstellen auf Fachtagungen	33. VDI-/ITAD-Konferenz Thermische Abfallbehandlung 2021, Würzburg	16. September 2021
	53. Kraftwerkstechnisches Kolloquium TU Dresden	5.-6. Oktober 2021
	Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung, Bamberg	30. März – 01. April 2022
	Mini-workshop of HZDR/Institute of Fluid Dynamics /TUD Process Engineering with guests from Wroclaw University of Science and Technology, Dresden	22.-23. Juni 2023
	The 28th International Conference on the Impact of Fuel Quality on Power Production and the Environment, Åre, Schweden	19. – 23. September 2022
	Workshop Intelligente Sensoren und Regelungstechnik für Biomassefeuerungen der Zukunft, Nürnberg	07. Dezember 2022
	Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung, Dresden	06.-07. März 2023
31. Deutscher Flammentag für nachhaltige Verbrennung, Berlin	27.-28. September 2023	
Wissenschaftliche Publikationen	Kraftwerkstechnik 2021 ISBN: 978-949169-01-4	Oktober 2021
	Fuel 343 Special Issue zu „The 28th International Conference on the Impact of Fuel	Juli 2023

Quality on Power Production and the Environment”

## 7.2 Geplante Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

*Tabelle 28: Geplante Transfermaßnahmen*

Maßnahme	Ziel / Rahmen	Zeitraum
Beiträge der Forschungsstellen auf Fachtagungen	14th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers (INFUB-14), Algarve, Portugal	02. – 05.04.2024
Eingang in die Lehre	Darstellung der wissenschaftlichen Ergebnisse gegenüber Ingenieurnachwuchs	ab WS 23/24
Dissertation	Dokumentation und Weiterentwicklung wissenschaftlicher Ergebnisse	2025

## 7.3 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Das Projekt konnte auf zahlreichen Fachtagungen sowohl potenziellen zukünftigen Anwendern aus der Industrie als auch wissenschaftlichem Fachpublikum vorgestellt werden. Insbesondere durch die Teilnahme an der 28th International Conference on the Impact of Fuel Quality on Power Production and the Environment und der bereits zugesagten Teilnahme an der 14. INFUB-Conference werden die Projektergebnisse auch einem internationalen Publikum vorgestellt. Weiterhin werden die Projekterkenntnisse im Rahmen für eine geplante Dissertation weiterentwickelt.

## 8 Nutzen der Ergebnisse für KMUs

Bereits während der Projektlaufzeit wurde das Berechnungsmodell an eine konkrete Beispielanlage angepasst und konnte zur Nachrechnung des Betriebs genutzt werden. Die Ergebnisse und entwickelten Modelle können der Anlage zur weiteren Nutzung zur Verfügung gestellt werden.

Mit der Fraktionszusammensetzung des Abfalls und den bekannten Anteilen von Schadstoffen in jeder Fraktion ist die Bestimmung der Schadstofffrachten im Rohgas zu jedem Zeitpunkt möglich. Dies eröffnet den an den vorliegenden Betriebszustand angepassten Einsatz von Additiven zur Abgasreinigung. Eine Kombination mit dem im Rahmen der Dissertation von Herrn Dr. Daniel Beerbaum [23] entwickelten Modell zur Additiv Eindüsung wird überprüft.

Weiterhin besteht vor dem Hintergrund der geplanten CO<sub>2</sub>-Bepreisung für Abfallverbrennungsanlagen Interesse an der rechnerischen Bestimmung des biogenen Anteils ausgehend von der Fraktionszusammensetzung. Über die Zuweisung eines biogenen Anteils jeder Fraktion kann die Ermittlung direkt aus den Ergebnissen des Fraktionenmodells erfolgen.

Zusätzlich bestehen Überlegungen zur Kopplung des Modells mit Wärmestrom- und Belagsensoren (siehe [24, 25]), um langfristige Aussagen über den Zusammenhang von Ablagerungen an den Kesselwänden und der Brennstoffzusammensetzung treffen zu können.

