

**iwe**Institut für Wasserstoff-
und Energietechnik
der Hochschule Hof

Schlussbericht zu Nr. 8.2 NKF 98 für das Förderprogramm „Energetische Biomassenutzung“ des BMWK im 6. Energieforschungsprogramm

Projektlaufzeit / Berichtszeitraum: 01-2020 bis 06-2023

Entwicklung einer „Toolbox“ basierend auf numerischen Modellen und Praxismessungen zur Auslegung bzw. Optimierung von thermochemischen Anlagen zur Energiebereitstellung aus alternativen Brennstoffen

Datum: 22.12.2023

Akronym: OpToKNuS (Optimierungs-Toolbox mit Kinetischer Numerischer Simulation)

Verbund: 100377205 Kennung: 03KB163A, 03KB163B, 03KB163D

Projektkoordinator (03KB163A)	Beteiligte Personen / Ansprechpartner
Hochschule Hof (im Folgenden kurz HSH genannt) Institut für Wasserstoff- und Energietechnologien (im Folgenden kurz „HSH“ bzw. „iwe“ genannt) Alfons-Goppel-Platz 1 95028 Hof	Prof. Dr.-Ing. Tobias Plessing <u>Maximilian Heinrich (M.Eng.)</u>
Projektpartner 1 (03KB163B)	
DBFZ - Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (im Folgenden kurz „DBFZ“ genannt) Torgauer Str. 116 04347 Leipzig	Dr.-Ing. Marco Klemm <u>Dipl.-Ing. André Herrmann</u>
Projektpartner 2 (03KB163D)	
Spanner Re ² (Renewable Energy Experts) GmbH (im Folgenden kurz SRe ²) Niederfeldstr. 38 D - 84088 Neufahrn i. NB	<u>Dipl.-Ing. Georg Kuffer</u>

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutzaufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

1	Kurze Darstellung zu	6
1.1	Aufgabenstellung.....	6
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	7
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	9
1.4	Wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste.....	12
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
2	Eingehende Darstellung.....	14
2.1	Tabellarische Gegenüberstellung der Arbeitsziele/Ergebnisse	14
2.2	Ausführliche Beschreibung der einzelnen Arbeitspakete.....	16
2.2.1	AP 1.1 Erweiterung des derzeitig bestehenden Simulationsmodells	16
2.2.2	AP 1.2 Stetige Optimierung des Simulationsmodells hinsichtlich Genauigkeit, Rechengeschwindigkeit und Stabilität.....	17
2.2.3	AP 1.3 Einarbeitung der Kinetikdaten des DBFZ-Reaktors.....	18
2.2.4	AP 1.4 Messkampagne an der marktnahen Testanlage (SRe ²) und Einarbeitung der Validierungsdaten aus TP 3.2 und 3.3	21
2.2.5	AP 1.5 Theoretische brennstoffspezifische Prozessoptimierung mit Hilfe der Toolbox	32
2.2.6	AP 1.6 Projektkoordination und Öffentlichkeitsarbeit.....	32
2.2.7	AP 1.7 Messungen mit TGA zur Bestimmung der Reaktivität (Durchführung/Auswertung)	33
2.2.8	AP 2.1 Geeignetes Format/Programm für Toolbox und Datenbank festlegen..	36
2.2.9	AP 2.2 Programmierung einer Toolbox-Bedienoberfläche.....	38
2.2.10	AP 2.3 Verbesserung und Weiterentwicklung der Toolbox	40
2.2.11	AP 2.4 Gründung eines Industriebegleitkreises	41
2.2.12	AP 3.1 Vorplanung / Abstimmungen / Anlagenanpassungen für Versuche AP 3.2	42
2.2.13	AP 3.2 Validierungsversuche auf Basis der Simulationsvorhersagen: Referenzbrennstoff	44
2.2.14	AP 3.3 Validierungsversuche auf Basis der Simulationsvorhersagen: Testbrennstoff	44
2.2.15	AP 3.4 Überwachung von gesetzlichen Regelungen und Wirtschaftlichkeit....	45
2.2.16	AP 3.5 Parallelversuch (kleine Messkampagne) an Anlage Hochschule Zittau/Görlitz (Unterauftrag).....	46
2.2.17	AP 3.6 Projektorganisation (Berichte, Treffen, etc.)	46
2.2.18	AP 4.1 Abstimmung und Beschaffung Referenz- und Testbrennstoff.....	47
2.2.19	AP 4.2 Laboranalysen.....	48

2.2.20	AP 4.3 Abstimmung statistische Versuchsplanung	48
2.2.21	AP 4.4 Kinetikversuche Referenzbrennstoff	50
2.2.22	AP 4.5 Kinetikversuche Testbrennstoff.....	55
2.2.23	AP 4.6 Abstimmung Datenbank	56
2.2.24	AP 4.7 Validierungsversuche an der Laboranlage des DBFZ	56
2.2.25	AP 4.8 Projektorganisation (Berichte, Treffen, etc.)	56
2.2.26	AP 4.9 Ökologische Bewertung	56
2.3	Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	57
2.4	Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	57
2.5	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	58
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11.....	59
3	Literaturverzeichnis	60
Anhang A.	.....	62
Anhang B.	.....	63
Anhang C.	.....	64
Anhang D.	.....	66
Anhang E.	.....	68
Anhang F.	.....	71

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Gegenüberstellung Projektpläne entsprechend Antrag (oben) und reale Ablauf (unten).....	10
Abbildung 2 Teilbereiche der Gleichstrom-Festbettvergasung schematisch dargestellt.....	16
Abbildung 3 Einfach schematische Abfolge des stationären Modells.....	16
Abbildung 4 Zwischenergebnis aus dem instationären Pyrolysemodell mit den Ausgabewerten Temperatur (links oben), Feststoffdichte bezogen auf das Reaktorvolumen (rechts oben), Gasgeschwindigkeit (links unten) sowie Gaszusammensetzung (rechts unten).	17
Abbildung 5 Ausgabewerte bzw. Diagramme nach dem Ausführen einer Berechnung mit der Toolbox.....	18
Abbildung 6 Darstellung des Gasweges. Bett- und Partikelströmungseffekte a) und b), Porendiffusion c) sowie die intrinsische Reaktion d) an der Koksoberfläche ergeben brennstoffspezifische limitierende Faktoren für die Reaktionen im Vergasungsreaktor. [4]	19
Abbildung 7 Auswirkung der Limitierungen und der Einfluss von Partikeldurchmesser auf diese.....	20
Abbildung 8 Vergleich der Modell- und Experimentalwerte für den Labor-Batch-Reaktor des DBFZ. Links dargestellt die experimentellen Temperaturdaten gegenüber den polynomisch modellierten Temperaturverläufen als Modelleingangswerte. Rechts dargestellt die Gasverläufe zwischen Modell und Experiment. [3]	20
Abbildung 9 Marktnahe Testanlage und Apparaturen zur Messung und Bilanzierung.	21
Abbildung 10 Positionierung der Lanzen (blau) L1 bis L3 im oberen Reformerteil (links) und L4 im unteren Reformerteil (mittig) sowie die Anordnung der Thermoelemente (orange Punkte) & (rechts).....	22
Abbildung 11 Darstellung Temperaturquerschnitts im Reformer während der ersten Messkampagne. Werte sind über einen Zeitraum mit kontinuierlichem Betrieb (ca. 4 h) gemittelt. Die Fläche zwischen den Messpunkten ist linear interpoliert.	23
Abbildung 12 Gemessene Gaszusammensetzung während der ersten Messkampagne am ersten und zweiten Tag über stabile Versuchszeiträume gemittelt. Gegenüberstellung des Micro GC Fusion® Gasanalysator des DBFZ mit dem EHEIM Visit03H der Hochschule Hof.....	24
Abbildung 13 Messwerte der Thermoelemente von Lanze 1 in einem Zeitfenster mit stabilen, störungsfreien Anlagenbetrieb und hoher zeitlicher Auflösung ohne Wasserzugabe.	25
Abbildung 14 Temperaturprofil der Lanze 1 während einer stabilen Betriebsphase über die entsprechende Zeitspanne gemittelt in Gegenüberstellung mit dem modellierten Temperaturprofil mit einer Parametervariation. Höhe = 0 mm entspricht einem geometrischen Bezugspunkt. Die Punkte auf Höhe = -100 mm entstammen einer Extrapolation von Lanze 4 mit entsprechend breit angegebenen Fehler.	26
Abbildung 15 Werte der Thermoelemente in Lanze 4 die seitlich in den Bereich der Reduktionszone.....	26
Abbildung 16 Temperaturnesslanzen bei der Überprüfung aufgrund von Störungen während der Messkampagne; Deckel mit drei Lanzen zum Teil stark verschoben (links); verbogene Lanze mit Gliedermaßstab als Bezuggröße (mittig); abgeknickte Lanze mit deutlichem Materialverlust am Mantel (rechts).	27
Abbildung 17 Gaszusammensetzung und Heizwert aus den Messungen mit den µGC und dem Modell mit unterschiedlichen Wasserzugaben gegenübergestellt.....	28

Abbildung 18 Positionierung des Staurohrs für die Messung der Gasgeschwindigkeit zur Abschätzung des Volumenstromes im Produktgas am Übergangsrohr zum BHKW.	29
Abbildung 19 Verteilung der Teerbestandteile am zweiten Tag der 2. Messkampagne (Dez. 2022) um 18 Uhr bei 4,5 L/h Wasserzugabe in der Vergasungsluft. Die dargestellten unbekannten Anteile setzen sich größtenteils aus niedrig siedenden Stoffen zusammen.....	31
Abbildung 20 Messgerat im Labor mit Feuchtegenerator für H ₂ O-Atmosphäre (links) und Messprinzip (rechts)	33
Abbildung 21 Vergleich Modelfittings aus den TGA-Auswertungen vor (links) und nach (rechts [3]) der Temperaturanpassung.....	34
Abbildung 22 Überlegungen zur Datenbank. Mögliche Nutzer sowie Toolbox- und Datenbereitstellung. In Grünschrift dargestellt die im Projekt gewählte Form.	36
Abbildung 23 Nutzeroberfläche der Toolbox mit hellen Eingabeflächen und dazugehörigen Informationen sowie der rot markierten Brennstoffauswahl als Auswahlmenu.	39
Abbildung 24 Reformer-Deckel mit den installierten Durchgängen für die Temperaturmesslanzen.	42
Abbildung 25 Lanzenzugänge am Reformer – Von oben und von der Seite durch den Seitendeckel im Reduktionsbereich unterhalb der Oxidationszone.....	43
Abbildung 26 Messstellen zur Gasentnahme direkt nach dem Reformer (links), nach der Filtereinheit (mitte) und am Übergang zu BHKW (rechts).....	43
Abbildung 27 Brennstoffbunker mit Wiegesystem der zur Bilanzierung genutzt wurde.	44
Abbildung 28: Geplante Entwicklung für die CO ₂ -Abgabe. [9] [10]	45
Abbildung 29 Strompreisentwicklung in der EU zwischen 2019 und 2021 [11].....	45
Abbildung 31 DoE-Versuchspläne für die TGA-Versuche mit Sauerstoff, Wasserdampf und Kohlendioxid an der Hochschule Hof	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht der Arbeitspakete	9
Tabelle 2 Arbeitsziele der einzelnen Arbeitspakete und die Gegenüberstellung zur Erreichung dieser.....	14
Tabelle 3 Übersicht der Projektmeilensteine	15
Tabelle 4: Messergebnisse Wasserdampfmessung 2. Messkampagne Dez. 2022	29
Tabelle 5: Ergebnisse der Teermessung beider OpToKNuS-Messkampagnen (11/2021 und 12/2022) an der Spanner Re ² -Anlage.....	30
Tabelle 6 Teer -Messung im Vergleich	31
Tabelle 7: Übersicht der OpToKNuS-Projekttreffen	32
Tabelle 8 Versuchsparameter (Temperatur T und Gasanteil ν) für die TGA-Versuche zur chemisch limitierten Kinetik-Messung [3]. Bei O ₂ -Messungen mit niedrigerem Temperaturniveau.	35
Tabelle 9 Ermittelte Werte für die Parameter zur Beschreibung der intrinsischen Reaktionsraten von Pyrolysekoks aus dem Präzisionshackgut und Literaturwerte für die heterogene Reaktion zum Vergleich [3]	35
Tabelle 10 Ermittelte Werte für weitere im Projekt untersuchte Brennstoffe.....	35
Tabelle 11 Werte eines Brennstoffs oder des daraus entstandenen Pyrolysekokses, welche als Gesamtheit zur Brennstoffcharakterisierung erfasst werden könnten, mit der Einordnung zum Gebrauch.	37

Tabelle 12:Betriebsparameter des Festbettlaborvergasers des DBFZ zur Untersuchung der Test- und Referenzbrennstoffe durch Pyrolyse und CO ₂ -Vergasung	51
Tabelle 13: Übersicht der Brennstoffmengen einer vollen Reaktorfüllung des Festbettlaborvergasers	51
Tabelle 14: Versuchsdaten Festbett-Laborvergaser Pyrolyse Referenzbrennstoff	52
Tabelle 15: Versuchsdaten Festbett-Laborvergaser CO ₂ -Vergasung Referenzbrennstoff	53
Tabelle 16 Brennstoffeigenschaften und Messwerte die im Modell genutzt werden.	54
Tabelle 17: Versuchsdaten Festbett-Laborvergaser Pyrolyse Testbrennstoffe.....	55
Tabelle 18: Versuchsdaten Festbett-Laborvergaser CO ₂ -Vergasung Testbrennstoffe.....	55
Tabelle 19 Kostenaufteilung nach Projektpartner und Kostenart.....	57
Tabelle 20 Liste der Aktivitäten zur Öffentlichkeitsarbeit bzw. wissenschaftlichem Diskurs ...	59

1 Kurze Darstellung zu

1.1 Aufgabenstellung

Die Biomassevergasung als zukunftsweisende Technologie ist für den Brennstoff Holz in der KWK-Anwendung Stand der Technik. Mit Blick auf einen flexiblen Anlagenbetrieb zur bedarfsgerechten Energiebereitstellung und den Einsatz von alternativen Brennstoffen besteht weiterhin Forschung- und Entwicklungsbedarf. Durch komplexe Reaktionsverhältnisse im Inneren des Vergasungsreaktors insbesondere bei der einstufigen Vergasung ist die notwendige Weiterentwicklung mit erheblichem Aufwand verbunden. Mit Hilfe dieses Projektes soll ein numerisches Simulationstool samt kinetischer Datenbank, welche in einer allgemein gültigen und nutzbaren „Toolbox“ resultiert, entwickelt werden, um die thermochemischen Prozesse während der Auslegung brennstoffspezifisch vorherzusagen oder bestehende Anlagen diesbezüglich zu optimieren. Die Datenbank wird nach Projektabschluss der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Der Fokus der Brennstoffauswahl für die Validierung der numerischen Modelle liegt dabei neben dem Referenzbrennstoff Holz auf alternativen biogenen Reststoffen. Im Projekt findet eine Kooperation mit dem DBFZ statt, welches in der Lage ist, Messungen für kinetische Parameter zur Validierung eines Simulationsmodells zu übernehmen. Nach 3 Projektjahren soll eine validierte Datenbank samt Simulation für die Vergasung von Holz und ein bis zwei alternativer Brennstoffe zur Verfügung stehen. Die Datenbank soll anlagen- und prozessübergreifende Gültigkeit besitzen. Als industrieseitiger Projektpartner wird der Anlagenhersteller Spanner Re² GmbH eine marktnahe Testanlage für Versuchsreihen brennstoffspezifisch bzw. messtechnisch anpassen und bereitstellen. Somit liefert das geplante Projekt statistisch belastbare Messwerte unterschiedlicher Vergasungsanlagentypen und –größen mit unterschiedlichen Brennstoffen bzw. Brennstoffeigenschaften und Versuchsparametern zur Validierung einer neuartigen, detaillierten numerischen Simulation, welche in einem Vorhersagemodell, einer „Toolbox“, resultiert.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt wurde im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms im Schwerpunkt „energetische Biomassenutzung“ des BMWK über einen Zeitraum von drei Jahren gefördert. Das Konsortium bestand aus zwei wissenschaftlichen Institutionen und einem Industriepartner. Die Hochschule Hof war dabei der Projektkoordinator.

Hochschule Hof (wissenschaftlich):

Zu Beginn des Projektes war ein Basismodell zur Beschreibung der thermochemischen Vergasung vorhanden. Auf den damit vorhandenen Erkenntnissen und der Expertise bei der Modellentwicklung konnte entsprechend aufgebaut werden. Das Modell, welches zuvor für die Auslegung eines anderen Vergasertyps mit dem Brennstoff Holzpellets entwickelt wurde, sollte für eine beispielhafte Anwendung am komplexeren Spanner-Reaktor angepasst werden. Für die direkte Gegenüberstellung an einer Praxisanlage von Spanner Re² GmbH waren vor dem Projekt keine Versuchsergebnisse vorhanden, die eine Validierung eines Simulationsmodells zugelassen hätten. Zu Projektbeginn war an der Hochschule Hof noch keine Thermogravimetrische Analyse (TGA) vorhanden, zur genaueren Bestimmung der brennstoffspezifischen heterogenen Reaktionen. Parallel zum Projekt kam diese Möglichkeit jedoch hinzu. Sie konnte effektiv und effizient eingesetzt werden, um positive Ergebnisse im Projekt beizutragen.

DBFZ (wissenschaftlich):

Am DBFZ ist ein Festbett-Laborvergaser vorhanden. Dieser wurde für die Untersuchung der Pyrolyse und der Einzelreaktionen genutzt. Der im Festbettreaktor des DBFZ gut definierbare Prozess ist zur Validierung von Basisfunktionen des Modells geeignet. Der Laborvergaser ist jedoch ein Batchreaktor und unterscheidet sich dabei funktional vom kontinuierlichen Gleichstromvergaser der Firma Spanner Re² GmbH. Das DBFZ ist mit dem Messen und Bilanzieren von Holzgasanlagen vertraut und verfügt über zusätzliche Messtechnik und Erfahrung zur Prozess- und Brennstoffcharakterisierung. Weiterhin ist das DBFZ zertifiziert nach der ISO 9001, was an die Durchführung der Versuche am DBFZ bestimmte Qualitätsanforderungen stellt. Die eingesetzten Prüfmittel (z. B. Messgeräte, Massendurchflussregler) werden auf ein nationales Normal zurückgeführt werden. Dies ist im Projekt für die eingesetzten Waagen (zur Massenbestimmung – monatliche Überprüfung), Massendurchflussregler (Massenbestimmung Gase am Festbettlaborvergaser – jährliche Überprüfung) und Analysegeräte (zur Bestimmung der Gaszusammensetzung – arbeitstägliche Überprüfung) erfolgt. Weiterhin erfolgt im Projekt auch eine repräsentative Teilung der eingesetzten Brennstoffe mittels Riffelteiler.

Spanner Re² GmbH (Industrie):

Zum Projektstart stand bei der Firma Spanner Re² GmbH keine Anlage für einen derartigen Versuchsbetrieb bereit. Die thermische Belastung im Inneren des Vergasungsreaktors (Reformers) stellt eine Herausforderung an ein geeignet Messequipment dar, um dies in den prozessführenden Anlagenteilen zu integrieren, ohne den Prozess selbst zu stören. Hierfür musste eine Anlage bereitgestellt und für den speziellen Zweck die entsprechenden Anlagenteile des Reformers umkonstruiert, verändert bzw. angepasst werden. Auch mussten die Messtellen für die externen und internen Messsystem optimal in die Anlage und deren Prozessführung integriert werden. Im weiteren Verlauf wurde auch eine Wägezelle zur Bilanzierung des Brennstoffes in den Stoffstrom der Gesamtanlage integriert. Der Einfluss des Materials in der Vergasung ist hier der maßgebliche Anteil in Bezug auf ein verwertbares Holzgas in der KWK-Nutzung. Hier, durch eine Simulation schon Erkenntnisse hinsichtlich der

zu erwartenden Temperaturen und Verweilzeiten zu erhalten, welche maßgeblich für die beiden Problemfelder Schlackebildung und Teergehalt sind, ist elementar für die Weiterentwicklung der Anlage bzw. des Spektrums der zu verwendenden Einsatzstoffe.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde durch die Hochschule Hof koordiniert. Durch regelmäßige Abfragen und organisierte Arbeitstreffen wurden Arbeitsergebnisse und Projektfortschritt stetig geprüft. Kernaufgabe war die Weiterentwicklung und Validierung der Simulation für den Einsatz von biogenen Reststoffen bei einem industriellen Vergaser.

Tabelle 1 Übersicht der Arbeitspakete

AP	Beschreibung (AP-Verantwortlicher)
1	Weiterentwicklung / Anwendung des bestehenden Modells (HSH)
1.1	Erweiterung des derzeitig bestehenden Simulationsmodells
1.2	Stetige Optimierung des Simulationsmodells hinsichtlich Genauigkeit, Rechengeschwindigkeit und Stabilität
1.3	Einarbeitung der Kinetikdaten des DBFZ-Reaktors
1.4	Messkampagne an der marktnahen Testanlage (SRe ²) und Einarbeitung der Validierungsdaten aus TP 3.2 und 3.3
1.5	Theoretische brennstoffspezifische Prozessoptimierung mit Hilfe der Toolbox
1.6	Projektkoordination und Öffentlichkeitsarbeit
1.7	Messungen mit TGA zur Bestimmung der Reaktivität (Durchführung/Auswertung)
2	Entwicklung der Toolbox (HSH)
2.1	Geeignetes Format/Programm für Toolbox und Datenbank festlegen
2.2	Programmierung einer Toolbox-Bedienoberfläche
2.3	Verbesserung und Weiterentwicklung der Toolbox
2.4	Gründung eines Industriebegleitkreises
3	Validierungsversuche an marktnaher Testanlage von SRe² (SRe²)
3.1	Vorplanung / Abstimmungen / Anlagenanpassungen für Versuche
3.2	Validierungsversuche auf Basis der Simulationsvorhersagen: Referenzbrennstoff
3.3	Validierungsversuche auf Basis der Simulationsvorhersagen: Testbrennstoff
3.4	Überwachung von gesetzlichen Regelungen und Wirtschaftlichkeit
3.5	Parallelversuch (kleine Messkampagne) an Anlage Hochschule Zittau/Görlitz (Unterauftrag)
3.6	Projektorganisation (Berichte, Treffen, etc.)
4	Kinetik- und Validierungsmessungen an einer Festbett-Vergasungsanlage (Labormaßstab) und Bestimmung von Brennstoffdaten (DBFZ)
4.1	Abstimmung und Beschaffung Referenz- und Testbrennstoff
4.2	Laboranalysen
4.3	Abstimmung statistische Versuchsplanung
4.4	Kinetikversuche Referenzbrennstoff
4.5	Kinetikversuche Testbrennstoff
4.6	Abstimmung Datenbank
4.7	Validierungsversuche an der Laboranlage des DBFZ
4.8	Projektorganisation (Berichte, Treffen, etc.)
4.9	Ökologische Bewertung

Für das Simulationsmodell sind Brennstoffdatensätze notwendig, die für entsprechende Simulationszwecke nicht ganzheitlich vorhanden sind. Dabei werden neben gängigen Brennstoffdaten wie Feuchte, Heizwert, Aschegehalt, etc. weitere Daten benötigt. Dazu gehören Pyrolyseprodukte, Schütt- und Partikeldichten sowie die heterogene Kinetik (Gas-Feststoffreaktionen) der beim Prozess entstehenden Kohle mit dem Prozessgas bei den vorherrschenden hohen Temperaturen. Letztere ist besonders wichtig zur Beschreibung der

Umsetzung der Kohle in der Reduktionszone, welche einen wesentlichen Teil des Prozesses ausmacht.

Für die grundlegenden Eigenschaften greift das DBFZ als Forschungszentrum für Biomassen mit Expertise auf effiziente und standardisierte Methoden zurück.

Nachfolgend sind in Abbildung 1 die Projektpläne aus der Antragsphase und wie die Projektbearbeitung realisiert werden konnte direkt gegenübergestellt. Beide befinden sich jedoch auch nochmal im Anhang.

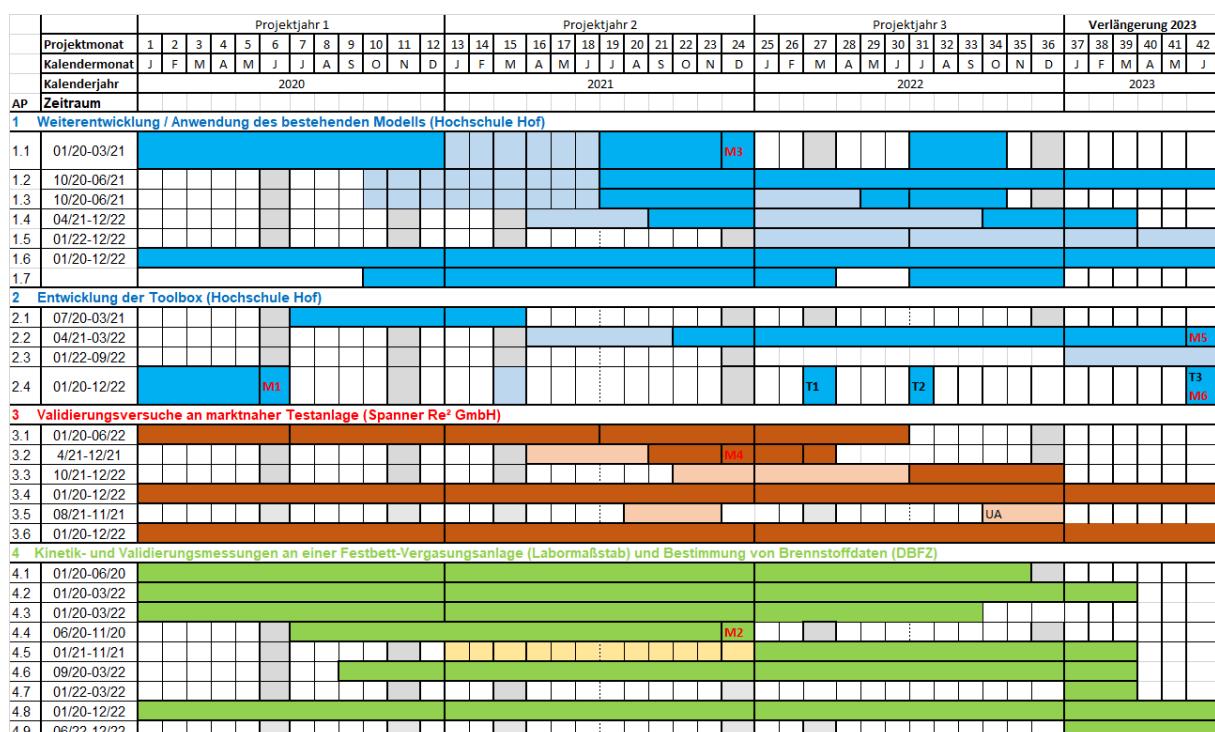
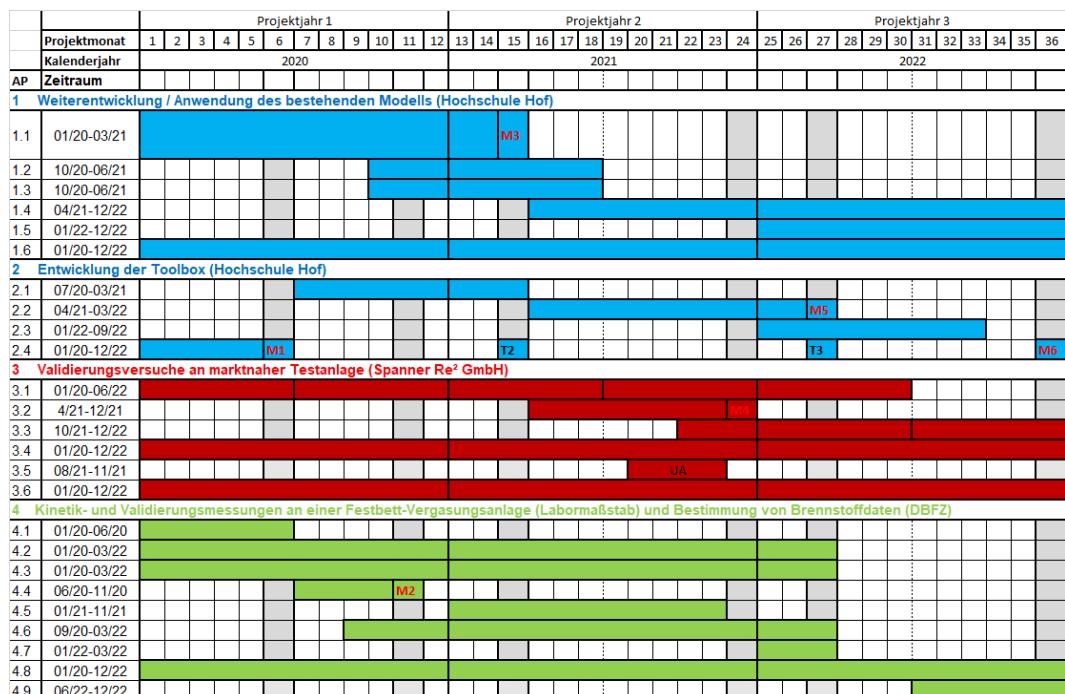


Abbildung 1 Gegenüberstellung Projektpläne entsprechend Antrag (oben) und reale Ablauf (unten).

Aufgrund der pandemischen Lage in 2020-2021, verbunden mit Personalausfall und eingeschränktem Technikumsbetrieb, sowie Lieferverzögerungen bei der Beschaffung von Teilen für den Festbett-Laborvergaser in 2020 und Personalausfall infolge einer 3-monatigen Elternzeit (in 2021 und 2022) eines beteiligten Mitarbeiters und einem 4-monatigem (in 2020) krankheitsbedingten Mitarbeiterausfalls, war es am DBFZ nicht möglich, den zum Projektanfang aufgestellten Zeitplan zur Projektbearbeitung einzuhalten. Durch den Lieferverzug bei den Anlagenteilen des Festbett-Laborvergaser konnte erst verspätet mit den Arbeiten zum Versuchsbetrieb und damit der Zurverfügungstellung von kinetischen Daten für die Weiterentwicklung und Anpassung des Simulationsmodells der HSH begonnen werden. Daher war auch die HSH nach anfänglicher Modellentwicklung nur eingeschränkt arbeitsfähig. Um jedoch weiterhin einen Projektfortschritt zu gewährleisten, wurden die Nutzung von TGA-Versuchen sinnvoll integriert. Ebenso konnte aufgrund der pandemischen Lage und des Personalausfalls die Brennstoffbeschaffung nicht am Projektanfang erfolgen, sondern verzögert sich.

1.4 Wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Aufbauend auf den im Antrag geschilderten Stand der Technik und Wissenschaft (Siehe Anhang F) konnte im Projekt an das bereits bestehende Simulationsmodell der HSH und die bestehenden Anlagen (Festbett-Laborvergaser) am DBFZ angeknüpft werden.

Das Simulationsmodell der HSH wurde auf Basis von Reaktorbeschreibungen und Ausführungen von Gradel et al. aufgebaut. Dieses umfangreiche Modell zeigte gute Ergebnisse für den Einsatz mit genormten Fichtenholz-Pellets. Dafür waren zum Teil sehr spezielle Brennstoffanalysen notwendig, sofern keine Annahmen auf Basis von Literatur getroffen werden konnten. [1]

Einige der untersuchten Eigenschaften sind dabei jedoch brennstoffspezifisch. Aufgrund der Vielfältigkeit biogener Brennstoffe und der Komplexität der zusammenwirkenden Reaktionsmechanismen ist die thermochemische Vergasung weiterhin ein wichtiges und sehr interdisziplinäres Themengebiet. Deutschlandweit gibt es nur wenige etablierte Anlagenhersteller. Eine Übersicht bekannter Akteure sowie Technologien führt beispielsweise die Fördergesellschaft Erneuerbare Energien e. V. unter deren Webseite oder Branchen-Guide. [2] Stand der Technik sind dabei Anlagen die vorzugsweise mit gut aufbereiteten hölzernen Brennstoffen betrieben werden wie z. B. gut vorgetrocknete Hackschnitzel, geringer Feinanteil, keine Fremdkörper (bspw. Steine) oder Holzpellets. Je nach Hersteller und Prozessart darf dabei die benötigte Brennstoffqualität (Feuchte, Partikelgrößen) ggf. variieren. Veränderungen der Eigenschaften können jedoch einen großen Einfluss auf den reibungslosen Betrieb haben.

Im Projekt kam die Technikums-Anlage Festbett-Laborvergaser des DBFZ und deren daran schon entwickelte Methodik zum Einsatz. Hier wurde technisch und wissenschaftlich an die bisherigen DBFZ-Erfahrungen aus der internen Vorlaufforschung sowie dem Projekt FlexiTorr angeknüpft.

Weiterhin wurde seitens der Firma Spanner Re² an die dortigen Betriebserfahrungen angeknüpft, um die notwendige marktnahe Testanlage bereitstellen und umrüsten zu können.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein Industriebegleitkreis in AP 2.4 gegründet. Hierzu waren neben dem Industriepartner im Konsortium weitere deutschlandweit aktive Hersteller kleintechnischer Holzvergasungsanlagen eingeladen, kostenfrei teilzunehmen. Ziel war die Verfolgung der Entwicklungsarbeit und die breitenwirksame Ausrichtung des Vorhabens. Die Teilnehmer hatten hierbei auch die Möglichkeit, Wünsche und Anregungen seitens der Industrie in das Projekt einzubringen.

Im Zuge der Projektvorbereitungen und während des Projektes fand ein Austausch mit der Hochschule Zittau-Görlitz statt. Im Projekt war eine parallelaufende Messkampagne an deren Vergasungsanlage geplant. Dabei handelt es sich um einen handelsüblichen Vergaser von der Spanner Re² GmbH, der in der Hochschule Zittau-Görlitz der auch für Forschungszwecke eingesetzt wird.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Tabellarische Gegenüberstellung der Arbeitsziele/Ergebnisse

Nachfolgen sind in Tabelle 2 die Arbeitsziele der Arbeitspakete zugeordnet.

Tabelle 2 Arbeitsziele der einzelnen Arbeitspakete und die Gegenüberstellung zur Erreichung dieser.

AP	Arbeitsziel	Ergebnisse
1.1	Modellerweiterung und -anpassung an die Spanner-Reaktor und den DBFZ-Reaktor	Erreicht
1.2	Modelloptimierung hinsichtlich Genauigkeit und Geschwindigkeit	Erreicht
1.3	Übertragung und Einbindung der Messergebnisse aus den Versuchen des DBFZ.	Erreicht
1.4	Modellvergleich mit den Messergebnissen, Einbindung der Erfahrungen und Messergebnisse.	Teilweise erreicht Nur ein Brennstoff an der Spanner-Anlage gemessen
1.5	Nutzung der Toolbox für eine theoretische brennstoffspezifische Optimierung.	Nicht erreicht
1.6	Überwachung der Projektziele, Koordination des Konsortiums und Erstellen von Berichten sowie Veröffentlichung von Ergebnissen.	Erreicht
1.7	Zusätzliches Arbeitspaket im Projektverlauf entstanden: Erfassen der brennstoffspezifischen Reaktionskinetik mittels TGA mit vier Brennstoffen und jeweils drei Reaktivgasen	Erreicht
2.1	Datenbank- und Programmtyp festlegen.	Erreicht
2.2	Eine einfache Bedienoberfläche für das Berechnungstool schaffen	Erreicht
2.3	Die Toolbox mit automatischen Optimierungsfunktionen erweitern und ausreifende Verbesserungsmaßnahmen durchführen.	Nicht erreicht
2.4	Hauptakteure der Hersteller für Holzgasanlagen mit einbeziehen.	Erreicht
3.1	Anlage für den Einsatz bei den geplanten Messkampagnen vorbereiten.	Erreicht
3.2	Validierungsmessungen mit dem Referenzbrennstoff durchführen.	Erreicht
3.3	Validierungsmessungen mit weiteren biogenen Brennstoffen durchführen.	Nicht erreicht
3.4	Gesetzlicher Regelungen und Wirtschaftlichkeitsüberwachung.	Erreicht
3.5	Teilnahme und Vorbereitung von Projekttreffen sowie Unterstützung bei der Erstellung von Berichten.	Erreicht
4.1	Abstimmung und Beschaffung von Referenz- und Testbrennstoff für alle Projektpartner	Teilweise erreicht
4.2	Laboranalysen zur Charakterisierung der Brennstoffe	Erreicht
4.3	Abstimmung zur statistischen Versuchsplanung	Erreicht
4.4	Kinetikversuche Referenzbrennstoff	Erreicht
4.5	Kinetikversuche Testbrennstoff	Erreicht
4.6	Abstimmung Datenbank	Erreicht
4.7	Validierungsversuche an der Laboranlage des DBFZ	Erreicht
4.8	Projektorganisation (Berichte, Treffen, etc.)	Erreicht
4.9	Ökologische Bewertung	Teilweise erreicht (nur für den Referenzbrennstoff)

In Tabelle 3 sind die zu Projektbeginn definierten Meilensteine gelistet.

Tabelle 3 Übersicht der Projektmeilensteine

Meilenstein 1: Erfolgreiche Gründung eines Industriebegleitkreises.	
<u>Neuausrichtung:</u>	Waren alle notwendigen Akteure bereit an dem Begleitkreis teilzunehmen?
<u>JA:</u>	Die Einladung zum Begleitkreis wurde frühzeitig von den meisten Akteuren angenommen und eine Teilnahme zugesagt. Teilnehmer zum Projektende: Burkhardt GmbH, LiPRO Energy GmbH & Co. KG, ReGaWatt GmbH und BtX energy GmbH; zwischenzeitlich ENTRENO GmbH Das erste Treffen fand pandemiebedingt im Frühjahr 2022 statt. Die Resonanz der Teilnehmer bezüglich des Vorhabens war jedoch durchweg positiv.
Meilenstein 2: Bereitstellung realer Versuchs- und Kinetikdaten zum Einpflegen in das Simulationsmodell.	
<u>Abbruchkriterium/ Neuausrichtung:</u>	Sind die Messdaten nicht in ausreichender Anzahl reproduzierbar und verwertbar?
<u>JA:</u>	Durch die Bereitstellung von kinetischen Daten und Pyrolysedaten des DBFZ-Festbett-Laborvergasers nach Methodenanpassung für das Simulationsmodell sowie den TGA-Versuchen an der HSH erreicht.
Meilenstein 3: Validiertes, funktionales Simulationsmodell anhand erster Kinetikdaten.	
<u>Abbruchkriterium/ Neuausrichtung:</u>	Ist das Simulationsmodell in der Lage den DBFZ- Prozess mit hinreichender Genauigkeit abzubilden?
<u>JA:</u>	Die Validierung mit dem DBFZ-Prozess ergab neue Erkenntnisse zu Modell und DBFZ-Prozess. Durch Nachbesserungen am Simulationsmodell konnte der Meilenstein erreicht werden.
Meilenstein 4: Verwertbare Versuchsergebnisse von der Testanlage.	
<u>Abbruchkriterium/ Neuausrichtung:</u>	Konnten die Versuche wie geplant durchgeführt werden und liefern die Versuche verwertbare Ergebnisse?
<u>JA:</u>	Erste Versuche konnten durchgeführt werden. Die Auswertung der Messergebnisse aus Messkampagne 1 lieferte (Temperaturprofil, Gaszusammensetzung, Gasvolumenstrom, Teerbeladung im Gas) verwertbare Ergebnisse
Meilenstein 5: Funktionsfähige Bedienoberfläche der Toolbox.	
<u>Abbruchkriterium/ Neuausrichtung:</u>	Steht eine bedienbare Oberfläche der Toolbox für den Nutzer zur Verfügung?
<u>JA:</u>	Die Erstellung einer Bedienoberfläche ist erfolgt. Nach erfolgreicher Installation des Tools ist die Anwendung ohne manuelle Veränderungen im Python-Programmcode verwendbar.
Meilenstein 6: Freigabe der fertiggestellten Toolbox für die Öffentlichkeit.	
<u>Neuausrichtung:</u>	Kann die Toolbox nach Projektende eigenständig für die Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden?
<u>JA:</u>	Veröffentlichung der Toolbox nach Projektende weiterhin auf der Webseite des Begleitprogramms geplant. Die Übersetzung von Matlab zu Python lässt eine lizenfreie Nutzung zu und wird damit der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

2.2 Ausführliche Beschreibung der einzelnen Arbeitspakete

2.2.1 AP 1.1 Erweiterung des derzeitig bestehenden Simulationsmodells

Das Ursprungsmodell ist ein eindimensionales detailreiches, transientes (zeitabhängiges) Modell. Hier gingen die Bereiche der Pyrolyse, Oxidation (Luftzugabe) und Reduktion ohne klare Trennung ineinander über (siehe Abbildung 2). Da es jedoch bereits eine lange unpraktikable Rechenzeit hatte, wurde eine Erweiterung auf ein 2D-radialsymmetrisches Modell vorerst nicht priorisiert. Es wurde vielmehr nach Möglichkeiten gesucht, das Modell deutlich zu beschleunigen.

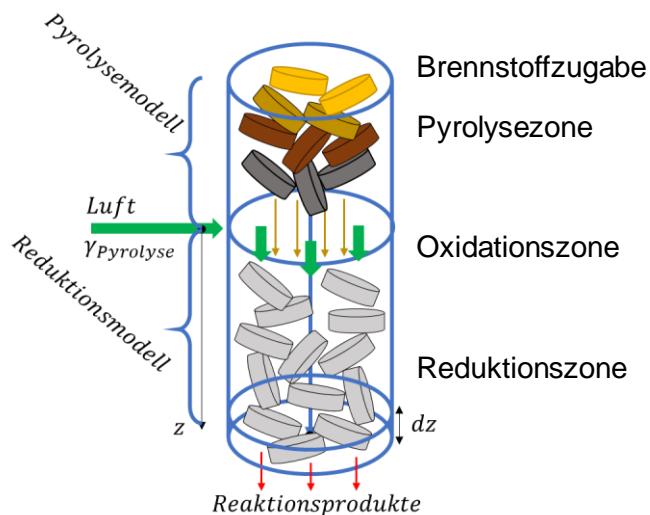


Abbildung 2 Teilbereiche der Gleichstrom-Festbettvergasung schematisch dargestellt.

So gelang es, das Modell unter der Betrachtung eines insgesamt stationären Prozesses zu reduzieren, der auch beim Betrieb von Holzgasanlagen angestrebt wird (Ziel der Anlagen sind 8.000 Betriebsstunden im Jahr). Dabei wurde angenommen, dass die Pyrolyse vor der Oxidations- und Reduktionszone komplett abgeschlossen ist. Die zuletzt angewandten Modellgleichungen sind in Anhang D aufgelistet. Die schematische Abfolge des stationären Modells ist in Abbildung 3 dargestellt.

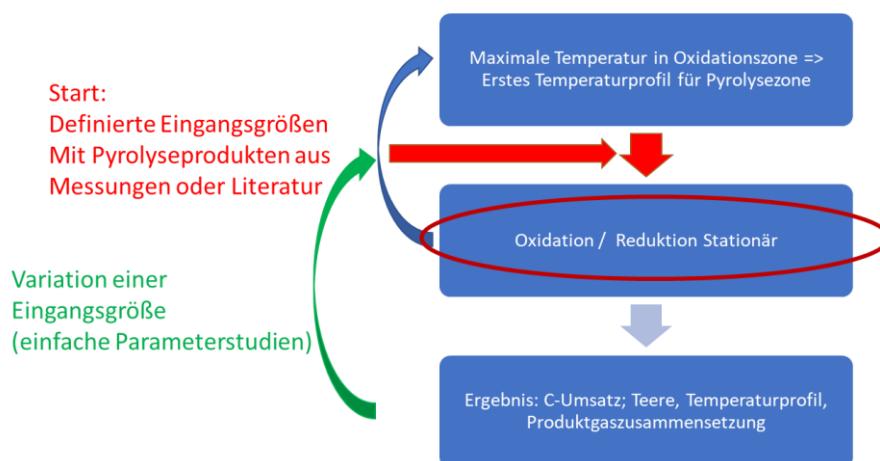


Abbildung 3 Einfach schematische Abfolge des stationären Modells.