Darüber hinaus wird seitens des KMU Enverum GmbH geprüft, inwiefern Teilmodelle des entwickelten Berechnungswerkzeuges in das vom Unternehmen entwickelte Assistenzsystem zur Optimierung von Abfallverbrennungsanlagen implementiert werden kann.

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammensetzung des deutschen Hausmülls, abgeleitet aus [1]; PPK: Papier/Pappe/Karton; Feinmüll: Kehricht, Asche etc.; Inertmaterial: Steine, Sand etc.; Problem- und Schadstoffe: Batterien, Lacke etc.; Sonstige Abfälle: Renovierungsabfälle etc.	7
Abbildung 2: Lösungsweg zu den Aufgaben der CUTEC.....	8
Abbildung 3: Foto der CUTEC-Technikumsanlage.....	10
Abbildung 4: Apparategrundfließbild der CUTEC-Technikumsanlage mit Messstellen .....	12
Abbildung 5: Holzhackschnitzel (links) und Grünschnittkompost (rechts).....	13
Abbildung 6: Angelieferte PPK-Fraktion (links) und Tetra Pak (rechts).....	14
Abbildung 7: Kunststofffraktionen: PE/PVC/PET (links), PET (rechts, oben), PE (rechts, unten) .....	14
Abbildung 8: Aufbau der Additivschnecke zur Aufnahme der Schneckenkennlinie .....	16
Abbildung 9: Schneckenkennlinie von Grünschnittkompost (links) und Kunststoffmischung (rechts).....	17
Abbildung 10: Vergleich Modellrechnung mit der experimentell ermittelten Schneckenkennlinie .....	17
Abbildung 11: Konzept zum Datentransfer.....	18
Abbildung 12: Bild der IR-Kamera im Versuchsbetrieb .....	20
Abbildung 13: Brennbetttemperatur in Rostzone 2 + CO <sub>2</sub> -Konzentration über der Versuchsdauer (Versuch Nr. 09 in KW. 17.2022).....	21
Abbildung 14: CO <sub>2</sub> -Konzentration und Heizwert als Funktion der Brennstoffmischung, exemplarisch dargestellt für Versuchswoche KW. 16 in 2021 .....	22
Abbildung 15: Verbleib des Kohlenstoffs aus dem Brennstoff, exemplarisch dargestellt für Versuchswoche KW. 16 in 2021 .....	22
Abbildung 16: Wassergehalte in Brennstoff und Abgas für Versuchswoche KW. 16 in 2021 .....	23
Abbildung 17: Bilanz von HCl in Ein- und Ausgang in Versuchswoche KW. 16 in 2021 .....	24
Abbildung 18: Bilanz von HCl in Ein- und Ausgang in Versuchswoche KW. 16 in 2021 .....	24
Abbildung 19: Zusammenhang von SO <sub>2</sub> -Konzentration im Abgas und Schwefelgehalt der Brennstoffmischung in Versuchswoche KW. 16 in 2021 .....	25
Abbildung 20: Zusammenhang von NO <sub>x</sub> -Konzentration im Abgas und Stickstoffgehalt der Brennstoffmischung in Versuchswoche KW. 16 in 2021 .....	25
Abbildung 21: Sankeyähnliches Diagramm für C, S und N für den Versuch 02 in KW 16.2021 .....	26
Abbildung 22: Diagramm für C, S und N in der Einheit [Ma.-%] .....	27
Abbildung 23: Verteilung von Alkali, Erdalkali und Silizium in der Rostasche in Abhängigkeit von der Brennstoff-zusammensetzung .....	28
Abbildung 24: Grundfließbild des Rostmodells .....	31
Abbildung 25: Einfluss der absoluten Luftfeuchtigkeit auf den H <sub>2</sub> O-Messwert .....	38
Abbildung 26: Vergleich des CO <sub>2</sub> -Gehalts gemäß Verbrennungsrechnung aus experimentellen Daten mit den Messwerten für die Versuchswoche KW. 16.2021 .....	39
Abbildung 27: Messfehler für CO <sub>2</sub> an GA 1 gemäß Kalibrierung .....	40
Abbildung 28: Messfehler für CO <sub>2</sub> an GA 2 gemäß Kalibrierung .....	40
Abbildung 29: Messfehler für CO <sub>2</sub> an GA 3 gemäß Kalibrierung .....	41
Abbildung 30: Foto des Entnahmebereichs der Proben zur Bestimmung der Brennstoffhomogenität .....	42
Abbildung 31: Ergebnisse der ersten Sortieranalyse zur Überprüfung der Brennstoffhomogenität .....	42
Abbildung 32: Ergebnisse der zweiten Sortieranalyse zur Überprüfung der Brennstoffhomogenität .....	43