Somit geht die Berechnung vom Zeitpunkt der Luftzugabe von den festen und gasförmigen (auch Teere und Wasser) Pyrolyseprodukten aus. Aufgrund der hohen Reaktionsrate der Oxidationsreaktionen sind diese bereits innerhalb der ersten diskretisierten Elemente abgeschlossen, woraus sich ein Temperaturmaximum ergibt. Danach sind die heterogenen Vergasungsreaktionen mit H_2O und CO_2 im Kohlebett sowie Teer-Cracking und Gasreaktionen wie (Wasser-Gas-Shift) dominant.

Für die räumlich gegenläufigen Mechanismen von Wärmeübertragung und Massendiffusion (Leitung, Strahlung, Feststoffe und Gase) war eine stationäre Betrachtung der Pyrolysezone ungeeignet. Es wurde dennoch versucht anhand der Oxidationstemperatur den Temperaturverlauf und den sich daraus ergebenden Pyrolyseverlauf transient bzw. iterativ abzubilden. Das instationäre Pyrolysemodell zeigte sich letzten Endes jedoch auch als unpraktikabel mit sehr langer Berechnungszeit (einige Stunden) gegenüber dem stationären Modell (wenige Sekunden). In Abbildung 4 ist beispielhaft eines der Zwischenergebnisse für die Pyrolysezone dargestellt.

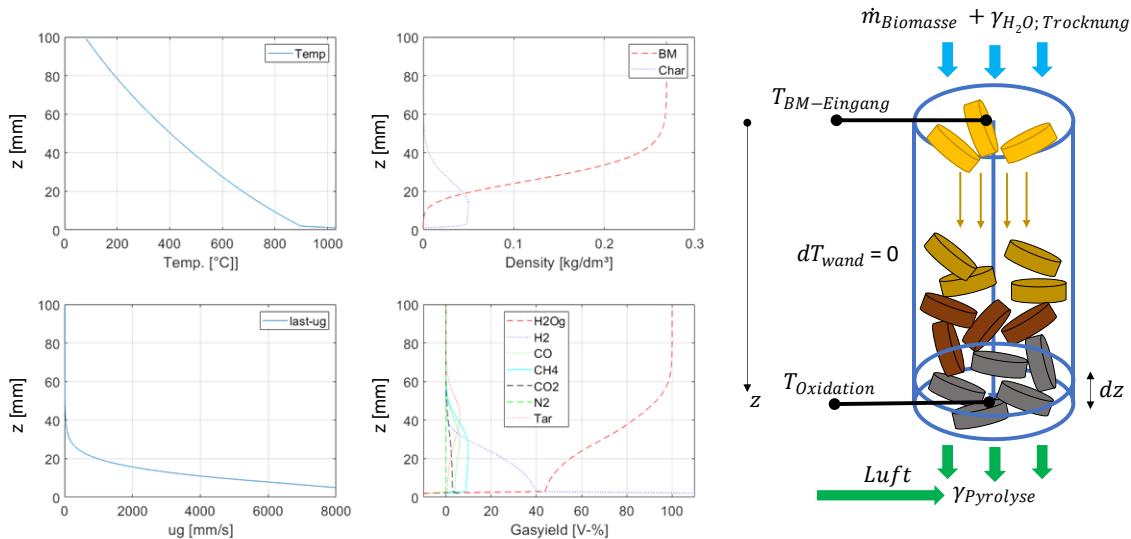


Abbildung 4 Zwischenergebnis aus dem instationären Pyrolysemodell mit den Ausgabewerten Temperatur (links oben), Feststoffdichte bezogen auf das Reaktorvolumen (rechts oben), Gasgeschwindigkeit (links unten) sowie Gaszusammensetzung (rechts unten).

Darüber hinaus wurde ein transientes Modell für den DBFZ-Laborrektor angepasst. Eine stationäre Betrachtung war hier nicht möglich, da es sich um einen Batchversuch handelt. Näheres dazu ist in Kap. 2.2.3 erläutert.

2.2.2 AP 1.2 Stetige Optimierung des Simulationsmodells hinsichtlich Genauigkeit, Rechengeschwindigkeit und Stabilität

Gemäß der AP-Bezeichnung wurde im Laufe des Projektes durchweg nach Möglichkeiten zur Modelloptimierung gesucht. Die hier angestrebten Ziele sind mit den Anstrengungen und Ergebnissen in AP 1.1 eng gekoppelt. So konnte zu Projektende die Toolbox innerhalb weniger Sekunden Berechnungsergebnisse liefern. Ein Beispielsatz der Toolbox-Ausgabewerte ist nachfolgend in Abbildung 5 dargestellt

```

-----Results-----
-----Input-----
Kinetic Selected Type = kinetics_RefSRe
Biomass feed [kg/h](wet) = 58.3
Biomass feed [kg/h](dry) = 55.0
Biomass humidity = 0.06
Particle diameter [mm] = 11.6
Air [m³/h] = 65.0 (Lambda = 0.257)
Water inject [L/h] = 0.0
-----Output-----
T-Max_G [°C] = 1177.4
T-End_G [°C] = 948.9
-----Gas composition:
          dry | /w H2O
H2O [vol.-%] 0.0 | 14.7
H2 [vol.-%] 21.5 | 18.4
N2 [vol.-%] 45.7 | 38.9
CO [vol.-%] 22.6 | 19.3
CO2 [vol.-%] 10.1 | 8.6
CH4 [vol.-%] 0.0 | 0.0
-----Output gas volume [Nm³/h] = 122.87
Heating value [MJ/m³] = 5.192
-----Carbon conversion = 33.22 %
Normalized tar content [g] = 0.0 (in raw gas )
-----Mass balance: [kg/h] = -2.89
Mass in [kg/h] = 137.93
Mass out [kg/h] = 135.03
solid mass out[kg/h] = 8.15
v_solid(bulk) [mm/s] = 0.8

```

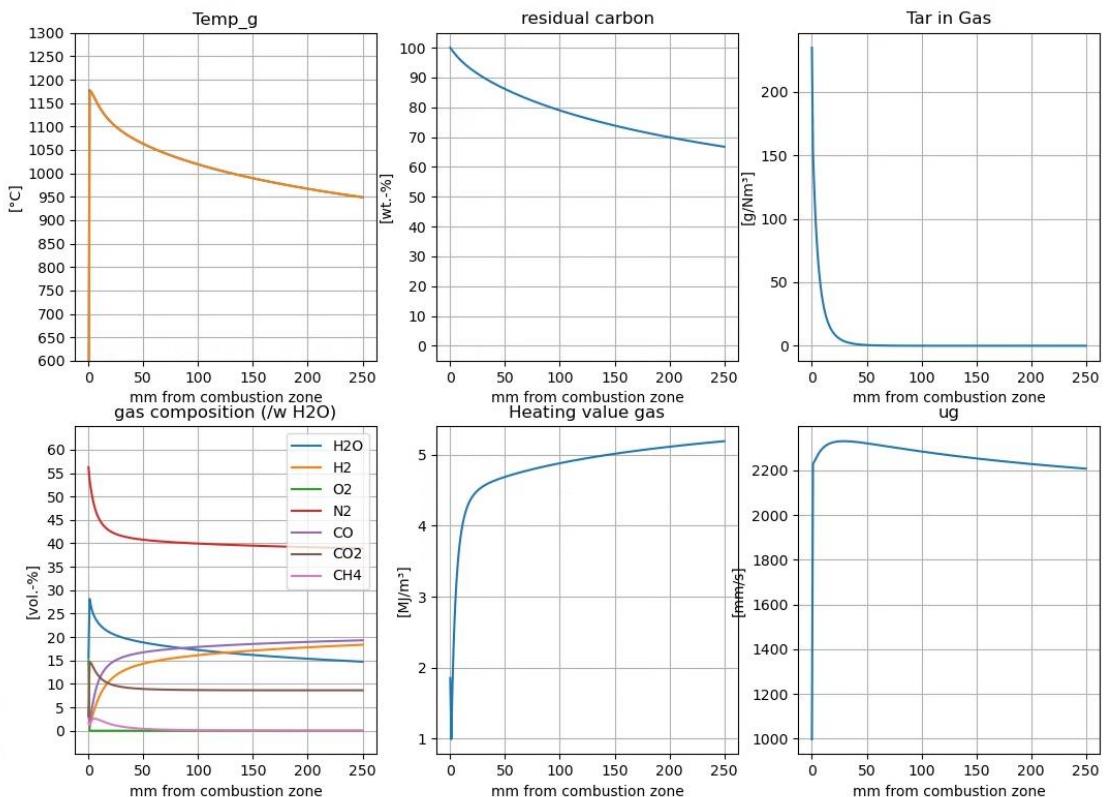


Abbildung 5 Ausgabewerte bzw. Diagramme nach dem Ausführen einer Berechnung mit der Toolbox

2.2.3 AP 1.3 Einarbeitung der Kinetikdaten des DBFZ-Reaktors

Dieses Arbeitspaket beinhaltet, die Erfassung der kinetischen Reaktionsdaten mit dem Festbett-Laborvergaser des DBFZ. Aufgrund von Lieferschwierigkeiten für Ersatzteile war der Reaktor erst wesentlich später im Projekt einsatzbereit als ursprünglich geplant. Mit der

zusätzlich eingetretenen pandemischen Lage sowie einem fast halbjährlichen Krankheitsausfall eines Mitarbeiters ergab sich eine deutliche Verzögerung bis der Festbett-Laborvergaser für Versuche genutzt werden konnte.

Bei den ersten Versuchen kam ein Präzisionshackgut (PHG) aus Fichtenholz zum Einsatz. Neben einer engen Partikelgrößenverteilung und sehr geringen Grob- und Feinanteilen, hatte dieser Brennstoff auch einen sehr geringen Rindenanteil. Zum Vergleich mit dem Labor-Batch-Reaktor (Festbett-Laborvergaser) wurde das Modell für Vergleichszwecke angepasst (siehe Anhang C). Durch den Abgleich sollte die Diskrepanz zwischen der angewandten Reaktionslimitierung und zusätzlicher Betteffekte untersucht werden. Hier kann auf ausführlichere Beschreibungen in der verfassten Veröffentlichung hingewiesen werden. [3] Darüber hinaus kommen im Modell Limitierungsfunktionen zum Einsatz, welche die Partikelgröße und strukturelle Unterschiede des Pyrolysekokses berücksichtigen. Abbildung 6 veranschaulicht hierzu die verschiedenen Limitierungen. In Abbildung 7 sind diese nochmal anhand eines Arrhenius-Diagramms verdeutlicht.

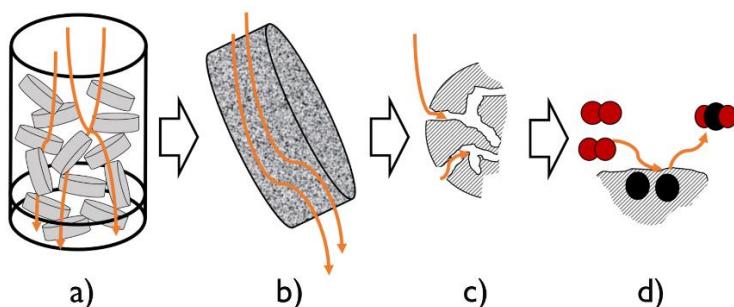


Abbildung 6 Darstellung des Gasweges. Bett- und Partikelströmungseffekte a) und b), Porendiffusion c) sowie die intrinsische Reaktion d) an der Koksoberfläche ergeben brennstoffspezifische limitierende Faktoren für die Reaktionen im Vergasungsreaktor. [4]

Der erste Abgleich des Modells mit den Messungen am Festbett-Laborvergaser des DBFZ zeigte deutliche Differenzen. Auf der Suche nach möglichen Ursachen wurden sowohl bei der Versuchsdurchführung als auch im Modell Verbesserungen vorgenommen. Die Koksabbaurate aus den Vergasungsversuchen am DBFZ wurde verglichen und zeigte eine zusätzliche Limitierung um ca. 25 % gegenüber den Partikelmessungen in der TGA. [3]

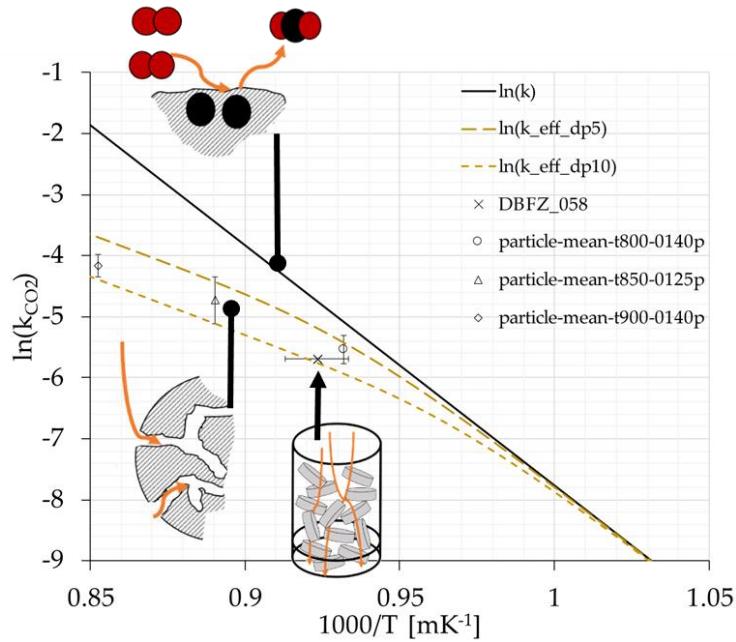


Abbildung 7 Auswirkung der Limitierungen und der Einfluss von Partikeldurchmesser auf diese.

Bei den Vergasungsversuchen am Festbett-Laborvergaser des DBFZ wurde versucht, eine möglichst homogene Temperaturverteilung zu realisieren. Dies gelang nur in erster Näherung. Für einen genaueren Vergleich wurden die Temperaturwerte aus den Versuchen mit Polynomen nachgebildet und im Modell implementiert (siehe Abbildung 8 (links)). Die Gaszusammensetzung in Abbildung 8 (rechts) verläuft leicht inkongruent. Der Temperatureinbruch den T7_7 im heißen Bettbereich zum Simulationsbeginn kann die anfänglich höhere CO-Konzentration und somit Reaktionsrate gegenüber dem Modell erklären. Im höheren Temperaturbereich lässt sich die vorherrschende höhere Limitierung im Laborversuch gegenüber dem Modell erkennen.

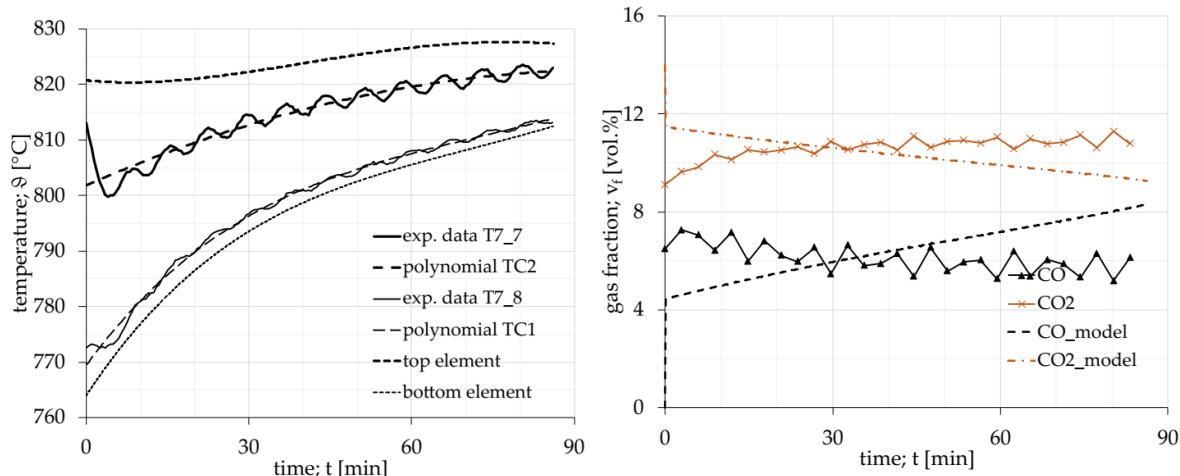


Abbildung 8 Vergleich der Modell- und Experimentalwerte für den Labor-Batch-Reaktor des DBFZ. Links dargestellt die experimentellen Temperaturdaten gegenüber den polynomisch modellierten Temperaturverläufen als Modelleingangsdaten. Rechts dargestellt die Gasverläufe zwischen Modell und Experiment. [3]

2.2.4 AP 1.4 Messkampagne an der marktnahen Testanlage (SRe²) und Einarbeitung der Validierungsdaten aus TP 3.2 und 3.3

Während des Projektes wurden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Messkampagnen zur Modellvalidierung abgestimmt. Ziel war hier die genaue Festlegung, welche Messwerte bei den Kampagnen generiert werden. Auch galt es die Frage zu klären, wo und wie diese an der Anlage gemessen werden.

Folgende Messungen wurden während den Messkampagnen aufgenommen:

- Temperaturfeld im Reaktor (HSH/DBFZ/SRE)
- Gaszusammensetzung (HSH/DBFZ)
- Teer im Produktgas direkt nach dem Reformer (HSH/DBFZ)
- Wasseranteil im Produktgas (DBFZ)
- Gasgeschwindigkeit bzw. Gasmenge (HSH)
- Brennstoffmenge (SRE)

Abbildung 9 zeigt die genutzte 70 kW_{el} Anlage der Spanner Re² bei der Messkampagne und die Messaufbauten des DBFZ und der HSH.

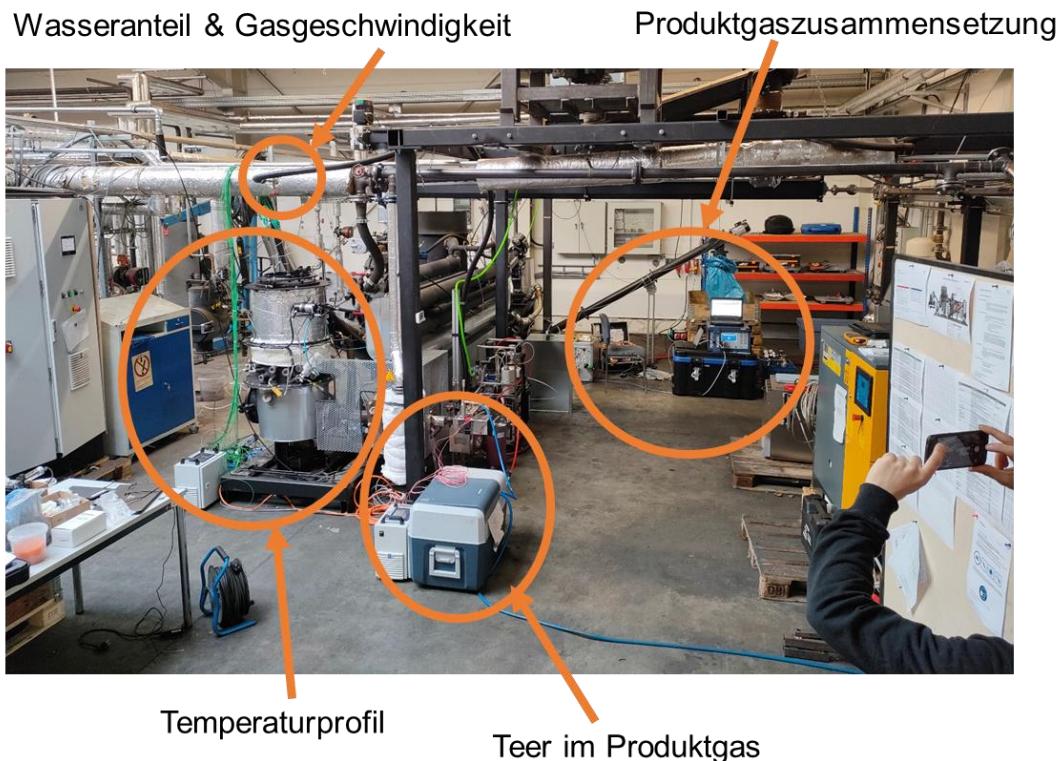


Abbildung 9 Marktnahe Testanlage und Apparaturen zur Messung und Bilanzierung.

Temperaturmessung im Reaktor

Die Temperatur ist ein wesentlicher Indikator für die physikalischen und chemischen Vorgänge im Reformer. Mit der Aufnahme des Temperaturfeldes ist ein Einblick in die Temperaturverteilung innerhalb des Reaktors gelungen. Dazu wurden während den Abstimmungen in AP 3.1 die in Abbildung 10 dargestellte Position von Lanzen- und Thermoelementen erarbeitet.

Für die Lanzen wurden Rohre aus einer temperaturbeständigen Nickel-Chrom-Eisen-Legierung mit einem Durchmesser und Wandstärke von $8 \times 1,5$ mm verwendet. Darin konnten sieben Thermoelemente mit einem Durchmesser von 1,5 mm hexagonal platziert werden. Die Positionierung der Lanzen wurde so vorgenommen, dass diese möglichst einen Querschnitt im Reaktor abbilden können und möglichst, ohne den Prozess zu stören.

Die SRE stellte die Lanzen und Thermoelemente bereit. Mit den Datenlogger des DBFZ und der SRE konnten die Messwerte dann zeitaufgelöst aufgezeichnet werden. Die Auswertung erfolgte durch die HSH.