Abbildung 33: Temperatur der Umgebungsluft während Versuchswoche KW. 17 in 2023 aus Messungen des DWD in Braunlage und auf dem Brocken sowie eigene Messungen neben der Anlage des CUTEC .....	44
Abbildung 34: Feuchtigkeit der Umgebungsluft während Versuchswoche KW. 17 in 2023 aus Messungen des DWD in Braunlage und auf dem Brocken sowie eigene Messungen neben der Anlage des CUTEC .....	44
Abbildung 35: Temperatur der Umgebungsluft während Versuchswoche KW. 17 in 2022 außerhalb der Versuchshalle und an verschiedenen Positionen neben der Anlage .....	45
Abbildung 36: Temperatur der Umgebungsluft während Versuchswoche KW. 17 in 2022 außerhalb der Versuchshalle und an verschiedenen Positionen neben der Anlage .....	45
Abbildung 37: Messaufbau zur Überprüfung von Strahlenbildung im Rauchgas hinter der NBK .....	46
Abbildung 38: Aufgenommene CO <sub>2</sub> -Anteile im Rauchgas hinter der NBK mit der Referenz- und Vergleichsmessung im Rahmen der Überprüfung auf Strahlenbildung .....	46
Abbildung 39: Aufgenommene O <sub>2</sub> -Anteile im Rauchgas hinter der NBK mit der Referenz- und Vergleichsmessung im Rahmen der Überprüfung auf Strahlenbildung .....	47
Abbildung 40: Überblick über die Umkehrung der Verbrennungsrechnung mittels erweiterter Online-Bilanzierung und numerischem Fraktionenmodell .....	48
Abbildung 41: Berechnungsschema der erweiterten Online-Bilanzierung .....	49
Abbildung 42: Schematische Darstellung der Rostfeuerungsanlagen des CUTEC mit Unterteilung in Bilanzräume.....	49
Abbildung 43: Darstellung des Bilanzraumes THV mit allen ein- und austretenden Stoffströmen sowie den geordneten Berechnungsschritten zur Ermittlung des Brennstoffmassenstromes	50
Abbildung 44: Auszug aus den betriebsbegleitend erstellten Visualisierungen von Messwerten und Berechnungsergebnissen .....	51
Abbildung 45: Zusammenstellung der Anteile an Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Wasser und Asche sowie der untere Heizwert der einzelnen im Abfall enthaltenen Fraktionen [8–15] .....	52
Abbildung 46: Ermittelter Flüchtigengehalt von Altpapier bei Pyrolyse bei unterschiedlichen Temperaturen .....	54
Abbildung 47: Trockene Zusammensetzung der Flüchtigen und Reststoffe bei Pyrolyse von Altpapier bei unterschiedlichen Temperaturen .....	55
Abbildung 48: Trockene Zusammensetzung der Reststoffe bei Pyrolyse von Altpapier bei unterschiedlichen Temperaturen.....	55
Abbildung 49: Berechnungsschema des numerischen Fraktionenmodells.....	56
Abbildung 50: Sauerstoffgehalt im Rauchgas hinter dem THV (GA 2) und hinter der RGR (GA 3) während des Versuchs 4 in Versuchswoche KW. 17 in 2023.....	58
Abbildung 51: Kohlenstoffdioxidgehalt im Rauchgas hinter dem THV (GA 2) und hinter der RGR (GA 3) während des Versuchs 4 in Versuchswoche KW. 17 in 2023.....	58
Abbildung 52: Berechneter und im Labor ermittelter Kohlenstoffgehalt der Brennstoffmischung im stationären Versuch 4 aus Versuchswoche KW. 17 in 2023 mit Angabe der Vertrauensbereiche .....	61
Abbildung 53: Berechneter und im Labor ermittelter Sauerstoffgehalt der Brennstoffmischung im stationären Versuch 4 aus Versuchswoche KW. 17 in 2023 mit Angabe der Vertrauensbereiche .....	61
Abbildung 54: Berechneter und im Labor ermittelter Wassergehalt der Brennstoffmischung im stationären Versuch 4 aus Versuchswoche KW. 17 in 2023 mit Angabe der Vertrauensbereiche .....	62
Abbildung 55: Berechneter und im Labor ermittelter unterer Heizwert der Brennstoffmischung im stationären Versuch 4 aus Versuchswoche KW. 17 in 2023 mit Angabe der Vertrauensbereiche .....	62