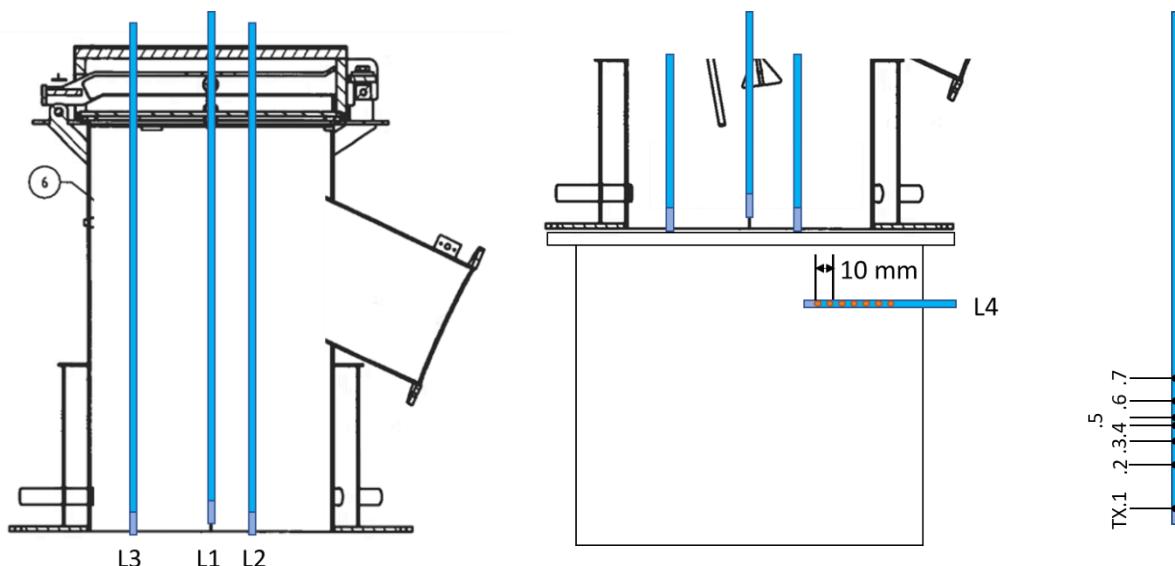


Abbildung 10 Positionierung der Lanzen (blau) L1 bis L3 im oberen Reformerteil (links) und L4 im unteren Reformerteil (mittig) sowie die Anordnung der Thermoelemente (orange Punkte) & (rechts).

Messkampagne 1 (Nov. 2021)

Mit dem Ziel der Überprüfung von Messgeräten, Anschlussstellen und Auswertung wurde die erste Messkampagne Ende 2021 durchgeführt. Dies vor dem Hintergrund, dass ein besonders homogener, rindenarmer Brennstoff für die Validierungsmessungen geplant ist und hohe Brennstoffkosten bedeutet. Während der Messkampagne wurde auch untersucht, wie lange die Anlage etwa betrieben werden muss, um den gewünschten stationären Betrieb erreichen zu können. Anhand von Gas- und Temperaturmessungen war ein annähernd stationärer Betrieb ca. vier Stunden nach einem Kaltstart erreicht. Je nach Ausfalldauer war nach Unterbrechungen eine Stabilisierungszeit etwa zwischen 20 min und 90 min nötig.

Temperaturmessung

Aus den Temperaturmessungen konnte das in Abbildung 11 dargestellte gemittelte Temperaturfeld generiert werden. Hier als gemittelte Darstellung abgebildet, konnten das Feld auch als Video dynamisch betrachtet werden. Die Temperaturen wurden in Abständen von 30 s aufgezeichnet. Wegen der z.T. starken Temperaturschwankungen innerhalb der Zeitschritte wurde für die darauffolgende Messkampagne ein Intervall von 1 s ausgewählt.

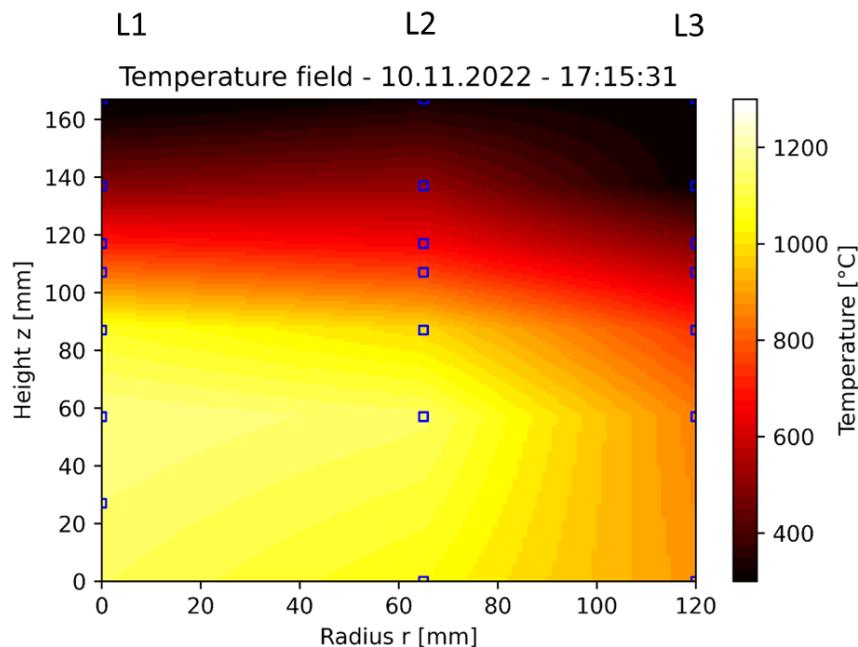


Abbildung 11 Darstellung Temperaturquerschnitts im Reformer während der ersten Messkampagne. Werte sind über einen Zeitraum mit kontinuierlichem Betrieb (ca. 4 h) gemittelt. Die Fläche zwischen den Messpunkten ist linear interpoliert.

Produktgasmessungen

Hier kamen zwei Messsysteme parallel zum Einsatz. Einerseits ein Visit03H von EHEIM Messgeräte GmbH der Hochschule Hof und ein µGC des Typs Micro GC Fusion® Gasanalysator von INFICON Holding AG des DBFZ. Abbildung 12 zeigt die gemittelte Zusammensetzung aus dem kontinuierlichen Betrieb während der ersten Messkampagne. Dabei ist zu erkennen, dass die Messwerte leicht voneinander abweichen. Aufgrund der arbeitstäglichen Überprüfung mit Prüfgas ist den µGC-Werten hier mehr Vertrauen zu schenken. Die Messwerte liegen im gängigen Bereich für Gleichstrom-Festbettreaktoren. [5]

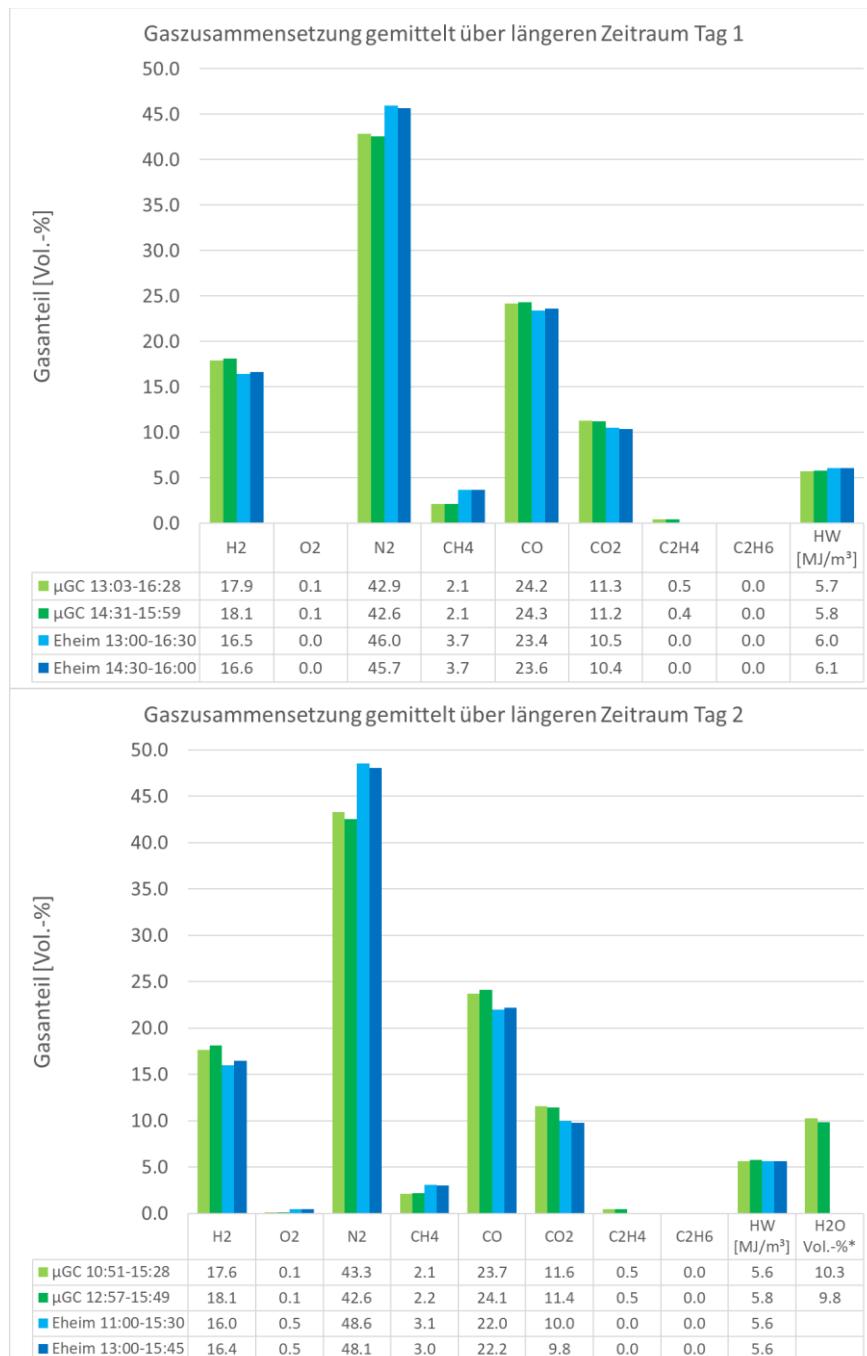


Abbildung 12 Gemessene Gaszusammensetzung während der ersten Messkampagne am ersten und zweiten Tag über stabile Versuchszeiträume gemittelt. Gegenüberstellung des Micro GC Fusion® Gasanalysator des DBFZ mit dem EHEIM Visit03H der Hochschule Hof

Messkampagne 2 (Dez. 2022)

Im Dezember 2022 konnte die zweite Messkampagne durchgeführt werden. Hierbei kam rindenarmer und vergleichsweise homogener Brennstoff als Referenzbrennstoff zum Einsatz. Da bei der zweiten Messkampagne kein zusätzlicher Brennstoff vermessen werden konnte, wurde in die Verbrennungsluft eine definierte Menge Wasser hinzugegeben, um eine Parametervariation zu generieren und die aktuellen Arbeiten beim Projektpartner Spanner Re² bestmöglich zu unterstützen. So wurden Daten mit einer Wasserzugabe in den Reformer von 0, 3, 4,5 und 6 L/h aufgenommen.

Temperaturmessung

Im Reformer kommt es stetig zu kurzfristigen und starken Schwankungen wie die Aufnahme der Temperaturen im Kern mit Lanze 1 in Abbildung 13 zeigt. Es ist zu erkennen, dass die Temperatur selbst im kontinuierlichen ungestörten Betrieb zum Teil starke Schwankungen aufweist. So sind Temperatursprünge von bis zu 200 °C innerhalb von wenigen Sekunden zu beobachten. Besonders sprunghaft sind die Messwerte der Thermoelemente (T1.3-T1.5), die knapp oberhalb der heißesten Zone (T1.2) angeordnet sind. Das Thermoelement T1.1 zeigt hingegen geringere Schwankungen. Unterhalb der Thermoelemente T1.1, T2.1 und T3.1 war es technisch nicht möglich, ohne unverhältnismäßigen Aufwand zu messen.

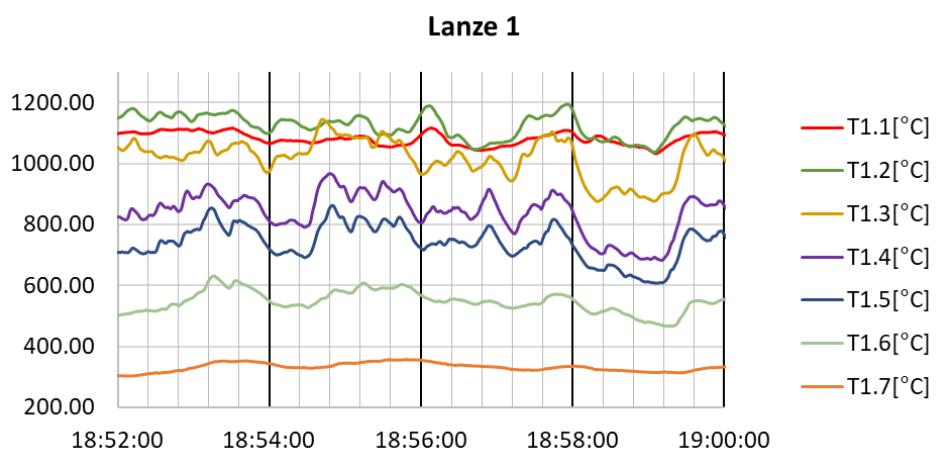


Abbildung 13 Messwerte der Thermoelemente von Lanze 1 in einem Zeitfenster mit stabilen, störungsfreien Anlagenbetrieb und hoher zeitlicher Auflösung ohne Wasserzugabe.

Aufgrund von Ausfällen mehrerer Thermoelemente und mehreren Anlagenstörungen während der zweiten Messkampagne konnte für den Modellvergleich nur die mittlere Lanze (L1) herangezogen werden. Der Temperaturvergleich zwischen Modell und Messung ist in Abbildung 14 dargestellt. Bedingt durch die Modellformulierung ergibt sich am Punkt der Luftzugabe und der damit verbundenen sofortigen Energiefreisetzung eine Temperaturspitze, die größer ist als der gemessene Mittelwert in einem schmalen Bereich. Die Differenz zur gemessenen Temperatur lässt sich dadurch erklären, dass die Messlanze zwar zentral aber dennoch einige cm Abstand zum direkten Lufteintritt hatte.

Die einsetzende Reduktion des Pyrolysekokses und eine vereinfachte Wärmeübertragung erklärt den raschen Temperaturabfall gegenüber den Messwerten. Wichtig ist hier zu erwähnen, dass die Luft im Reaktor nicht wie im Modell vereinfacht angenommen homogen über den gesamten Querschnitt eintritt. Im realen Prozess tritt sie zwar vorwiegend nahe der Reaktormittelachse ein, aber auch abseits davon punktuell verteilt.

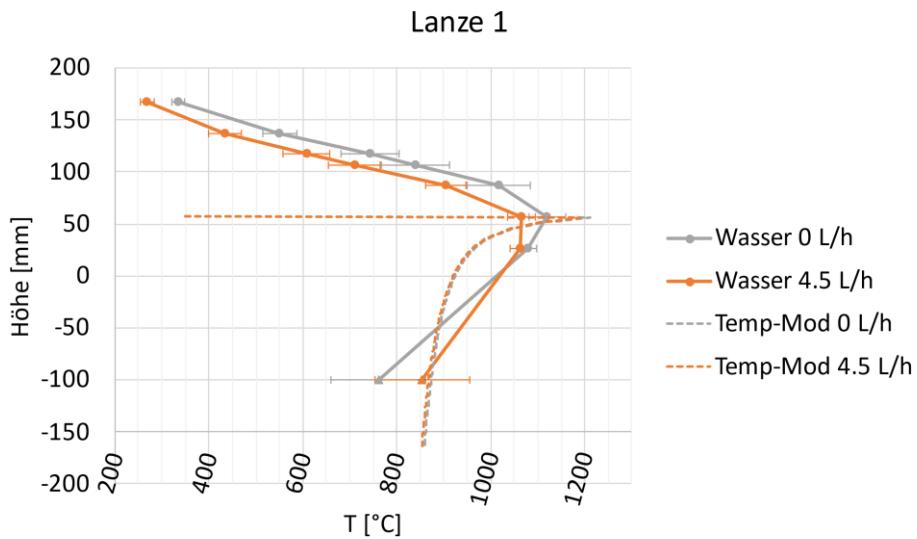


Abbildung 14 Temperaturprofil der Lanze 1 während einer stabilen Betriebsphase über die entsprechende Zeitspanne gemittelt in Gegenüberstellung mit dem modellierten Temperaturprofil mit einer Parametervariation. Höhe = 0 mm entspricht einem geometrischen Bezugspunkt. Die Punkte auf Höhe = -100 mm entstammen einer Extrapolation von Lanze 4 mit entsprechend breit angegebenen Fehlern.

Reaktorbedingt konnten die Thermoelemente in Lanze 4 technisch nur bis zum Radius von 95 mm platziert werden. Lanze 4 sollte dabei das Temperaturniveau im Bereich der Reduktionszone erfassen. Die dazugehörigen Werte sind in Abbildung 15 gezeigt. Geometrisch bedingt ist der Gasfluss in diesem Bereich etwas versetzt von der Mittelachse anzunehmen, weshalb der Punkt um 50 mm hier grob extrapoliert und im oberen Diagramm als Vergleichsbereich eingefügt wurde.

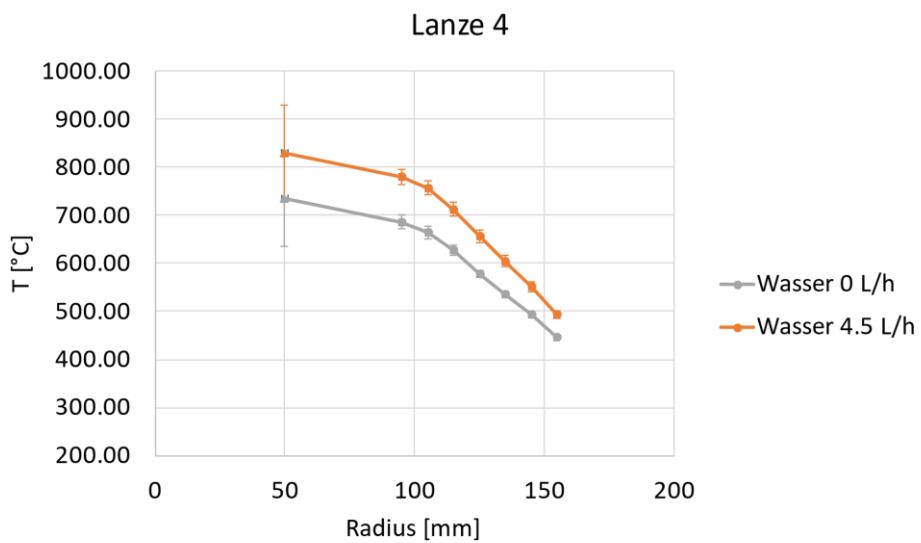


Abbildung 15 Werte der Thermoelemente in Lanze 4 die seitlich in den Bereich der Reduktionszone.



Abbildung 16 Temperaturmesslanzen bei der Überprüfung aufgrund von Störungen während der Messkampagne; Deckel mit drei Lanzen zum Teil stark verschoben (links); verbogene Lanze mit Gliedermaßstab als Bezugsgröße (mittig); abgeknickte Lanze mit deutlichem Materialverlust am Mantel (rechts).

Während der Messkampagnen kam es jedoch auch zu Herausforderungen bei den Temperaturmessungen (siehe Abbildung 16). Die Lanzen haben den Thermoelementen nur für eine begrenzte Zeit Schutz geboten. In der zweiten Messkampagne kam es in der Oxidationszone sogar zur Beschädigung der Lanzen in Form von Löchern oder besonders starkem Abknicken. Als Ursache wird die Kombination von temperaturbedingter Materialschwächung und Bettbewegung bei gleichzeitig hohen Temperaturspitzen über 1250 °C vermutet. Dabei kam es auch vor, dass mehrere Thermoelemente zerstört wurden, woraus fehlende Messergebnisse und Anlagenstandzeiten zum Austausch resultierten.

Zudem haben weitere Störungen im Anlagenbetrieb oder bei den Messgeräten die Messkampagne begleitet. Die Erfassung kontinuierlicher Betriebszustände im stationären Zustand waren dadurch in der kurzen Zeit der Messkampagne vor Ort nur schwer möglich, wodurch vergleichsweise wenige Ergebnisse zur Validierung herangezogen werden konnten. Trotzdem konnten verwertbare Daten zur Modellentwicklung aus der Temperaturfeldmessung generiert werden. Somit war trotz der geringen Anzahl verwertbarer Messergebnisse eine Arbeit am Simulationsmodell zur Validierung möglich. Für einen detaillierteren Abgleich zwischen marktnaher Testanlage und Simulationsmodell sind weitere Messergebnisse in entsprechender Qualität notwendig. Zu berücksichtigen sind dabei die hier im Projekt festgestellten Prozesseinflüsse- und -störungen auf die Messungen.

Eine dritte Messkampagne war aufgrund der fortgeschrittenen Zeit im Projekt nicht mehr realisierbar.

Produktgasmessung

Die in Abbildung 17 aufgezeichneten Werte sind Ergebnisse der Produktgasmessungen des DBFZ als Gegenüberstellung mit den Modellergebnissen. Zu erkennen sind leichte Abweichungen in der Zusammensetzung zwischen Mess- und Modellwerten. Insgesamt lässt sich aber eine relativ gute Übereinstimmung erkennen.

Während der zweiten Messkampagne wurde auch wieder mit dem EHEIM-Messgerät parallel gemessen. Die Auswertung der Messwerte zeigte jedoch zu hohe Abweichungen gegenüber dem µGC des DBFZ, welchem aufgrund der arbeitstäglichen Prüfgasmessungen mehr vertraut wird.