Abbildung 56: Schematische Darstellung der Unterteilung des Verbrennungsrostes in zwei Zonen .....	64
Abbildung 57: Berechneter und im Labor ermittelter Kohlenstoffgehalt der Brennstoffmischung im instationären Versuch 9 aus Versuchswoche KW. 17 in 2022 mit Angabe der Vertrauensbereiche .....	66
Abbildung 58: Berechneter und im Labor ermittelter Sauerstoffgehalt der Brennstoffmischung im instationären Versuch 9 aus Versuchswoche KW. 17 in 2022 mit Angabe der Vertrauensbereiche .....	66
Abbildung 59: Berechneter und im Labor ermittelter Wassergehalt der Brennstoffmischung im instationären Versuch 9 aus Versuchswoche KW. 17 in 2022 mit Angabe der Vertrauensbereiche .....	67
Abbildung 60: Berechneter und im Labor ermittelter unterer Heizwert der Brennstoffmischung im instationären Versuch 9 aus Versuchswoche KW. 17 in 2022 mit Angabe der Vertrauensbereiche .....	67
Abbildung 61: Zeitlicher Verlauf der berechneten Fraktionszusammensetzung für den instationären Versuch 4 aus Versuchswoche KW. 17 in 2023.....	68
Abbildung 62: Zeitlicher Verlauf der berechneten Anteile an Grundmischung und Kunststoffregranulat für den instationären Versuch 4 aus Versuchswoche KW. 17 in 2023 ..	69
Abbildung 63: Entwurf der Nutzeroberfläche der berechneten Abfalldaten .....	70
Abbildung 64: Bilanzräume THV und RGR mit allen ein- und austretenden Stoff- und Energieströmen sowie Kennzeichnung der Messstellen für das MHKW Coburg.....	71
Abbildung 65: Bilanzraum Wäscher mit allen ein- und austretenden Stoff- und Energieströmen für das MHKW Coburg .....	71
Abbildung 66: Vergleich der berechneten und gemessenen monatlich verbrannten Abfallmasse von September 2020 bis Juni 2021 im MHKW Coburg.....	73
Abbildung 67: Ergebnisse der mittleren monatlichen Brennstoffzusammensetzung berechnet mit der erweiterten Online-Bilanzierung von September 2020 bis Juni 2021 im MHKW Coburg .....	73
Abbildung 68: Ergebnisse des mittleren monatlichen Brennstoffheizwertes berechnet mit der erweiterten Online-Bilanzierung und aus internen Berechnungen von September 2020 bis Juni 2021 im MHKW Coburg.....	74
Abbildung 69: Ergebnisse der mittleren monatlichen Brennstoffzusammensetzung berechnet mit dem numerischen Fraktionenmodell von September 2020 bis Juni 2021 im MHKW Coburg .....	74
Abbildung 70: Stündlich gemittelte Abfallzusammensetzung im MHKW Coburg für einen Zeitraum von 21 Stunden am 04.09.2020.....	75

## 10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Exemplarische Analyse am Beispiel von PPK in 2021 .....	15
Tabelle 2: Brennstoffmischungen gemäß der Versuchsplanung .....	19
Tabelle 3: Brennstoffmischungen im „Instationären Betrieb“ .....	19
Tabelle 4: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 1 .....	32
Tabelle 5: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 2 .....	32
Tabelle 6: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 3 .....	33
Tabelle 7: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 1 .....	33
Tabelle 8: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 2 .....	34
Tabelle 9: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 3 .....	35
Tabelle 10: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 1 .....	35
Tabelle 11: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 2 .....	36
Tabelle 12: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 3 .....	36
Tabelle 13: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 1 .....	36
Tabelle 14: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 2 .....	37
Tabelle 15: Vergleich Soll-/Ist an Messstelle GA 3 .....	37
Tabelle 16: Vergleich von Ist- und Sollwerten für CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> O über die Projektdauer .....	37
Tabelle 17: Differenzen zwischen den Messwerten der Referenz- und Netzmessung für die CO <sub>2</sub> - und O <sub>2</sub> -Anteile im Rauchgas hinter der NBK bei unterschiedlichen Positionen der Netzmessungssonde .....	47
Tabelle 18: Zusammenstellung der Anteile einzelner Fraktionen im Gesamtabfall [16–22] ...	52
Tabelle 19: Mittlere Zusammensetzung der Einzelfraktionen und typische Grenzen für den Anteil im Gesamtabfall [7–22] .....	53
Tabelle 20: Trockene Zusammensetzung der Reststoffe aus der Pyrolyse verschiedener Abfallbestandteile (Pyrolysetemperatur jeweils angegeben) .....	56
Tabelle 21: Korrekturfaktoren für die Messungen von CO <sub>2</sub> (GA 2 und GA 3) und Wasser (GA 3) im Abgas die für die Berechnungen mit der erweiterten Online-Bilanzierung verwendet wurden, unterteilt nach den durchgeführten Versuchskampagnen .....	59
Tabelle 22: Vergleichswerte und Berechnungsergebnisse aus der Online-Bilanzierung für den stationären Versuch 4 aus Versuchswoche KW. 17 in 2023 .....	59
Tabelle 23: Vergleichswerte und Berechnungsergebnisse aus dem numerischen Fraktionenmodell für den stationären Versuch 4 aus Versuchswoche KW. 17 in 2023 .....	60
Tabelle 24: Erlaubte Toleranzen zur Bewertung der Stationarität eines Versuchszeitpunktes .....	63
Tabelle 25: Vergleichswerte und Berechnungsergebnisse aus der Online-Bilanzierung für den instationären Versuch 9 aus Versuchswoche KW. 17 in 2022 .....	65
Tabelle 26: Vergleichswerte und Berechnungsergebnisse aus dem numerischen Fraktionenmodell für den instationären Versuch 9 aus Versuchswoche KW. 17 in 2022 .....	68
Tabelle 27: Durchgeführte Maßnahmen zum Ergebnistransfer (Stand zum 30.11.2023) .....	78
Tabelle 28: Geplante Transfermaßnahmen .....	79