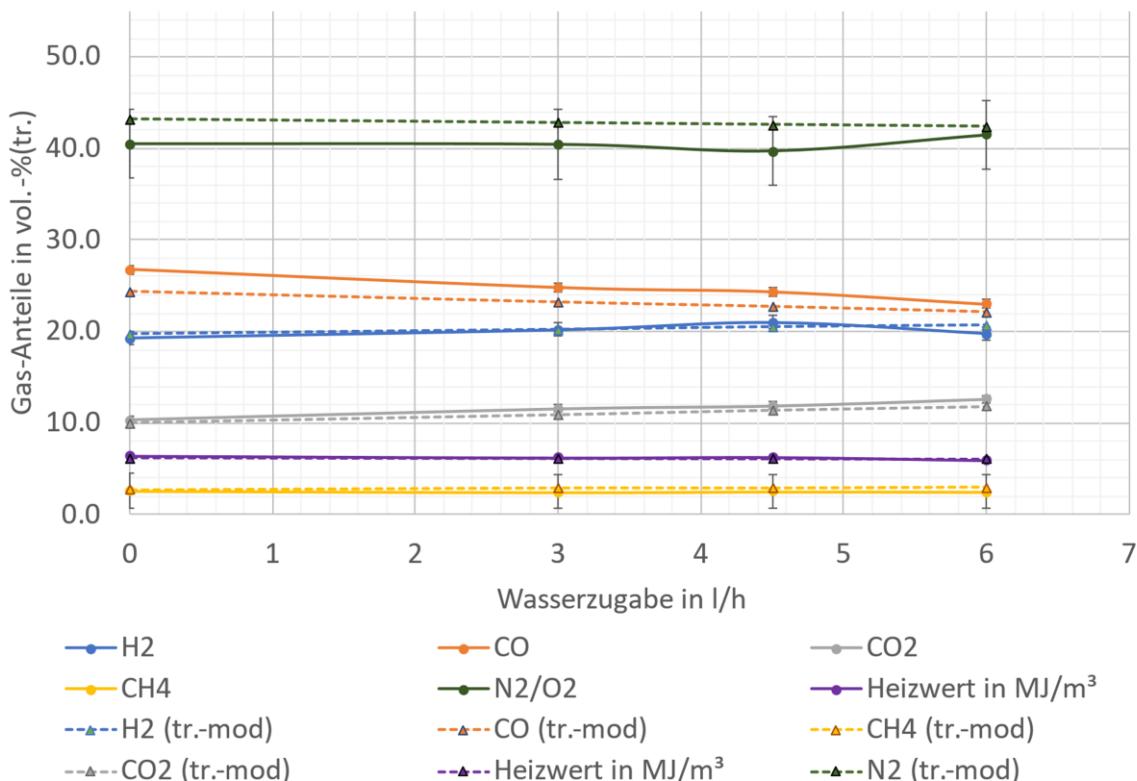


Abbildung 17 Gaszusammensetzung und Heizwert aus den Messungen mit den µGC und dem Modell mit unterschiedlichen Wasserzugaben gegenübergestellt.

Neben den Permanentgasen wurde mit einem Hygrophil H (Prozess Hygrometer 4230-XX) der Firma Bartec GmbH der Wasserdampfgehalt im Produktgas gemessen. Bei der Messkampagne im Nov. 2021 ergab sich mit gleichem Brennstoff über die 3 Messtage hinweg ein konstanter Verlauf mit 9 – 10 Vol.-% Wasserdampf im Produktgas.

Bei der 2. Messkampagne im Dez. 2022 ergaben sich technische Probleme bei der Datenaufzeichnung des Hygrophil H, wodurch diese nur händisch als Stichprobe abgelesen werden konnten. Grund war eine defekte Datenübertragung bei einem der verwendeten Datenlogger zur Messdatenspeicherung. Anhand der Stichprobenmessungen konnte trotzdem der Einfluss der Wasserdosierung in den Reformer festgestellt werden (siehe Tabelle 4). Der Messfehler des Hygrophil H beträgt +/- 1 Vol.-%.

Tabelle 4: Messergebnisse Wasserdampfmessung 2. Messkampagne Dez. 2022

Wasserdosierung	Mittelwert in Vol.-%	Schwankungsbreite in Vol.-%
0 L/h Wasserdosierung	12,0	11,7 – 12,5
6 L/h Wasserdosierung	15,4	14,3 – 15,6
3 L/h Wasserdosierung	13,7	13,2 – 14,5
4,5 L/h Wasserdosierung	14,0	13,5 – 14,3

Gasgeschwindigkeit & Gasmenge

Die Messung der Gasgeschwindigkeit erfolgte mittels Prandtl-Sonde und einem KIMO MP210. Der Zugang ließ nur eine vertikale Verschiebung innerhalb des Rohres zu. An den Punkten wurden mehrmals die Gasgeschwindigkeiten im Sekundentakt für 60 s aufgenommen. Bei den Messwerten kam es jedoch zu erheblichen Fluktuationen, weshalb die ermittelten Werte nur bedingt vertrauenswürdig sind. Mögliche Ursachen sind dabei ein pulsierender Gasstrom durch das ansaugende BHKW sowie ein unzureichender Abstand zwischen einem 90° Winkelstück und dem Messpunkt, sodass keine beruhigte Strömung zur Messung vorlag. Abbildung 18 zeigt die Positionierung des Zugangs und der Sonde im Übergangsrohr.

Ohne Wasserzugabe lag der aus den Messwerten errechnete Wert der Produktgasmenge bei $99,9 \pm 16,7 \text{ m}^3/\text{h}$ (i. N.)

Mit 4,5 L/h Wasserzugabe lag der aus den Messwerten errechnete Wert der Produktgasmenge bei $128,9 \pm 15,5 \text{ m}^3/\text{h}$ (i. N.)

Ausgehend von einer Volumenzunahme von $1,7 \text{ m}^3/\text{L}_{\text{Wasser}}$ liegen die beiden Mittelwerte zu weit auseinander. Selbst wenn das zugeführte Wasser chemische Reaktionen im Reformator eingeht und sich dadurch vollständig in zwei Gasanteile aufteilt, wäre eine Differenz von maximal $15 \text{ m}^3/\text{h}$ (i. N.) zu erwarten. Somit gibt diese Messung anders, als erwartet nur einen äußerst groben Vergleichswert.

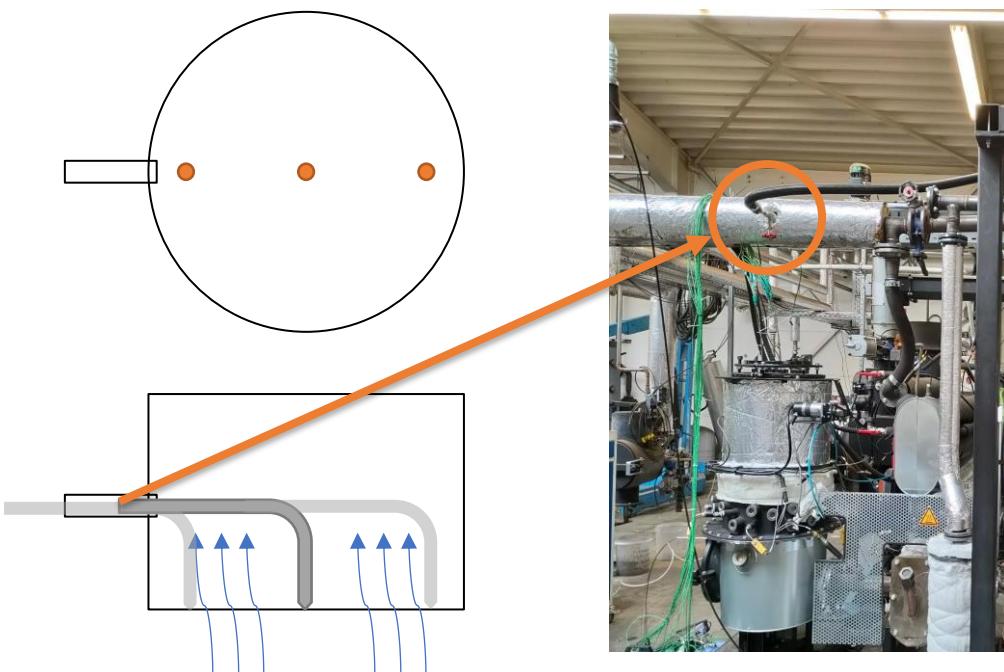


Abbildung 18 Positionierung des Staurohrs für die Messung der Gasgeschwindigkeit zur Abschätzung des Volumenstromes im Produktgas am Übergangsrohr zum BHKW.

Teermessung

Die durchgeführten Teermessungen bei beiden Messkampagnen konnten vom DBFZ mit der eigenen gravimetrischen Hausmethode problemlos durchgeführt werden. Die dafür vorher besprochene Messstelle bei ca. 450 °C Messgasttemperatur, konnte nach anfänglichen Verstopfungsschwierigkeiten mit Vergaserkokspartikeln erfolgreich genutzt werden. Bei der 1. Messkampagne im Jahr 2021 wurden vier Teermessungen mit den in Tabelle 5 dargestellten Ergebnissen durchgeführt. Bei der 2. Messkampagne im Jahr 2022 konnten an derselben Messtelle sechs Teermessungen durchgeführt werden, wobei bei der 1. Messung davon eine Verstopfung an der Messtelle eingetreten ist und bei der 2. und 3. Messung Fehler bei der Auswertung im Labor passiert sind, wodurch diese 3 Messungen keine verwertbaren Ergebnisse bringen konnten. Die Messungen 4, 5, und 6 im Dezember 2022 konnten dann problemlos durchgeführt und ausgewertet werden. Auch hier sind die Ergebnisse in Tabelle 5 dargestellt. Grundsätzlich ist zu den Ergebnissen zu sagen, dass daran die Motortauglichkeit des Produktgases nicht abgeleitet werden kann, da die Teermessstelle direkt hinter dem Reformer und noch vor dem Filter positioniert war. Ziel der Messung war es mit Blick auf den Erkenntnisgewinn der Spanner Re² zu erfahren, wie hoch der Teergehalt im heißen Produktgas ist. Sowohl die Teermessungen der 1. als auch der 2. Messkampagne zeigen Teer- und Staubgehalte des Produktgases in einer vergleichbaren und erwartbaren Größenordnung (300 - 400 mg/m³ (i. N) bei der 1. Messkampagne und 450 - 500 mg/m³ (i. N) bei der 2. Messkampagne mit 4,5 L/h Wasserdosierung in den Reformer) was den Eindruck des stationären Versuchsbetriebs der Anlage auch anhand dieses Parameters Teer bestätigt. Weiterhin kann bei der 2. Messkampagne der Einfluss der Wasserdosierung in den Reformer auch am Teergehalt des Produktgases gezeigt werden. Der Teergehalt im Produktgas bei der 3. Messung ist wesentlich höher als bei den Messungen 4 und 5 mit 4,5 L/h Wasserdosierung im Reformer. Ebenso sieht es beim Staubgehalt im Produktgas aus, der mit Wasserzugabe wesentlich geringer ist.

Tabelle 5: Ergebnisse der Teermessung beider OpToKNuS-Messkampagnen (11/2021 und 12/2022) an der Spanner Re²-Anlage

	Teer in mg/m ³ (i. N.)	Staub in mg/m ³ (i. N.)		
Messkampagne 1 (Nov. 2021)				
1. 10.11.2021 (60 min Messzeit)	372	+/- 82	1952	+/- 85
2. 10.11.2021 (60 min Messzeit)	293	+/- 97	1865	+/- 90
3. 10.11.2021 (60 min Messzeit)	318	+/- 97	1616	+/- 86
4. 10.11.2021 (60 min Messzeit)	349	+/- 72	1897	+/- 78
Messkampagne 2 (Dez. 2022)				
1. 14.12.2022 (30 min Messzeit)	832	+/- 81	4.760	+/- 141
2. 14.12.2022 (45 min Messzeit)	469	k. A.	1.769	k. A.
3. 14.12.2022 (45 min Messzeit)	499	k. A.	1.872	k. A.

Seitens der Hochschule Hof wurden parallel SPE-Messungen (Festphasenextraktion) zum methodischen Abgleich durchgeführt. Dazu wurden direkt im Anschluss an die Teermessungen des DBFZ mehrere Gasproben über Festphasen-Adsorption entnommen. Diese

wurden dann im Labor eluiert und mittels GC-FID analysiert. Dabei wurden signifikante Abweichungen der SPE-Methode gegenüber der DBFZ-Methode festgestellt.

Während der ersten Messkampagne wurden mittels µGC auch Werte für Benzol, Toluol und Xylol (BTX) ermittelt. Diese waren deutlich höher als bei der SPE-Methode. Als möglich Fehlerursache wurde hier der SPE-Probentransport identifiziert. Durch Kühlung und bessere Versiegelung der Proben wurden bei der 2. Messkampagne deutlich höhere Anteile an BTX-Komponenten festgestellt (Siehe Tabelle 6). Die Restkomponenten der SPE-Methode setzen sich aus überwiegend niedrigsiedenden Stoffen zusammen wie in Abbildung 19.

Während der zweiten Messkampagne konnte aufgrund einiger anlagenbedingter Ausfälle nur eine weitere verwertbare SPE-Probenreihe generiert werden.

Dennoch ist anzumerken, dass die SPE-Methode nach wie vor noch fehlerbehaftet ist, und Kontrollbedarf besteht gegenüber der gravimetrischen Methode des DBFZ. Für die Modellvergleiche in Bezug auf Teerbeladung im Produktgas wurden die gravimetrisch bestimmten DBFZ-Werte genutzt.

Tabelle 6 Teer -Messung im Vergleich

	Komponente in g/m³ (i. N.)				
	Benzol	Toluol	Xylol	Rest	Gesamt
Messkampagne 1 (Nov. 2021)					
µGC (DBFZ)	2,6	0,68	0,20	-	3,48
SPE (HSH)	0,56	0,27	0,05	0,95	1,83
Gravimetrisch (DBFZ)	-	-	-	-	0,35
Messkampagne 2 (Dez. 2022)					
SPE (HSH)	1,8	0,55	0,15	1,4	3,9
Gravimetrisch (DBFZ)	-	-	-	-	0,499

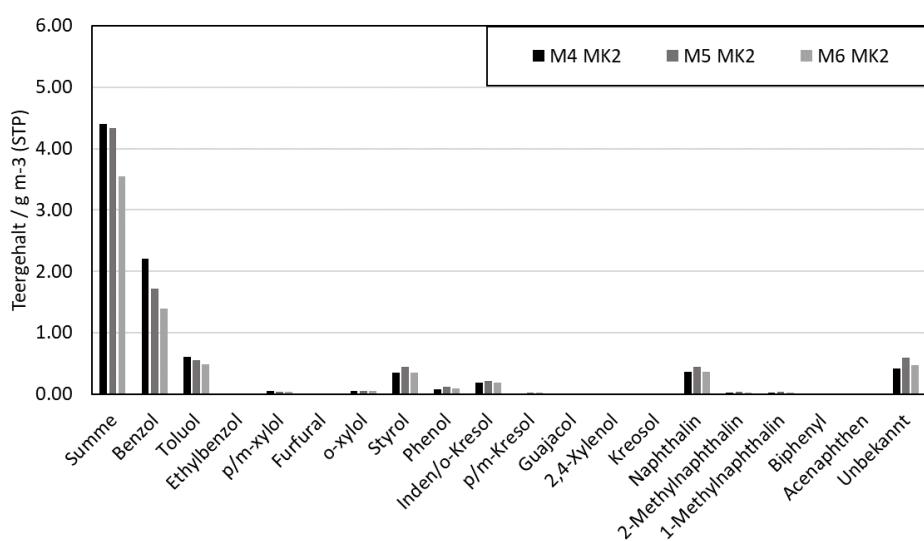


Abbildung 19 Verteilung der Teerbestandteile am zweiten Tag der 2. Messkampagne (Dez. 2022) um 18 Uhr bei 4,5 L/h Wasserzugabe in der Vergasungsluft. Die dargestellten unbekannten Anteile setzen sich größtenteils aus niedrig siedenden Stoffen zusammen.

2.2.5 AP 1.5 Theoretische brennstoffspezifische Prozessoptimierung mit Hilfe der Toolbox
Dieses Arbeitspaket konnte im Rahmen des Projektes nicht bearbeitet werden. Geplant war hier der exemplarische Einsatz der ausgereiften Toolbox, die über automatische Optimierungsfunktionen verfügt. Dabei sollten effizient Eingangsgrößen derart variiert werden können, um gewünschte Zielgrößen zu erreichen.

Beispielsweise ein gewünschtes Temperaturmaximum durch niedrigere Luftzahl, um Ascheschmelzen zu meiden, ohne die Teermenge signifikant zu erhöhen. Oder eine Teerreduktion ohne signifikante Einbußen beim Heizwert der Produktgases.

Aufgrund des Zeitverzugs im Projekt und der Weiterentwicklung und der Anpassung des Simulationsmodells sowie den daher noch vorhandenen Abweichungen beim Vergleich mit der Realität, war eine derartige Parametervariation zeitlich nicht mehr möglich.

2.2.6 AP 1.6 Projektkoordination und Öffentlichkeitsarbeit

Während des Projektes gab es aufgrund der zusammenhängenden Arbeitspakete mit Blick auf die Themen Versuchsplanung, Messergebnisse und Fortschritte im Simulationsmodell stetige Abstimmungen und einen permanenten Informations- und Ergebnisaustausch. Es wurden mehrere Projekttreffen (Tabelle 7) durchgeführt. Zwischen den einzelnen Online und Vor-Ort-Treffen bestand sowohl telefonisch als auch per Mail reger Kontakt zwischen den Projektpartnern. Zeitweise wurden vereinbarte wöchentliche Absprachen eingerichtet. Als Projektkoordinator wurden von der Hochschule Hof die Treffen im Konsortium organisiert.

Tabelle 7: Übersicht der OpToKNuS-Projekttreffen

Datum	Meeting	Ort	Teilgenommen
2020-02-05	Kick-Off-Meeting	Münchberg (HSH)	HSH, DBFZ, SRe ² , PTJ
2020-04-29	Technisches Meeting	Jitsi / Online	HSH, DBFZ, SRe ²
2020-05-28	Technisches Meeting	Zoom / Online	HSH, DBFZ, SRe ² , HSZG
2020-09-09	Projekt-Meeting	Neufahrn (SRe ²)	HSH, DBFZ, SRe ² ,
2021-02-16	Technisches Meeting	Zoom / Online	HSH, DBFZ, SRe ²
2021-06-23	Projekt-Meeting	Zoom / Online	HSH, DBFZ, SRe ²
2021-07-21	Projekt-Meeting	Neufahrn (SRe ²)	HSH, DBFZ, SRe ²
2021-09-17	Projekt-Meeting	Zoom / Online	HSH, DBFZ, SRe ²
2021-09-29	Technisches Meeting	Zoom / Online	HSH, DBFZ, SRe ²
2022-01-21	Projekt-Meeting	Zoom / Online	HSH, DBFZ, SRe ²
2022-03-09	Projekt-Meeting	Zoom / Online	HSH, DBFZ, SRe ²
2022-03-14	IBK-Treffen 1	Zoom / Online	HSH, DBFZ, SRe ² , IBK
2022-05-09	Projekt-Meeting	Leipzig (DBFZ)	HSH, DBFZ, SRe ²
2022-07-04	IBK-Treffen 2	Zoom / Online	HSH, DBFZ, SRe ² , IBK
2022-09-09	Projekt-Meeting	Zoom / Online	HSH, DBFZ, SRe ²
2022-11-17	Technisches Meeting	Zoom / Online	HSH, DBFZ, SRe ²
2023-01-13	Projekt-Meeting	Zoom / Online	HSH, DBFZ, SRe ²
2023-03-03	Technisches Meeting	Zoom / Online	HSH, DBFZ, SRe ²
2023-04-06	Technisches Meeting	Zoom / Online	HSH, DBFZ, SRe ²
2023-05-02	Projekt-Meeting	Hof (HSH)	HSH, DBFZ, SRe ²
2023-06-19/20	Abschlusstreffen (IBK-Treffen3)	Hof / Münchberg	HSH, DBFZ, SRe ² , IBK, PTJ,

Neben den Arbeitsthemen gab es insbesondere zwischen der Hochschule Hof und dem DBFZ intensive Abstimmung zu Öffentlichkeitsarbeit bzw. den Projektveröffentlichungen. Diese sind in Abschnitt 2.6 aufgelistet (Tabelle 20).

2.2.7 AP 1.7 Messungen mit TGA zur Bestimmung der Reaktivität (Durchführung/Auswertung)

Dieses Arbeitspaket ist während des Projektverlaufs entstanden. An der HSH wurden etwa Mitte 2020 parallel zu diesem Projekt mit der Beschaffung einer STA 449 F3 Jupiter von der Firma NETZSCH Gerätebau GmbH die Analysemöglichkeiten vor Ort in Hof stark verbessert. Durch eine nun verfügbare thermogravimetrische Analyse konnten an der HSH direkt die chemischen Reaktivitäten der Brennstoffe sehr genau und effizient bestimmt werden. Dieser Umstand wurde seitens der HSH genutzt, um den Projektverzögerungen durch die pandemische Lage entgegenzuwirken. Abbildung 20 zeigt die Thermowaage im Labor der HSH mit dem kombinierten Feuchtegenerator sowie das verwendete Messprinzip. Unter definierter Reaktivgaskonzentration und Temperatur kann die Probe möglichst langsam und möglichst ohne diffusive Gastransportlimitierungen reagieren. Zur Auswertung dient dann die Massenabnahme über die Versuchszeit hinweg. Untersucht wurden die Reaktivgase CO₂, O₂, und H₂O.

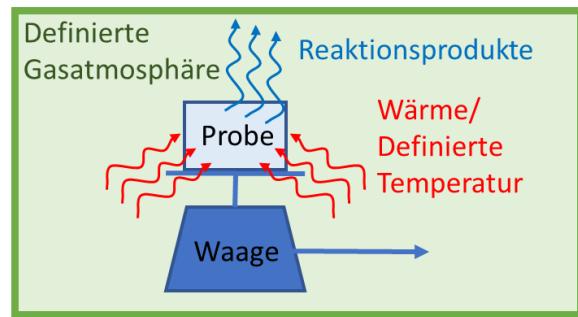


Abbildung 20 Messgerät im Labor mit Feuchtegenerator für H₂O-Atmosphäre (links) und Messprinzip (rechts)

Ziel war es die Reaktivität der Pyrolysekohle zu analysieren, um die Reduktionszone im Reformator der Spanner Re²-Anlage bzw. im Reaktor des DBFZ-Festbett-Laborvergasers brennstoffspezifisch beschreiben zu können. Die intrinsische maximale Massenabnahme des Pyrolysekokses wird im Modell auf Basis des folgenden Ansatzes Beschrieben:

$$\frac{dm_{t,Koks}}{dt} = -m_{0,Koks} M_{Koks} c_j^{\nu_{j,Koks}} A_{0,j,Koks} e^{-\frac{E_{A,j,Koks}}{T \cdot R}}$$

Die mit den Messungen zu bestimmenden Werte sind dabei die Ordnung $\nu_{j,Koks}$, der präexponentielle Faktor $A_{0,j,Koks}$ und die Aktivierungsenergie $E_{A,j,Koks}$. Diese Werte unterscheiden sich nach Art der Biomasse, aus welcher der Koks gebildet wurde und des Reaktivgases j . Für jede Biomasse wurde die Reaktionsrate gegenüber den drei Reaktivgasen analysiert.