## 11 Literaturverzeichnis

- [1] BUNDESUMWELTMINISTERIUMS: *Zusammensetzung des Hausmülls in Deutschland- BMUV - Infografik*. URL <https://www.bmuv.de/media/zusammensetzung-des-hausmuells-in-deutschland>. – Aktualisierungsdatum: 2023-11-01 – Überprüfungsdatum 2023-11-01
- [2] HUNSINGER, H. ; SEIFERT, H.: *Primärmaßnahmen zur NO<sub>x</sub>-Minderung in Abfallverbrennungsanlagen*, 2012
- [3] Dezember 2011. *VDI 2330-2: Schneckenförderer für Schüttgut - Auslegung von horizontalen und leicht geneigten Schneckenförderern*
- [4] Die Vorgänge bei der Verbrennung. In: THOMÉ-KOZMIENSKY, Karl Joachim; PAHL, Uwe; GAMMELIN, Cerstin (Hrsg.): *Thermische Abfallbehandlung*. 2. Aufl. Berlin : EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, 1994, 146 ff
- [5] HGF-STRATEGIEFONDS-VORGABEN: *Primärseitige Stickoxidminderung als Beispiel für die Optimierung des Verbrennungsvorgangs in Abfallverbrennungsanlagen : Teilprojekt 5*. 01.07.1999-30.06.2002
- [6] PLACES, Home: *Relative Luftfeuchtigkeit in Deutschland – die Werte*. In: *Home Places* (2022-06-17)
- [7] WIDDER, T. ; BECKMANN, M. ; REYNOLDS, P.: Online Determination of Elementary and Fractional Waste Composition for Municipal Solid Waste Incineration Plants (MSWIP), Bd. 7. In: THOMÉ-KOZMIENSKY, Karl J.; THIEL, Stephanie; THOMÉ-KOZMIENSKY, Elisabeth; WINTER, Franz; JUCHELKOVÁ, Dagmar (Hrsg.): *Waste management*. Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2017, S. 213–227
- [8] KOST, Thomas: *Brennstofftechnische Charakterisierung von Haushaltsabfällen*. Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2001. 1. Aufl. Pirna : Forum für Abfallwirtschaft und Altlasten e.V, 2001 (Beiträge zu Abfallwirtschaft, Altlasten 16)
- [9] GRAMMELIS, P. ; BASINAS, P. ; MALLIOPOULOU, A. ; SAKELLAROPOULOS, G.: Pyrolysis kinetics and combustion characteristics of waste recovered fuels, Bd. 88. In: *Fuel*, 2009, S. 195–205
- [10] SORUM, L. ; GRONLI, M. G. ; HUSTAD, J. E.: Pyrolysis characteristics and kinetics of municipal solid wastes, Bd. 80. In: *Fuel*, 2001, S. 1217–1227
- [11] KAWAGUCHI, Kuniyasu ; MIYAKOSHI, Kazutada ; MOMONOI, Kiyoshi: Studies on the pyrolysis behavior of gasification and melting systems for municipal solid waste. In: *Journal of Material Cycles and Waste Management* : Springer-Verlag, 2002
- [12] WAGLAND, S. T. ; KILGALLON, P. ; COVENEY, R. ; GARG, A. ; SMITH, R. ; LONGHURST, P. J. ; POLLARD, S. J. T. ; SIMMS, N.: Comparison of coal/solid recovered fuel (SRF) with coal/refuse derived fuel (RDF) in a fluidised bed reactor, Bd. 31. In: *Waste Management*, 2011, S. 1176–1183
- [13] YU, Mengzhu ; LI, Yanji ; FAN, Yuyang ; LI, Rundong ; CHI, Yong: Gasification Characteristics of Combustible Solid Waste with Additives and Kinetics Study, Bd. 9. In: *Waste and Biomass Valorization*, 2018, S. 2571–2578
- [14] DUNNU, Gregory ; MAIER, Jörg ; HILBER, Thomas ; SCHEFFKNECHT, Günter: Characterisation of large solid recovered fuel particles for direct co-firing in large PF power plants, Bd. 88. In: *Fuel*, 2009, S. 2403–2408
- [15] REINARDT, Franziska ; SEIFERT, Helmut ; HANS-JOACHIM, Gehrman ; (KEINE ANGABE): Use of Low-quality Biogenic Fuels in a Decentralized Biomass Boiler for Thermal Energy Generation, Bd. 120. In: *Energy Procedia*, 2017, S. 286–293

- [16] SEIFERT, Helmut ; MERZ, Daniela: *Primärseitige Stickoxidminderung als Beispiel für die Optimierung des Verbrennungsvorgangs in Abfallverbrennungsanlagen* : Abschlussbericht des HGF-Strategiefonds-Projektes. 2003
- [17] HOFFMANN, Gaston ; WÜNSCH, Christoph ; SCHNAPKE, Antje ; SCHINGNITZ, Daniel ; BAUMANN, Janett ; BRUNN, Lilly ; GÜNTHER, Marko ; WAGNER, Jörg ; BILITEWSKI, Bernd: *Nutzung der Potenziale des biogenen Anteils im Abfall zur Energieerzeugung*. Dessau-Roßlau : 2011
- [18] DORNBUSCH, Heinz-Josef ; HANNES, Lara ; SANTJER, Manfred ; BÖHM, Carsten ; WÜST, Susanne ; ZWIESELE, Bertram ; KERN, Michael ; SIEPENKOTHEN, Hans-Jörg ; KANTHAK, Manfred: *Vergleichende Analyse von Siedlungsrestabfällen aus repräsentativen Regionen in Deutschland zur Bestimmung des Anteils an Problemstoffen und verwertbaren Materialien* : Abschlussbericht. Dessau-Roßlau : 2020
- [19] KETELSEN, Ketel ; FEHRE, Elisabeth ; HECKENKAMP, Gregor ; LAHL, Uwe ; ZESCHMAR-LAHL, Barbara ; BECKMANN, Michael ; WEINECK, Sabine ; MASELLI, Jörg ; LEMSER, Bernd: *Möglichkeiten der Kombination von mechanisch-biologischer und thermischer Behandlung von Restabfällen* : Abschlussbericht: Laufzeit 01.06.1997-28.02.1998. Berlin : Umweltbundesamt
- [20] CHANDLER, A. John ; EIGHMY, T. Taylor ; HARTLÉN, Jan ; HJELMAR, Ole ; KOSSON, David S. ; SAWELL, Steven ; VAN DER SLOOT, Hans A. ; VEHLow, Jürgen: *Municipal solid waste incinerator residues*. Amsterdam, New York : Elsevier, 1997 (Studies in environmental science 67)
- [21] MAST, Paul-Gerhard: *Einfluss der Abfallzusammensetzung auf Schadstoffgehalt und -menge der Verbrennungsrückstände - Phase 2*. Berlin : Umweltbundesamt, 1998
- [22] WIESE, Christian ; BECKMANN, Michael ; MAST, Paul-Gerhard ; JOHNKE, Bernd: *Einfluß der Abfallzusammensetzung auf die Qualität der Schlacke bei der Verbrennung von Rest-Siedlungsabfällen*. In: *MÜLL und ABFALL* (1998), Nr. 11
- [23] BEERBAUM, Daniel: *Methode zur Optimierung der Additivstoffzufuhr des SNCR-Verfahrens im laufenden Betrieb* : Method for the optimization of the additive injection of the SNCR-process during runtime operation. Dresden, Technische Universität Dresden. Dissertation. 2023
- [24] KRÜGER, Sascha: *Wärmestrommessung an Membranwänden von Dampferzeugern*. Neuruppin : TK, 2009
- [25] GRAHL, Sebastian: *Charakterisierung von Ablagerungen an Membranwänden von Dampferzeugern*. Dresden, Technische Universität Dresden. Dissertation. 2013

## 12 Anhang

Anhang A: *Eingestellte Brennstoffzusammensetzungen und Ergebnisse der erweiterten Online-Bilanzierung für die Versuche an der Rostfeuerungsanlage des CUTEC (\* instationäre Versuche – Veränderung der Brennstoffzusammensetzung innerhalb der Versuchszeit)*