Nach dem Simulationsabgleich der Messergebnisse am DBFZ-Reaktor ergaben sich zusätzlich neue Erkenntnisse, sodass die Parametervariation des ursprünglichen Versuchs-

plans für die Reaktivitätsmessungen angepasst werden musste. So wurde der Temperaturbereich für die Messungen verringert.

Verglichen zum Modell war die Reaktion im Festbett-Laborvergaser des DBFZ wesentlich langsamer als modelliert. Auf der Suche nach möglichen Ursachen, wurde festgestellt, dass die ersten TGA-Versuchsreihen nicht wie zuvor angenommen im Bereich der chemischen Limitierung waren. Die anfängliche Auswahl der Temperaturen war zu hoch und hatte zur Folge, dass die Reaktion durch den äußeren Stofftransport limitiert war. Dieser Einfluss ist an einem systematischen Abknicken im Arrhenius-Plot zwischen den gemessenen Temperaturstufen erkennbar, wurde jedoch nicht sofort als solcher identifiziert. Dies ist links in Abbildung 21 beispielhaft dargestellt und zeigt die Messpunkte gegenüber dem Model-Fitting. Aufgrund der logarithmischen Darstellung ist der Knick jedoch als signifikant zu betrachten und ist daher das Indiz für die äußere Limitierung. Aus den drei Punkten lässt sich jedoch nicht erkennen, wo die Limitierung tatsächlich einsetzt. Der Temperaturbereich wurde deshalb entsprechend neu gewählt. Die rechte Grafik in Abbildung 21 zeigt die Ergebnisse aus den Messungen mit angepassten Temperaturbereich. Darin ist auch eine Messung mit konstant steigender Temperatur abgebildet, die sich gut mit dem linearen Verlauf des Modelfittings aus den Einzelmesspunkten deckt.

Nach Anpassung der Temperaturbereiche konnte die chemische Limitierung nun erreicht werden. Für das Modell bedeutet das noch schnellere Reaktionsraten. Die Diskrepanzen zwischen Modell und Laborvergaser des DBFZ konnten dann jedoch darauf zurückgeführt werden, dass der Knudsen-Diffusionskoeffizient in der Modellierung einen größeren Einfluss hat als bisher angenommen. Genauer sind diese Zusammenhänge in der Veröffentlichung dargestellt [3].

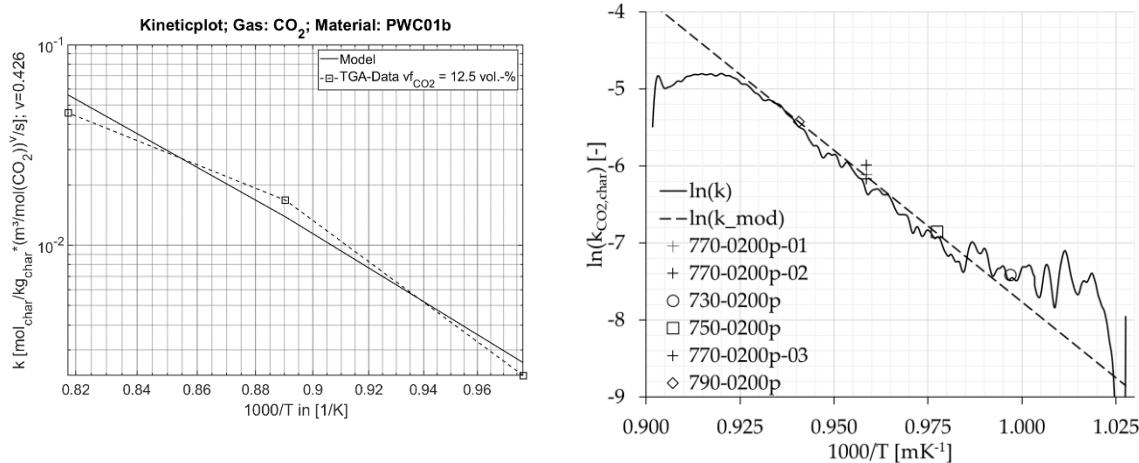


Abbildung 21 Vergleich Modelfittings aus den TGA-Auswertungen vor (links) und nach (rechts [3]) der Temperaturanpassung.

Die Parametervariation der Messreihen für einen Brennstoff an der TGA sind in Tabelle 8 dargestellt. Nähere Informationen zu den verbesserten Messreihen und der Vorgehensweise bei den Messungen sind in der Veröffentlichung „Extensive Experimental Characterization with Kinetic Data for the Gasification Simulation of Solid Biofuels“ wesentlich ausführlicher beschrieben. [3] Die Reaktivität des Pyrolysekoks aus Strohpellets gegenüber O₂ war deutlich höher als die der anderen Pyrolysekoksproben. Daher musste das Temperaturniveau erneut signifikant angepasst und die Messreihe für Stroh wiederholt werden.

Tabelle 8 Versuchspараметer (Temperatur T und Gasanteil ν) für die TGA-Versuche zur chemisch limitierten Kinetik-Messung [3]. Bei O₂-Messungen mit niedrigerem Temperaturniveau.

		V01	V02	V03	V04	V05	V06	V07	V08
CO ₂	T in °C	770	770	730	750	770	790	770	770
	ν in Vol.-%	20	20	20	20	20	20	12,5	5
O ₂	T in °C	390	390	360	375	390	405	390	390
	O ₂ Strohpellets	320	320	300	310	320	330	320	320
H ₂ O	ν in Vol.-%	20	20	20	20	20	20	12,5	5
	T in °C	760	760	720	740	760	780	760	760
	ν in Vol.-%	20	20	20	20	20	20	12,5	5

Aus den Messungen ergaben sich die ermittelten Werte in Tabelle 9 und Tabelle 10 für die chemisch limitierten heterogenen Reaktionen.

Tabelle 9 Ermittelte Werte für die Parameter zur Beschreibung der intrinsischen Reaktionsraten von Pyrolysekoks aus dem Präzisionshackgut und Literaturwerte für die heterogene Reaktion zum Vergleich [3]

Parameter	Ermittelte Werte PHG [3]	Aus verschiedener Literatur untersucht von Di Blasi [6]	Weitere Vergleichswerte		Einheit
			Schneider et al. [7]		
E _{A,CO₂}	3.27	0.88–2.50	3.0–3.1	×10 ² kJ/mol	
A _{0,CO₂}	5.30 × 10 ¹³	3.1 × 10 ⁶ –2.59 × 10 ⁸	5.68 × 10 ⁹ –1.02 × 10 ¹⁰	verschieden	
ν _{CO₂}	0.41	0.4–0.6	0.19–0.21	-	
E _{A,O₂}	1.32	0.76–2.29	-	×10 ² kJ/mol	
A _{0,O₂}	5.79 × 10 ⁷	5.3 × 10 ⁵ –4.5 × 10 ⁸	-	verschieden	
ν _{O₂}	0.61	0.5–1	-	-	
E _{A,H₂O} ,	2.57	1.43–2.37	2.35–2.64	×10 ² kJ/mol	
A _{0,H₂O}	3.8 × 10 ¹⁰	1.7 × 10 ⁵ –2.62 × 10 ⁸	1.55 × 10 ⁶ –5.7 × 10 ⁸	verschieden	
ν _{H₂O}	0.34	0.4–1	0.45–0.47	-	

Tabelle 10 Ermittelte Werte für weitere im Projekt untersuchte Brennstoffe

Parameter	RefSRe	Strohpellets	Buche	Einheit
E _{A,CO₂}	2.82	2.31	3.19	×10 ² kJ/mol
A _{0,CO₂}	1.75 × 10 ¹¹	1.54 × 10 ⁹	2.82 × 10 ¹³	verschieden
ν _{CO₂}	0.462	0.55	0.43	-
E _{A,O₂}	1.40	1.13	1.28	×10 ² kJ/mol
A _{0,O₂}	8.40 × 10 ⁷	3.22 × 10 ⁷	4.35 × 10 ⁷	verschieden
ν _{O₂}	0.59	0.62	0.61	-
E _{A,H₂O}	2.44	2.96	2.64	×10 ² kJ/mol
A _{0,H₂O}	3.62 × 10 ⁹	5.22 × 10 ¹²	8.30 × 10 ¹⁰	verschieden
ν _{H₂O}	0.42	0.57	0.44	-

2.2.8 AP 2.1 Geeignetes Format/Programm für Toolbox und Datenbank festlegen

Die Basis des Rechenmodells wurde als Matlab-Code verfasst. Darauf aufbauend wurde der Code vorerst in Matlab weiterentwickelt. Die Nutzung von Matlab bedarf jedoch den Kauf von Nutzerlizenzen. Im Projekt bestand jedoch die Zielstellung, das Modell in Lizenz- bzw. kostenfrei der Öffentlichkeit bereitstellen zu können. Im Projekt geschah das unter Berücksichtigung einiger Aspekte wie Übersetbarkeit, Nutzbarkeit und Anwenderfreundlichkeit. Ursprünglich war die Code-Migration mit Hilfe des Matlab-Tools „MATLAB Coder“ zur automatisierten C++-Code-Erstellung angedacht.

Nach mehreren erfolglosen Versuchen und der Erkenntnis, dass diese Vorgehensweise nicht zielführend ist, wurde eine manuelle Übersetzung in Python unternommen. Hierdurch ergibt sich der Vorteil einer gängigen Programmiersprache im Wissenschafts- und Ingenieurumfeld mit vielen Möglichkeiten zur Erweiterung und Anpassung in einer Open-Source-Umgebung. Der Programmcode ist damit frei zugänglich und nicht schreibgeschützt. Dadurch kann ein Nutzer mit entsprechenden Kenntnissen auch selbst noch Änderungen im Programmcode vornehmen und diesen nach eigenen Bedürfnissen weiterentwickeln bzw. die Weiterentwicklung aufgreifen. Im Sinne von Open Science sind somit auch die Brennstoffdaten nach Projektende frei zugänglich und abrufbar. Auch soll es anderen Institutionen möglich sein, die Datenbank zu erweitern. Dies muss jedoch offiziell und mit ausreichenden Kennzeichnungen und in Absprache über die HSH oder das DBFZ stattfinden.

Für die Datenbank wurde zu Projektbeginn konzipiert, wie die Zugriffe und Verfügbarkeiten geregelt sein könnten. Einen Ansatz dafür zeigt Abbildung 22. Hier sind fünf mögliche Interessensgruppen betrachtet und sinnvolle Zugriffsmöglichkeiten zugeordnet. Als Datenbank fiel die Entscheidung auf eine simple Excel-Liste oder .CSV-Liste aufgrund der geringen Datenmenge. Die Nutzung selbst gängiger Datenmanagementsysteme wäre hierfür unpraktikabel. Im Zuge des Projektes wurde sich auf eine Offline-Toolbox zum Herunterladen festgelegt. Die untersuchten Brennstoffe sind dann zur Auswahl im Modell als Datei integriert. Der dazugehörige Brennstoffdatensatz wird zusätzlich als Excelliste bereitgestellt.

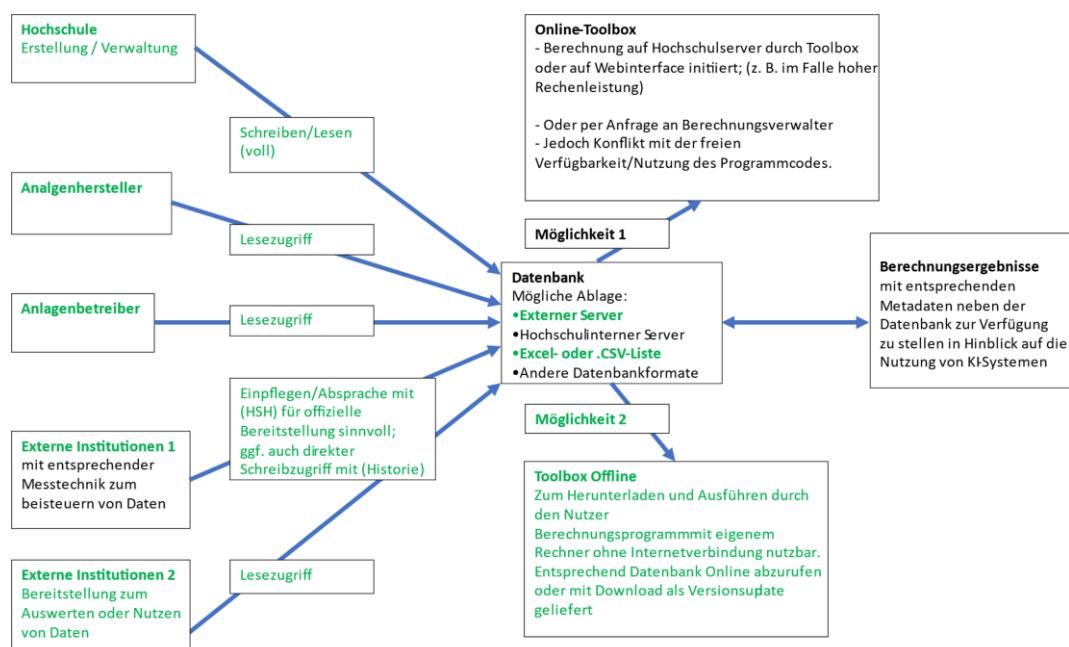


Abbildung 22 Überlegungen zur Datenbank. Mögliche Nutzer sowie Toolbox- und Datenbereitstellung. In Grünschrift dargestellt die im Projekt gewählte Form.

In Abstimmung mit dem DBFZ (AP 4.6) wurde sich für die Datenbank auf die in Tabelle 11 gelisteten Brennstoffdaten geeinigt. So wurden neben den modellspezifischen Daten nach Möglichkeit auch weitere gängige Brennstoffanalysen durchgeführt. Dazu ist eine Einordnung zur Verwendung angegeben.

- Nur ein Teil davon ist aktuell im Modell direkt oder indirekt berücksichtigt. (Ja)
- Bei manchen ist es denkbar durch künftige Untersuchungen Rückschlüsse oder Ableitungen von Werten oder Einflüssen für das Modell zu ermöglichen. (Möglich)
- Manche können für andere Anwendung oder als Metadaten dienlich sein. (Meta)

Tabelle 11 Werte eines Brennstoffs oder des daraus entstandenen Pyrolysekokses, welche als Gesamtheit zur Brennstoffcharakterisierung erfasst werden könnten, mit der Einordnung zum Gebrauch.

Parameter		Direkte oder indirekte Verwendung im Modell (Ja, Möglich, Meta)	
Lfd. Nr.	Bezeichnung	Biomasse	Pyrolysekoks der Biomasse
1	Biomassetyp		Meta
2	Herkunft		Meta
3	Partikelgrößenverteilung	Möglich	Möglich
4	Durchschnittliche Partikeldimension LxBxH	Möglich	Ja
5	Sauter-Durchmesser	Möglich	Ja
6	Schüttdichte	Möglich	Ja
7	Partikeldichte	Möglich	Ja
8	Partikelporosität	-	Ja
9	Schüttporosität	Meta	Ja
10	Oberer Heizwert	Möglich	Meta
11	Unterer Heizwert	Möglich	Meta
12	Rindenanteil	Möglich	Möglich
13	Aschegehalt (550 °C)	Meta	Meta
14	Aschegehalt (855 °C)	Möglich	Möglich
15	Wasseranteil	Ja	-
16	Flüchtige Substanzen (Anteile)	Meta	-
17	Pyrolyseprodukte (820 °C; 5 – 15 K/min) Gewichtsanteile: - Restkokks - Pyrolysegas gesamt und einzeln: o H ₂ o CO o CO ₂ o CH ₄ (ggf. C ₂ H ₄ C ₂ H ₆) - Teer - Wasser	Ja	-
18	Elementaranalyse (CHNS-O)	Möglich	Möglich
19	ICP-OES Totalaufschluss	Möglich	Möglich
20	Intrinsische Reaktivität des Pyrolysekokses gegenüber: - CO ₂ - O ₂ - H ₂ O	-	Ja
21	Spezifische Oberfläche des Pyrolysekokses	-	Möglich
22	Porengrößenverteilung	-	Möglich
23	Daten zum Ascheschmelzverhalten	Möglich	

2.2.9 AP 2.2 Programmierung einer Toolbox-Bedienoberfläche

Die Nutzung des Simulationsmodells in Form eines rohen Programmcodes ist im Einsatz bei Industriepartnern nicht praktikabel. Ziel war es, eine übersichtliche und einfach zu nutzende Bedienoberfläche anbieten zu können. Hiermit soll der Nutzer möglichst einfach Berechnungen starten und anpassen können, um Parameterstudien durchzuführen. Dazu wurde die Python-Bibliothek „tkinter“ zur Erstellung eines GUI (Graphical User Interface) verwendet. Das Erscheinungsbild der Nutzeroberfläche ist in Abbildung 23 zu sehen. In den hellen Feldern können Werte eingetragen werden. Bei der Auswahl eines Brennstoffs werden der im Projekt erfasste äquivalente Partikeldurchmesser sowie die Porosität vom Pyrolysekoks und dessen Schüttung aus dem eingesetzten Brennstoff angezeigt. Derzeit in der Oberfläche veränderbare Werte sind:

- Höhe der Reduktionszone
- Durchmesser der Reduktionszone
- Dem Prozess zugeführte Luftmenge
- Umgebungstemperatur und Luftfeuchte
- Temperatur mit der die Luft in der Oxidationszone ankommt (Luft-Vorwärmung)
- Massenfluss der trockenen Biomasse
- Schüttdichte (aktuell ungenutztes Artefakt)
- Feuchte der Biomasse
- Äquivalenter/durchschnittlicher Partikeldurchmesser

Die Angabe der Schüttdichte (ρ_{bulk_BM}) ist derzeit ungenutzt. Angedacht war die Ableitung der Partikel- und Schüttporosität des Pyrolysekokses aus der Partikel- und Schüttdichte des trockenen Brennstoffs. Eine verlässliche Umrechnung war hier nicht möglich. Dies wäre interessant, erfordert jedoch genauere Untersuchungen entsprechender Zusammenhänge, da es bei der Pyrolyse zur Schrumpfung der Biomassepartikel kommt und sich somit eine neue Schüttdichte beim Pyrolysekoks einstellt. Je nach Größenverteilung können die Schüttdichten dabei auch stark abweichen. Demnach müssten mehrere unterschiedliche Brennstoffformen und -schüttungen roh und pyrolysiert verglichen werden.

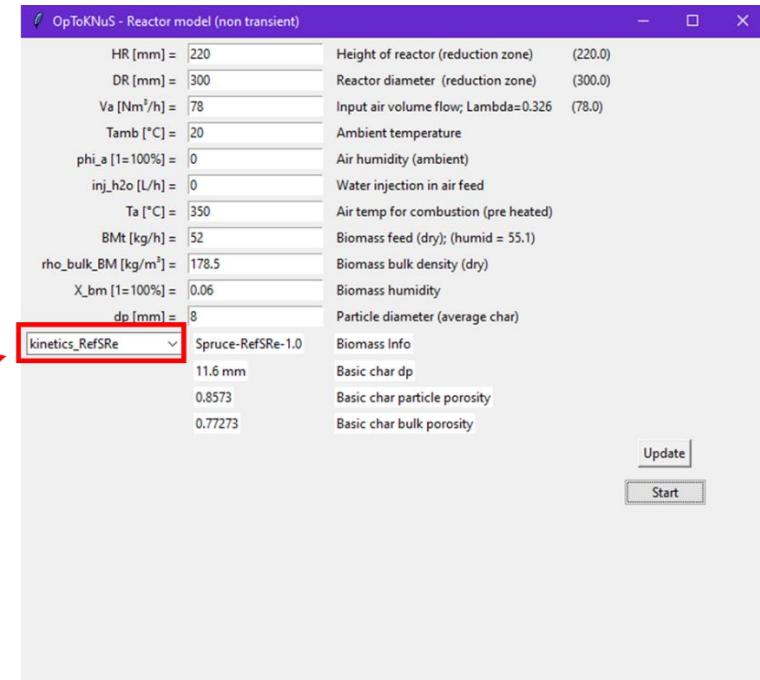


Abbildung 23 Nutzeroberfläche der Toolbox mit hellen Eingabeflächen und dazugehörigen Informationen sowie der rot markierten Brennstoffauswahl als Auswahlmenü.

Im folgenden Link ist eine Anleitung zu finden, wie das Rechentool „Toolbox“ installiert und gestartet werden kann <https://nextcloud.hof-university.de/s/FCoi4EGFAbnDr3N>. Dazu ist die Installation eines Python-Compilers und das Herunterladen der Toolbox-Dateien notwendig. Die Toolbox kann nach erfolgreicher Installation durch Kompilieren gestartet werden und die Nutzer-Oberfläche öffnet sich, womit die Toolbox verwendet werden kann.

Unter dem Link ist auch die Excelliste mit den Brennstoffdaten zu finden.

Die bisher im Projekt ermittelten brennstoffspezifischen Datensätze wurden in das Programm eingebunden. Dazu sind die Kinetikdaten eines Brennstoffs in je einer separaten Datei hinterlegt. Diese Brennstoffdateien können dann in der Toolbox ausgewählt werden. Es ist also nicht ausreichend, die Excelliste zu ergänzen, um weitere Brennstoffe in der Toolbox nutzen zu können. Dafür muss aktuell im Unterordner entsprechend eine weitere Brennstoffdatei angelegt werden. Dies geschieht manuell, indem eine Brennstoffdatei kopiert, umbenannt und mit den neuen Daten gefüllt wird.

2.2.10 AP 2.3 Verbesserung und Weiterentwicklung der Toolbox

Nach dem erfolgreichen Aufbau der Toolbox mit Bedienoberfläche war geplant, zusätzliche Validierungsmessungen und Funktionserweiterungen durchzuführen. So war ein Projektziel automatisierte Optimierungsstrategien und Parametervariationen zu ermöglichen, indem diese Funktionen im Code implementiert werden. Die Code-Übersetzung und Bedienoberflächenprogrammierung war jedoch wesentlich umfangreicher als ursprünglich geplant. Automatische Optimierungsfunktionen oder nutzerfreundlichere Parametervariation konnten im Rahmen des Projektes deshalb nicht mehr in den Code integriert werden. Zum Projektende werden bei der Anwendung der Toolbox die Ergebnisse zusammen mit den Eingangsparametern in einer CSV-Datei hinterlegt, um diese nach manueller Parametervariationen auswerten und gegenüberstellen zu können.

Weitere Beispiele für Verbesserungen der Toolbox wären die Überprüfung auf gültige Eingabewerte, Verhindern von numerischen Singularitäten oder nicht konvergierenden Berechnungen.

Durch den freien Codezugang in der Toolbox besteht die Möglichkeit mit Programmier-Erfahrung entsprechende Funktionen nachzurüsten oder Teile des Codes auch für andere Anwendungen zu nutzen.

2.2.11 AP 2.4 Gründung eines Industriebegleitkreises

Während des Projektes wurde wie geplant ein Industriebegleitkreis gegründet. Zur Teilnahme wurden die wichtigsten Akteure der Holzgasbranche eingeladen, die an der Entwicklung von Holzgasreaktoren arbeiten. Neben dem Projektpartner Spanner Re² GmbH waren darunter:

- Burkhardt GmbH
- LiPRO Energy GmbH & Co. KG
- Holzenergie Wegscheid GmbH

Später auch:

- BtX energy GmbH
- ReGaWatt GmbH
- Entreco GmbH

Bis auf Holzenergie Wegscheid GmbH haben sich die Akteure bereit erklärt am Begleitkreis teilzunehmen. Die Entreco GmbH war beim zweiten Treffen des Industriebegleitkreises vertreten. Kurze Zeit später schlossen sich diese mit Holzenergie Wegscheid GmbH zur BioEnergie Wegscheid GmbH zusammen. Beim dritten Treffen nahm dann kein Vertreter der BioEnergie Wegscheid GmbH mehr am Industriebegleitkreis des Projektes teil.

Das erste Begleitkreistreffen wurde im Frühjahr 2022 angesetzt. Der späte Termin ergab sich aus der Projektverzögerung infolge der pandemischen Lage.

Beim dritten Industriebegleitkreistreffen bzw. dem Abschlussstreffen waren die Firmen Burkhardt GmbH, LiPRO Energy GmbH & Co. KG, ReGaWatt GmbH und BtX energy GmbH vertreten.

Während des ersten Begleitkreistreffens wurde, nach der Vorstellung von Vorhaben, Projektinhalten und Fortschritten, auch eine kurze Umfrage durchgeführt. Aufgrund der geringen Anzahl von Fragen (fünf) und der überschaubaren Teilnehmeranzahl (fünf) wurde das Ergebnis noch direkt im Begleitkreistreffen diskutiert. Aus der Umfrage ließ sich jedoch ein hohes Interesse der Unternehmen an Simulationen ihres Prozesses erkennen. Als voraussichtliche Anwendergruppe werden tendenziell Verfahrenstechniker (gegenüber Simulationsingenieuren, Entwicklern/Konstrukteuren oder Anlagenbetreibenden) gesehen, dies wurde u. A. mit fehlenden Kapazitäten begründet. Eine anwenderfreundliche Nutzung und Oberfläche galt allgemein bei den Begleitkreisteilnehmenden als sehr wünschenswert. Diese Rückmeldungen wurden soweit möglich bei der Erstellung der Toolbox von der HSH berücksichtigt.

2.2.12 AP 3.1 Vorplanung / Abstimmungen / Anlagenanpassungen für Versuche AP 3.2

Im Firmensitz der Spanner Re² in Neufahrn wurde die Testanlage aufgebaut. Diese Testanlage entspricht dem aktuellen Anlagenmodell mit einer Leistung von 70 kW_{el}. Eine besondere Herausforderung beim Aufbau der Testanlage war es, in dem Reformer eine Messtechnik zur Temperaturüberwachung zu installieren, ohne die Prozess der Holzvergasung zu stören. Weiterhin musste auch den Anforderungen bzgl. Messequipment der eigenen bzw. der externen Projektteilnehmer Rechnung getragen werden.

Die Temperaturverteilung in der Oxidationszone wird maßgeblich durch die Anordnung der Luftpüsen bestimmt. Hier wurden im Vorfeld schon Strömungssimulationen getätigt, um eine theoretische Gleichmäßigkeit zu erhalten. Für die Positionierung der Messlanzen wurde eine Matrix erarbeitet, damit man die unterschiedlichen Zonen in Bezug auf die Düsen und ihren Ausgangsbohrungen messen kann und bei der Auswertung der Temperaturmessungen eine Temperaturfeld im Reformer aufgespannt werden kann.

Abbildung 24 zeigt die geplanten Zugänge für Temperaturmesslanzen. Geplant war es, die Messlanzen im kontinuierlichen Betrieb an unterschiedlichen Stellen einzuführen zu können, um ein feinverteiltes Temperaturprofil gerade auch mit unterschiedlichen Abständen zum Lufteinlass abbilden zu können. Bereits nach den ersten Versuchen hat sich herausgestellt, dass die Lanzen prozessbedingt in der Pyrolysezone schon nach kurzer Zeit nicht mehr aus den Durchführungen entnommen werden konnten, um eine Neupositionierungen vorzunehmen. Für die Versuchsreihen wurde für die drei von oben eingeführten Lanzen deshalb nur eine feste Konfiguration gewählt und betrachtet. Dabei wurde auf einen gleichmäßigen Abstand der Lanzen zu den Luftauslässen geachtet.

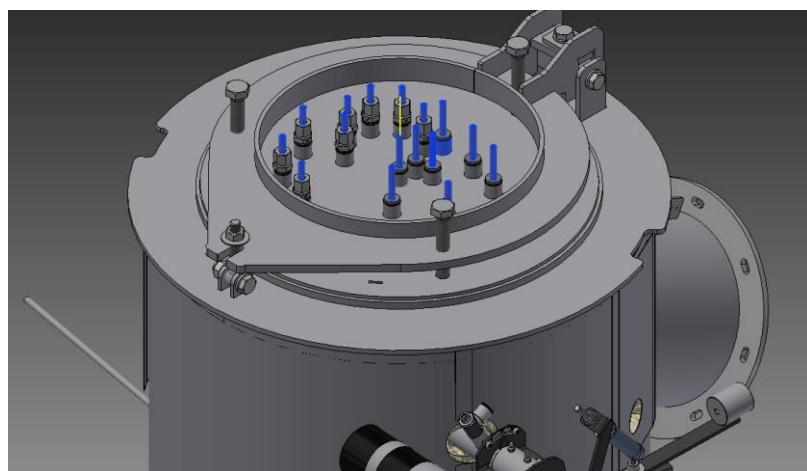


Abbildung 24 Reformer-Deckel mit den installierten Durchgängen für die Temperaturmesslanzen.

Auch unterhalb der Oxidationszone wurde versucht eine Temperaturmessung im Reduktionsbereich des Reformers zu positionieren. Auch hier wurde darauf geachtet, dass die Lanze möglichst die Temperaturen im Gasstrom abbilden. Anlagenbedingt war die Platzierung der unteren Lanze eine Kompromisslösung. Hier konnten nicht die Temperaturen in der Mittelachse aufgezeichnet werden. Die Lanze konnte nur bis zu einer gewissen Tiefe eingeführt werden, um den chemischen Prozess bzw. die Materialtransport im Reformer nicht nachhaltig zu stören. Abbildung 25 zeigt dazu nochmal die Lanzenzugänge.

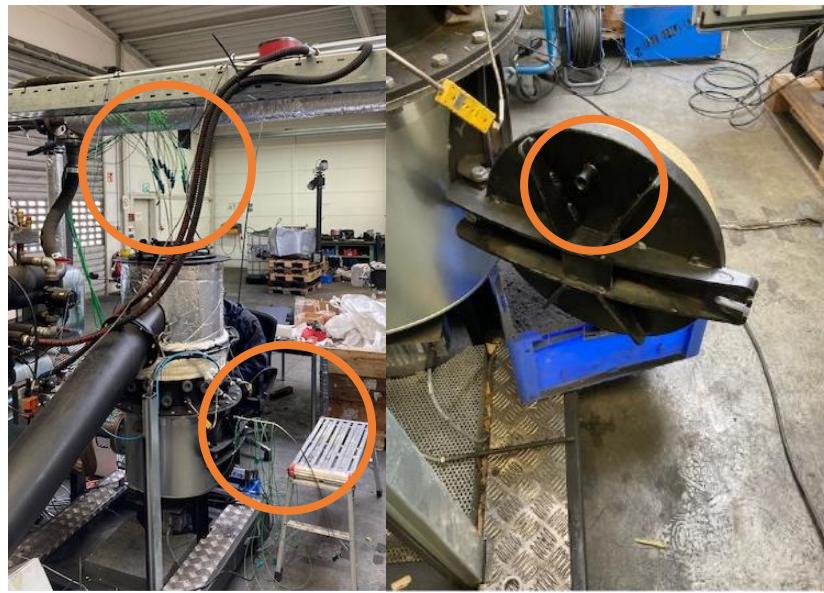


Abbildung 25 Lanzenzugänge am Reformer – Von oben und von der Seite durch den Seitendeckel im Reduktionsbereich unterhalb der Oxidationszone.

Nach Abstimmung zwischen den Projektpartnern wurden die weiteren Messstellen so in die Anlage integriert, dass auch heißes Produktgas entnommen werden konnte, und ohne den Prozess im Anlageninneren zu stören. Ein Ziel war, den Teergehalt des Produktgases möglichst direkt nach dem Reformer bestimmen zu können. Weitere Zugänge wurden für die Probeentnahmen zur Messung der Zusammensetzung des trockenen Produktgases und des Wasserdampfgehaltes im Produktgas, sowie für die Messung der Gasgeschwindigkeit des Produktgases gefertigt, wie in Abbildung 26 veranschaulicht ist.

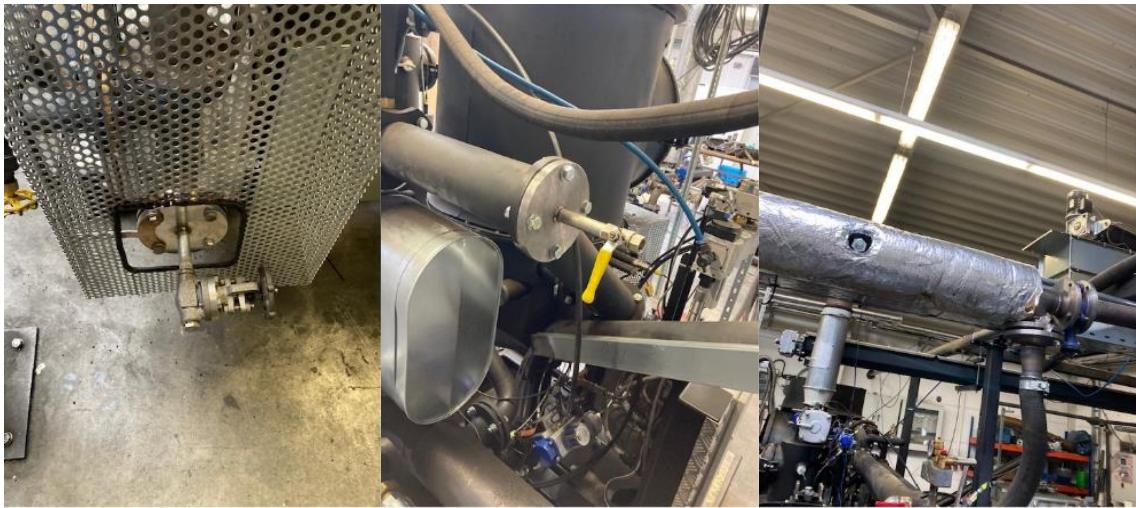


Abbildung 26 Messstellen zur Gasentnahme direkt nach dem Reformer (links), nach der Filtereinheit (mitte) und am Übergang zu BHKW (rechts).

2.2.13 AP 3.2 Validierungsversuche auf Basis der Simulationsvorhersagen: Referenzbrennstoff

Die unter AP 1.4 beschriebenen Messkampagnen waren Teil dieses Arbeitspakets. Mit einer Messkampagne vorab zur Prüfung der Anlagen und der Messstellen und der zweiten Messkampagne zum direkten Brennstoffvergleich bzw. zur Bestimmung von kinetischen Daten zur Modellentwicklung an der HSH.

Nachdem die Modellabgleiche (Massenabnahme und Produktgasentwicklung) in AP 1.3 mit dem Laborreaktor des DBFZ abgeschlossen waren, wurde die zweite Messkampagne koordiniert und entsprechende Vorbereitungen getroffen. Durch die hohen thermischen und mechanischen Belastungen im Reformer wurden die Messstellen verschlissen und mussten daher für die 2. Messkampagne erneuert werden.

Während der zweiten Messkampagne wurde der Brennstoff über einen kontinuierlich gewogenen Brennstoffbunker zugeführt. Dies ermöglichte es auch, eine Bilanzierung des Vergasungsbetriebs der Testanlage vorzunehmen.



Abbildung 27 Brennstoffbunker mit Wiegesystem der zur Bilanzierung genutzt wurde.

Als Parametervariation für den zweiten Messkampagne wurde zusätzlich die Zugabe von Wasser in die Vergasungsluft gewählt, da dies aktuell ein wichtiges Untersuchungsthema der Firma Spanner Re² und das Projekt OpToKNuS hier entsprechend unterstützen konnte.

Kernfragen waren hier, welche Auswirkung es auf den Wasserstoffgehalt im Produktgas hat, bzw. wie sich die Temperatur im Reaktor dadurch ändert. Da dies immer maßgeblich für die Bildung von Schlacke, bzw. den Teergehalt des Holzgases ist.

2.2.14 AP 3.3 Validierungsversuche auf Basis der Simulationsvorhersagen: Testbrennstoff

Aufgrund der Verzögerungen im Projekt und den zum Teil daraus resultierenden Verzug bei der Brennstoffbeschaffung (siehe AP 4.1) konnte dieses Arbeitspaket nicht mehr bearbeitet werden.

2.2.15 AP 3.4 Überwachung von gesetzlichen Regelungen und Wirtschaftlichkeit

Im ersten Projektjahr sind keine nennenswerten Änderungen durch Gesetze oder in der Wirtschaftlichkeit kleintechnischer Vergasungsanlagen aufgetreten. Mit dem Beginn von 2021 wurde jedoch die CO₂-Bepreisung eingeführt. [8] Die damals geplante Preisentwicklung ist in Abbildung 28 dargestellt. Durch diesen politischen Schritt werden fossile Energieträger zunehmend unrentabler gegenüber den Erneuerbaren. Weiterhin trägt eine deutliche Strompreiserhöhung zur Attraktivität von regenerativen Energien und Energieautarkie bei, wie Abbildung 29

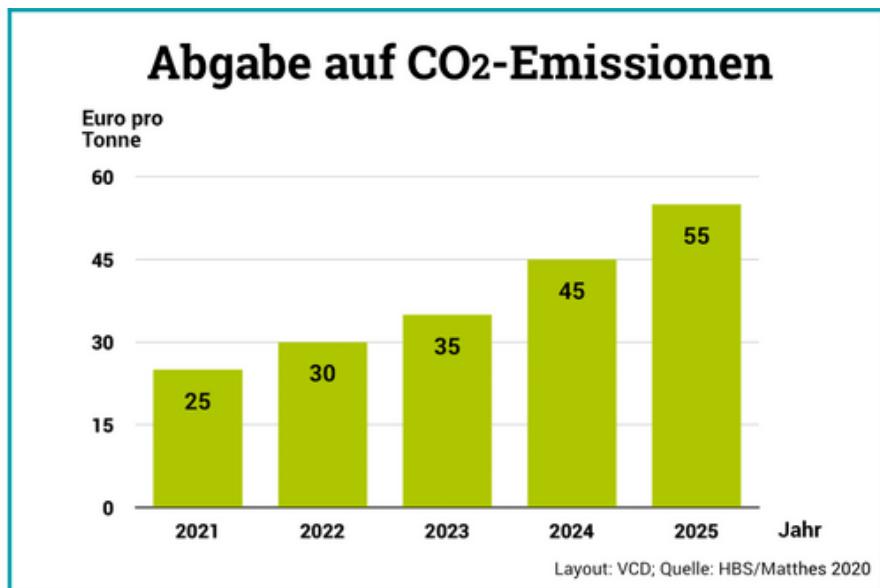


Abbildung 28: Geplante Entwicklung für die CO₂-Abgabe. [9] [10]

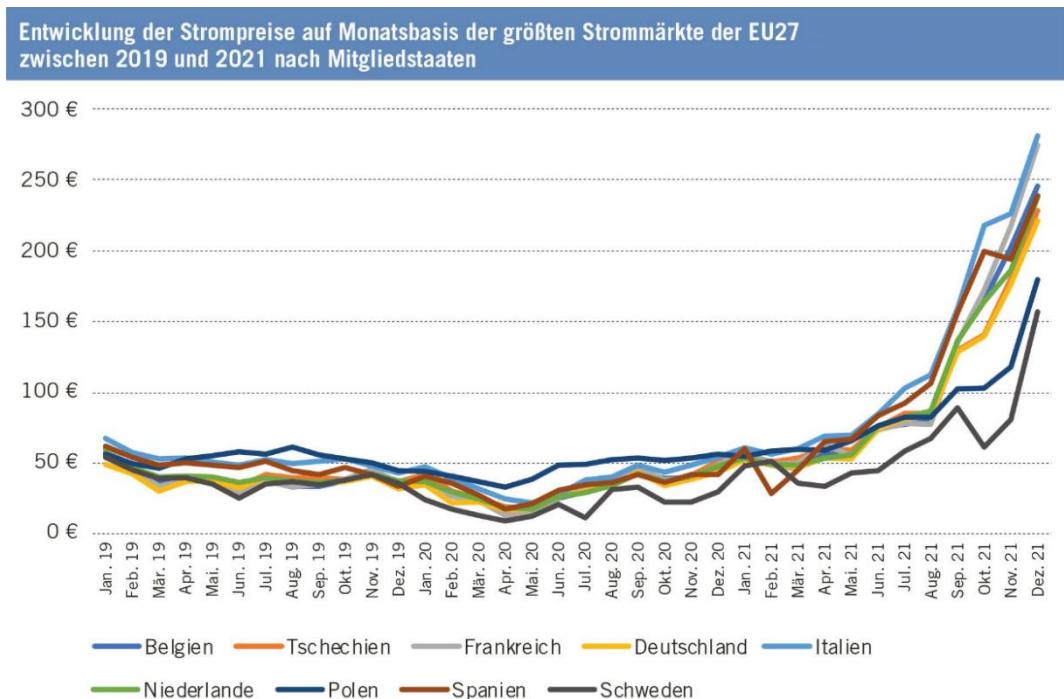


Abbildung 29: Strompreisentwicklung in der EU zwischen 2019 und 2021 [11]

Äußere Umstände wie der Ukrainekrieg und andere weltpolitische Ereignisse, haben eine teilweise drastische Preiserhöhung im Energiebereich erzeugt.

Der Einsatz von Holz ist weiterhin als CO₂ neutral und regenerativ anerkannt. Die EU-Richtlinien zur Nutzung von Holz sehen zwar die Wärmennutzung erst an untergeordneter Stelle vor, jedoch ist sie in die Förderung für effiziente Gebäude aufgenommen worden. Auch sind deutsche Kommunen angewiesen Wärmekonzepte auszuarbeiten. Somit wird nun mehr aktiv nach tragfähigen Wärmekonzepten von Seiten der Behörden bzw. Kommunen gesucht. [12]

Ebenso wurden im Förderprogramm Prozesswärme, als Teil der Bundesförderung „Energie- und Ressourceneffizienz“, KWK-Anlagen als förderfähig aufgenommen. Im gleichen Förderprogramm kann die direkte Holzgasnutzung gefördert werden. Somit kann hier ein direkter Erdgas Ersatz realisiert werden. Das aktuelle Förderprogramm für Wärme und Kältenetze beinhaltet den Einsatz von KWK-Anlagen sogar als Voraussetzung der Förderfähigkeit. [13] [14]

Neben den zuvor genannten Investitionszuschüssen wirkt die Strom Vergütung über Förderprogramme positiv auf den Markt. So bewirkt die Halbierung des Förderzeitraumes für KWK-Anlagen bis 50 kW, bei gleichzeitiger Verdoppelung der Fördersätze, eine höhere Attraktivität durch schnellere Auszahlung der Fördersumme. Das EEG hingegen hat an Attraktivität verloren da die Fördersumme pro kW inzwischen nicht mehr hoch genug und auch nicht von der Inflation bereinigt ist. Anlagen ab 150 kW elektrisch müssen, mit hohem bürokratischem Aufwand, an der komplexen Ausschreibung für Biomasse Stromerzeugung teilnehmen. [15]

Als Nebenschauplatz hat die zunehmende Flexibilisierung von Biogasanlagen einen positiven Effekt für den Einsatz von Holzgas-KWK-Anlagen. Da Wärme- und Stromversorgung durchgängig erfolgen muss, die Biogas BHKW aber nur wenige Stunden am Tag in Betrieb sind, können kleine Holzgas BHKW diese Lücke schließen.

Im übergeordneten Zusammenhang hat auch die CO₂-Steuer Einfluss auf die Rentabilität. Die schrittweise Erhöhung wirkt sich wie gewünscht zu Lasten fossiler und in Richtung regenerativer Energie aus. Es ist schwierig derzeit aus den unterschiedlichen nationalen Gesetzänderungen, sowie die Entwicklungen, welche auch durch weltpolitische Situationen beeinflusst werden, ein Produkt entsprechend optimal auszulegen. Maßgeblich wird sein, die Anlagentechnik möglichst flexibel, den veränderbaren Markt in unterschiedlichen Leistungen, sowie KWK wie auch Gasdirektnutzung schnell anpassen zu können.

2.2.16 AP 3.5 Parallelversuch (kleine Messkampagne) an Anlage Hochschule Zittau/Görlitz (Unterauftrag)

Mit den Ausführungen zu AP 3.3 und den zeitlichen Engpässen sowie den Verzögerungen in der Brennstoffbeschaffung wurde diese geplante Messkampagne nicht beauftragt. Der Fokus wurde stattdessen auf die zweite Messkampagne in AP 3.2 gelegt, sowie die Praxiserfahrung aus dem Feld der Fa. Spanner Re² mit unterschiedlichen Brennstoffen in die Simulationsmodelle eingebracht.