Versuch Kampagne Nummer	Datum	Dauer	Vorgabewerte					Berechnungsergebnisse						
			C	H	O	W	A	hu	[MJ/kg]	C	H	O	W	A
1	19.04.2021	3:00	31.66	4.03	26.61	37.14	0.19	10.18	27.48	3.57	19.62	49.28	0.04	9.57
	19.04.2021	3:00	38.40	4.93	35.51	17.20	3.56	12.98	43.61	5.66	31.96	18.08	0.68	16.60
	20.04.2021	2:15	38.40	4.93	35.51	17.20	3.56	12.98	39.99	5.19	28.02	24.19	2.59	15.17
	20.04.2021	2:30	29.30	3.60	25.80	23.60	17.20	9.50	33.66	4.37	23.86	25.45	12.63	12.62
2	20.04.2021	3:00	27.32	3.37	23.90	23.10	21.59	8.85	25.72	3.34	13.64	25.59	31.70	9.98
	21.04.2021	1:30	36.90	4.76	24.46	32.30	0.72	13.28	37.88	4.92	27.84	27.38	1.97	14.12
	21.04.2021	2:15	34.99	4.49	25.25	34.07	0.52	12.15	36.37	4.72	25.49	32.52	0.89	13.54
	21.04.2021	3:00	26.25	3.21	23.01	21.69	25.06	8.49	25.94	3.37	23.53	19.17	27.98	9.18
	27.09.2021	3:45	30.73	3.91	25.82	39.00	0.18	9.80	46.36	6.02	15.56	30.61	1.44	19.35
	27.09.2021	3:35	24.37	3.09	20.36	36.08	15.57	7.67	35.97	4.68	12.10	40.11	7.10	14.61
	28.09.2021	1:50	42.18	4.95	34.39	15.11	3.03	14.61	48.92	6.35	15.86	0.87	27.94	21.27
	28.09.2021	2:50	46.99	6.31	29.18	14.35	2.85	18.94	35.50	4.61	21.45	17.83	20.60	13.93
	28.09.2021	1:50	41.37	5.35	32.75	16.15	3.62	15.02	35.66	4.63	18.89	19.15	21.57	14.25
	28.09.2021	2:15	34.87	5.21	23.71	13.52	22.36	13.18	39.05	5.07	5.26	23.22	27.36	17.22
	29.09.2021	6:15	41.85	5.74	35.19	10.39	6.52	14.99	28.78	3.74	23.00	14.40	30.08	10.69
	29.09.2021	6:00	33.75	4.59	28.29	15.56	17.35	11.89	30.62	3.98	24.94	17.91	22.55	11.26
3	30.09.2021	13:45	33.75	4.59	28.29	15.56	17.35	11.89	24.31	3.16	19.61	10.68	42.23	9.05
	26.04.2022	2:00	30.22	3.85	25.40	40.00	0.18	9.60	28.44	3.69	27.91	37.19	2.76	9.43
	26.04.2022	0:30	32.85	4.38	19.03	43.35	0.13	12.38	24.44	3.17	24.04	46.12	2.21	7.75
	26.04.2022	0:47	35.49	4.04	25.79	41.75	0.16	10.34	27.72	3.60	21.91	44.32	2.44	9.56
	26.04.2022	0:59	25.98	3.24	21.50	38.88	9.93	8.15	26.46	3.44	25.76	40.88	3.46	8.64
	27.04.2022	3:50	34.09	4.61	28.09	19.53	13.28	11.94	32.82	4.26	27.95	22.16	12.80	11.86
	27.04.2022	3:00	34.26	4.63	28.23	19.36	13.13	12.00	35.14	4.56	28.29	17.50	14.49	13.03
	27.04.2022	0:33	41.60	5.74	24.67	16.29	11.35	16.81	30.02	3.90	24.75	17.47	23.85	11.01
	27.04.2022	0:48	39.18	5.37	25.07	17.62	12.40	14.33	31.18	4.05	24.41	21.97	18.37	11.48
	28.04.2022	4:40	34.07	4.59	28.32	19.38	13.25	11.90	32.15	4.18	27.44	18.19	18.03	11.70
4	28.04.2022	4:15	35.70	4.83	29.75	17.67	11.67	12.54	30.90	4.01	26.20	18.97	19.90	11.23
	28.04.2022	1:59	33.61	4.52	27.91	19.86	13.70	11.72	29.94	3.89	25.06	18.01	23.08	10.92
	24.04.2023	5:00	31.66	4.03	26.61	37.14	0.19	10.18	26.07	3.39	25.95	41.15	3.45	8.43
	25.04.2023	12:00	35.15	4.87	27.49	18.50	13.64	12.51	36.23	4.71	26.36	22.69	9.99	13.62
	26.04.2023	7:44	36.76	5.11	28.97	16.06	12.76	13.18	37.74	4.91	27.63	19.99	9.72	14.27
	27.04.2023	5:10	35.11	4.86	27.60	17.79	14.25	14.85	35.22	4.58	25.42	22.24	12.53	13.26
V6	27.04.2023	1:00	42.89	5.53	41.45	3.90	5.81	35.54	4.62	36.19	9.66	13.99	12.56	