2.2.17 AP 3.6 Projektorganisation (Berichte, Treffen, etc.)

Mit Verweis auf die Vorbereitung und Teilnahme der Projekttreffen aus AP 1.6 sowie die Zuarbeit für Berichte wurde dieses AP erfüllt.

2.2.18 AP 4.1 Abstimmung und Beschaffung Referenz- und Testbrennstoff

Die Brennstoffbeschaffung wurde durch das DBFZ realisiert. Zu Projektbeginn gab es Abstimmungen zwischen den Projektpartnern welche Referenz- und Testbrennstoffe im Projekt eingesetzte werden sollten. Mit zeitlichem Verzug wurden Präzisionshackschnitzel (M7 P12 P16 und M14 P12 P16) vom DBFZ für erste Untersuchungen an der TGA in Hof und dem Festbett-Laborvergaser am DBFZ zur Verfügung gestellt. Dabei hat das DBFZ die Teilung in repräsentative Probenmengen für alle Projektpartner übernommen. Den Brennstoff für die 1. Orientierungsmesskampagne bei der Firma Spanner Re² hat die Firma Spanner selbst zur Verfügung gestellt. Dabei wurde ein Standardbrennstoff (getrocknete Holzhackschnitzel Weichholz G30) aus Sicht von Spanner Re² bereitgestellt. Nachfolgend wurde eine großtechnische Menge (ca. 4 t) an rindenarmen, getrockneten und möglichst gleichmäßigen Hackschnitzeln beschafft und dem Projektpartner Spanner Re² zur Durchführung der 2. Messkampagne zur Verfügung gestellt. Nach Abschluss der 2. Messkampagne wurde eine ausreichende repräsentative Menge dieses Referenzbrennstoff vom DBFZ mitgenommen und anschließend mit einem Riffelteiler repräsentativ in die notwendigen Versuchsmengen geteilt und der Hochschule Hof für die Kinetikmessungen an deren TGA zur Verfügung gestellt. Das DBFZ hat von diesem Referenzbrennstoff ebenso Proben zur Durchführung der Kinetikversuche behalten. Parallel zur Beschaffung der großtechnischen Menge Referenzbrennstoff hat das DBFZ nach erneuter Abstimmung mit dem Projektkoordinator die Testbrennstoffe Strohpellets und Buchenhackschnitzel (Reststoff der Furnierherstellung) beschafft. Die Firma Spanner Re² hat dabei für die Beschaffung der Buchenhackschnitzel den Erstkontakt mit einem Anlagenkunden hergestellt. Auch die Teilung der beiden Referenzbrennstoffe für die Kinetikuntersuchungen an der TGA der HSH und dem Festbett-Laborvergaser hat das DBFZ übernommen. Die repräsentativ geteilten Proben wurden dann der Hochschule Hof zur Verfügung gestellt. Aufgrund der verspäteten Beschaffung der Brennstoffe konnte eine 3. Messkampagne mit den Testbrennstoffen bei der Firma Spanner Re² nicht mehr erfolgen.

2.2.19 AP 4.2 Laboranalysen

Die jeweiligen Referenz- (Präzisionshackgut und Spanner Re²-Brennstoff) und Testbrennstoffe (Strohpellets und Buchenhackschnitzel) wurden im DBFZ-Analytiklabor untersucht. Dabei wurden Teile der mit Riffelteiler erstellten Brennstoffproben genutzt, um vergleichbare und repräsentative Ergebnisse zu erzielen. Die jeweiligen Analyseberichte sind dem Anhang E zu entnehmen. Zusammenfassend unterscheiden sich die Referenzbrennstoffe Präzisionshackgut und Spanner Re²-Brennstoff aufgrund ihrer Gemeinsamkeit Weichholzhackschnitzel kaum. Im Vergleich dazu sind wesentliche Unterschiede zwischen dem Weichholzhackgut (Referenzbrennstoffe) und den Strohpellet bzw. Buchenhackgut (beides Testbrennstoffe) zu sehen.

2.2.20 AP 4.3 Abstimmung statistische Versuchsplanung

Um gesicherte Ergebnisse aus den im Projekt geplanten Versuchen zu erhalten und daraus ggf. sichtbare Trends von Parametern klar benennen zu können, wurde im Projekt die Methode der statistischen Versuchsplanung mit dem Programm „Design of Expert“ (DoE) angewendet. Die für das AP 1.7 notwendigen Versuchspläne zur Durchführung der TGA-Versuche wurden vom DBFZ mit DoE für die Parameter der Hochschule Hof aufgestellt. Somit ergaben sich für die Vergasungsuntersuchungen mit unterschiedlichen Vergasungsmitteln (Kohlendioxid, Sauerstoff, Wasserdampf) an der TGA die folgenden Versuchspläne (siehe für die Parameter Betriebstemperatur und Vergasungsmittelmenge:

- Vergasung mit 400 – 480 °C und 5 – 20 Vol.-% Sauerstoff in Stickstoff als Vergasungsmittel
- Vergasung mit 750 – 950 °C und 5 – 20 Vol.-% Wasserdampf in Stickstoff als Vergasungsmittel
- Vergasung mit 750 – 950 °C und 5 – 20 Vol.-% Kohlendioxid in Stickstoff als Vergasungsmittel

Std	Run	Factor 1		Factor 2		Response 1		Std	Run	Factor 1		Factor 2		Response 1	
		A:Temperatur °C	B:Konzentration O ₂ Vol.-%	A:Temperatur °C	B:Konzentration H ₂ O Vol.-%	Gewichtsabnahme g	Hgewichtsabnahme g			A:Temperatur °C	B:Konzentration CO ₂ Vol.-%	Gewichtsabnahme g	Hgewichtsabnahme g		
11	1	440		12,5				1	1	750		5		5	12,5
7	2	440		5				8	2	850		20		10	2
2	3	480		5				7	3	850		5		4	3
9	4	440		12,5				5	4	750		12,5		1	4
8	5	440		20				2	5	950		5		7	5
6	6	480		12,5				10	6	850		12,5		2	6
3	7	400		20				3	7	750		20		11	7
10	8	440		12,5				12	8	850		12,5		6	8
4	9	480		20				11	9	850		12,5		12	9
5	10	400		12,5				9	10	850		12,5		3	10
12	11	440		12,5				13	11	850		12,5		13	11
13	12	440		12,5				6	12	950		12,5		8	12
1	13	400		5				4	13	950		20		9	13

Abbildung 30 DoE-Versuchspläne für die TGA-Versuche mit Sauerstoff, Wasserdampf und Kohlendioxid an der Hochschule Hof

Das Ergebnis bei allen drei untersuchten Vergasungsmitteln war jeweils die spezifische Gewichtsabnahme während der Versuchsdauer bzw. Reaktion in der TGA. Die Versuche sind entsprechend der Reihenfolge des DoE-Versuchsplans durchzuführen, um die statistischen Randbedingungen zur weiteren Auswertung im Programm DoE einzuhalten.

Für die Modellentwicklung beim Projektpartner Hochschule Hof ist der Arrhenius-Plot mit dem Parameter Aktivierungsenergie die wesentliche Grundlage. In der festen Auswertestruktur des Programms DoE konnte dieser nicht hinterlegt werden, so dass eine vollständige Auswertung der Versuchsdaten der Hochschule Hof mit der TGA nicht möglich war. Die Nutzung der mit

DoE ausgewerteten Daten zur Modellbildung war somit aufgrund der bisherigen Modellgrundlagen nicht möglich, da der Arrhenius-Plot hierfür die Basis ist.

Wie in Abschnitt 2.2.7 musste die Betriebstemperatur im Verlaufe der Messreihen aufgrund der erzielten Ergebnisse noch einmal angepasst werden. Damit mussten alle Versuchsreihen der TGA noch einmal wiederholt werden, um eine vergleichbare Basis zu haben und für die Modelbildung genutzt werden zu können. Die Durchführung dieser neuen Versuchsreihen mit einen vollfaktorierten Versuchsplan war aus Zeit- und Kostengründen im Projektverlauf nicht mehr möglich. Daher wurde im weiteren Verlauf der TGA-Versuche ein teilstatischer Versuchsplan angewendet.

2.2.21 AP 4.4 Kinetikversuche Referenzbrennstoff

Mit dem Festbett-Laborvergaser wurden am DBFZ Versuche zur Charakterisierung der Pyrolyse und CO₂-Vergasung mit dem Ziel kinetische Daten zur Simulationsmodellweiterentwicklung und -validierung beim Projektpartner Hochschule Hof bereitzustellen. Im Laufe der ersten Versuche mit dem Referenzbrennstoff wurde festgestellt, dass die bisherige Vorgehensweise bzw. Methode der Versuchsdurchführung nicht ausreichend genau war, um Versuchsdaten in akzeptabler Qualität bereitzustellen zu können. Daher wurde nach den ersten Versuchen die Versuchsdurchführung geändert bzw. verbessert. Durch den Einsatz eines geeigneten Staubsaugers, um den nach der Reaktion im Reaktor verbliebenen Koks so aus dem Reaktor zu entfernen, dass anschließend eine genaue gravimetrische Analyse im mg-Bereich möglich ist, konnte eine Steigerung der Messwertqualität erreicht werden.

Daraufhin wurden die Versuche am Festbett-Laborvergaser für die einzelnen Brennstoffe (Referenz- und Testbrennstoffe) sowohl für die Pyrolyse als auch die Vergasung mit CO₂ immer mit der gleichen Methode durchgeführt:

- Einwaage des Ausgangsmaterials (Brennstoff oder Pyrolysekoks)
- Befüllen des leeren Reaktors bzw. des Reaktorkorbs mit dem Ausgangsmaterial
- Verschließen des Reaktors
- Durchführung des Druck- bzw. Leckage-Tests mit 8 bar Stickstoff
- Aufheizen der Anlage mit dem Reaktor im Bypass auf die jeweilige Betriebstemperatur mit Stickstoff
- Nach Erreichen der Betriebstemperatur wird auf den kalten Reaktor umgeschaltet:
 - Pyrolyse: Stickstoff bleibt weiterhin „Reaktionsgas“ und mit der Regelung der Reaktorheizung wird die Heizrate eingestellt (ca. 12 K/min)
 - CO₂-Vergasung: Der Reaktor wird mit Stickstoff auf die Betriebstemperatur gebracht und dann wird von Stickstoff auf ein Stickstoff-CO₂-Gemisch als Reaktionsgas umgestellt
- Nach der festgelegten Reaktionszeit wird der Versuch unterbrochen:
 - Pyrolyse: bis im Produktgas kein Wasserstoff mehr messbar ist (< 1 Vol.-%)
 - CO₂-Vergasung: nach 90 Minuten Reaktionszeit nach Umschalten auf das Stickstoff-CO₂-Gasgemisch
- Abkühlen der Anlage mit Stickstoff auf < 30 °C
- Öffnen des abgekühlten Reaktors
- Aussaugen des im Reaktor verbliebenen Materials (Pyrolysekoks bzw. Vergasungskoks)
- Wiegen des abgesaugten Materials

Der hier dargestellten Versuchsablauf braucht in der Vorbereitung der Anlage (Einwaage, Reaktor befüllen und Drucktest) ca. 3-4 h, für den Anlagenbetrieb (Aufheizen, Reaktion und Abkühlen) ca. 12 – 20 h und die Nachbereitung (Anlage öffnen, Reaktor entleeren, Auswiegen) ca. 2 – 3 h.

Die wichtigsten Messgrößen je Versuch waren dabei jeweils:

- Masse und Schütthöhe des Einsatzstoffes
- Masse und Schütthöhe des im Reaktor verbleibenden Kokses
- Messwerte der eingesetzten Massendurchflussregler für Stickstoff und Kohlendioxid
- Temperaturfeld im Reaktor (15 Thermoelemente horizontal und vertikal verteilt)
- Gaszusammensetzung des Eduktgases des Reaktors mit µGC gemessen

- Gaszusammensetzung des Produktgases des Reaktors mit µGC gemessen
- Produktgasmenge des Reaktors nach Abkühlung und Kondensation mittels Balgengaszähler gemessen

Bei den Versuchen mit den Referenz- und Testbrennstoffen wurden die folgenden (siehe Tabelle 12) mit dem Projektkoordinator Hochschule Hof abgestimmten Betriebstemperaturen und Reaktionsgase eingestellt:

Tabelle 12: Betriebsparameter des Festbettlaborvergasers des DBFZ zur Untersuchung der Test- und Referenzbrennstoffe durch Pyrolyse und CO₂-Vergasung

Reaktion	Reaktorsoll-temperatur	Reaktionsgas		Bemerkung
		Stick-stoff	Kohlen-dioxid	
Pyrolyse	500 °C	400 L/h	-	Erste Versuche zur Pyrolysecharakterisierung, jedoch Pyrolyse für die nachfolgende Vergasung nicht vollständig
Pyrolyse	850 °C	400 L/h	-	Erhöhung der Temperatur. Durch das Temperaturprofil im Reaktor, aber immer noch Pyrolysereaktionen bei der nachfolgenden Vergasungsreaktion bei 800 °C
Pyrolyse	850/900 °C	400 L/h	-	Weitere Erhöhung der Temperatur, damit im kompletten Reaktorbett sicher 850°C überschritten werden und somit eine vollständige Pyrolysereaktion zu erreichen.
CO ₂ -Vergasung	800 °C	905 L/h	95 L/h	-

Die Zusammensetzung und Menge des Reaktionsgases für die CO₂-Vergasung wurde dabei bewusst so gewählt, um die Reaktion messtechnisch bestmöglich erfassen zu können.

Die Menge der Referenz- und Testbrennstoffe wurde bei den Pyrolyseversuchen für die maximale Reaktorfüllmenge des Festbett-Laborvergasers festgelegt, um eine maximale Pyrolysekoksmenge für die darauffolgenden Vergasungsversuche mit CO₂ bereitzustellen zu können. Dabei sollten keine Mischkoksmengen erzeugt werden, sondern je Pyrolyseversuch auch der Vergasungsversuch mit CO₂ durchgeführt werden, um Quereinflüsse verschiedener Pyrolysebedingungen zu vermeiden und somit möglichst genau und repräsentative Versuchsergebnisse zu erzielen. Um für die Versuche repräsentativen Brennstoff einsetzen zu können, wurde für die Referenz- und Testbrennstoffe in einer Voruntersuchung die Brennstoffmenge einer vollständigen Reaktorfüllung des Festbettlaborvergasers bestimmt (siehe Tabelle 13),

Tabelle 13: Übersicht der Brennstoffmengen einer vollen Reaktorfüllung des Festbettlaborvergasers

Brennstoffart		Menge für volle Reaktorfüllung
Referenzbrennstoff	Präzisionshackgut P12 - P16 (Fichte)	ca. 480 g
Referenzbrennstoff	Spannerbrennstoff G30 (Weichholz)	ca. 550 g
Testbrennstoff	Strohpellets 6 mm	ca. 1.100 g
Testbrennstoff	Hackschnitzel Buche (Reststoff Furnierherstellung)	ca. 980 g

da sich die Stückigkeit und damit auch die Schüttdichte der Brennstoffe unterscheiden. Basierend darauf wurde die großen Mengen der Referenz- und Testbrennstoffe mittels Riffelteiler gleichmäßig in die jeweiligen Reaktorfüllmengen geteilt.

Bei den durchgeführten Versuchen zur Charakterisierung der Pyrolyse und Vergasung mit CO₂ wurde jeweils die Massenbilanz je Versuch auf messtechnischer Basis erfasst. Für die Kondensate (Teere und Wasser) der Pyrolysereaktion ist dies nicht gelungen, hier wurde zur Schließung der Massenbilanz die berechnete Differenz genutzt. Bei den Versuchen zur CO₂-Vergasung konnte die Massenbilanz messtechnisch komplett geschlossen werden. Die repräsentativen und vergleichbaren Ergebnisse der durchgeführten Versuche sind in Tabelle 14 und Tabelle 15 für die Referenzbrennstoffe und in Tabelle 17 und Tabelle 18 für die Testbrennstoffe dargestellt. Um die verschiedenen Versuche mit den verschiedenen Materialmengen zu Reaktionsbeginn (Brennstoff bzw. Pyrolysekoks) vergleichen zu können, wurde die Massen der gebildeten Gase und des im Reaktor verbleibenden Feststoffs auf die Masse des Einsatzstoffes bezogen. Somit wird ersichtlich zu welchen Anteilen (in den Tabellen grau dargestellt) in % der Einsatzstoff umgesetzt wird. Grundlage für die Berechnung der entstehenden Gasmasse der jeweils durchgeführten Versuche war eine umfangreiche und genaue Analyse des Produktgases mit Blick auf die anteilige Zusammensetzung in Vol.-% und Gesamtmenge in Liter. Mit den Messwerten der Massendurchflusregler zur Einstellung der Reaktionsgase insbesondere des Stickstoffs, kann die Gesamtproduktgasmenge parallel zur messtechnischen Erfassung auch berechnet werden. Neben den Daten der jeweiligen Versuchsmassenbilanzen wurden die Reaktorschüttdichten und die Abnahme der Schütthöhe über die jeweiligen Versuche ebenso dokumentiert.

Tabelle 14: Versuchsdaten Festbett-Laborvergaser Pyrolyse Referenzbrennstoff

BR-Versuchsnr	Massenbilanz											
	Input		Output									
	Brennstoff im Rektor		Koks im Rektor		Gas (trocken, i.N.)		Kondensate gesamt		Wasser im Gas	Teer/Öl im Gas		
Referenzbrennstoff (Präzisionshackschnitzel M7 P12 P16; Fichte)												
Masse	Schüttdichte	Masse	Schüttdichte	Volumen	Masse	berechnet	berechnet	berechnet	berechnet	berechnet		
470,3 g	- kg/m ³	120,7 g	25,7%	- kg/m ³	578 L	71,5 g	15,2%	278,0 g	59,1%	174,0 g	37%	
490,1 g	- kg/m ³	126,6 g	25,8%	- kg/m ³	581 L	74,5 g	15,2%	289,1 g	59,0%	181,3 g	37%	
458,8 g	- kg/m ³	118,3 g	25,8%	- kg/m ³	259 L	65,9 g	14,4%	274,6 g	59,9%	168,0 g	37%	
480,5 g	- kg/m ³	124,2 g	25,8%	- kg/m ³	435 L	65,2 g	13,6%	291,1 g	60,6%	178,8 g	37%	
485,6 g	- kg/m ³	127,5 g	26,3%	- kg/m ³	309 L	70,2 g	14,4%	288,0 g	59,3%	177,9 g	37%	
490,2 g	- kg/m ³	122,6 g	25,0%	- kg/m ³	672 L	71,3 g	14,5%	296,3 g	60,4%	180,8 g	37%	
476,9 g	- kg/m ³	124,7 g	26,1%	- kg/m ³	353 L	67,4 g	14,1%	284,8 g	59,7%	176,2 g	37%	
463,9 g	- kg/m ³	124,6 g	26,9%	- kg/m ³	667 L	69,4 g	15,0%	269,9 g	58,2%	168,2 g	36%	
Referenzbrennstoff (Präzisionshackschnitzel M14 P12 P16; Fichte)												
481,3 g	- kg/m ³	105,4 g	21,9%	- kg/m ³	1510 L	93,6 g	19,4%	282,3 g	58,6%	169,0 g	35%	
463,5 g	- kg/m ³	101,2 g	21,8%	- kg/m ³	1511 L	89,8 g	19,4%	272,6 g	58,8%	162,9 g	35%	
461,1 g	- kg/m ³	101,3 g	22,0%	- kg/m ³	1530 L	93,0 g	20,2%	266,8 g	57,9%	160,4 g	35%	
475,2 g	- kg/m ³	104,6 g	22,0%	- kg/m ³	1527 L	98,3 g	20,7%	272,3 g	57,3%	163,3 g	34%	
481,2 g	- kg/m ³	101,6 g	21,1%	- kg/m ³	1990 L	88,0 g	18,3%	291,6 g	60,6%	174,4 g	36%	
470,1 g	- kg/m ³	101,9 g	21,7%	- kg/m ³	1866 L	84,0 g	17,9%	284,2 g	60,5%	170,9 g	36%	
466,7 g	- kg/m ³	98,1 g	21,0%	- kg/m ³	1764 L	84,1 g	18,0%	284,5 g	61,0%	169,2 g	36%	
463,3 g	- kg/m ³	101,4 g	21,9%	- kg/m ³	1779 L	85,0 g	18,3%	276,9 g	59,8%	166,4 g	36%	
Referenzbrennstoff (Spanner Re ² Brennstoff)												
514,92 g	- kg/m ³	114,2 g	22,2%	- kg/m ³	1797 L	117,3 g	22,8%	283,5 g	55%	167,6 g	33%	
501,84 g	128,8 kg/m ³	125,0 g	24,9%	60,1 kg/m ³	1821 L	136,8 g	27,3%	240,0 g	48%	148,5 g	30%	
559,34 g	137,4 kg/m ³	123,7 g	22,1%	59,5 kg/m ³	1713 L	- g	-	414,6 g	74%	252,4 g	45%	
559,11 g	135,9 kg/m ³	126,2 g	22,6%	58,3 kg/m ³	1774 L	130,3 g	23,3%	302,6 g	54,1%	177,9 #	32%	
545,62 g	140,0 kg/m ³	127,6 g	23,4%	n.b. kg/m ³	1770 L	121,5 g	22,3%	296,5 g	54,3%	177,8 g	33%	
											118,7 g	22%

Trotz der ähnlichen chemischen Zusammensetzung und Partikelgrößen der beiden Fichte-Referenzbrennstoffe ist durchaus ein Unterschied in der Aufteilung des Brennstoffs in seine Reaktionsprodukte bei der Pyrolyse feststellbar. So entstehen aus dem Präzisionshackgut M7 P12 P16 im Mittel 14,6 % (13,6 – 15,2 %) der Einsatzmasse Pyrolysegas und aus dem

Präzisionshackgut M14 P12 P16 19,0 % (17,9 – 20,7 %). Beim im Reaktor verbleibenden Pyrolysekoks ist die Tendenz genau andersherum. Hier verbleiben vom Präzisionshackgut M7 P12 P16 25,9 % (25,0 – 26,9 %) der Einsatzmasse als Pyrolysekoks und aus dem Präzisionshackgut M14 P12 P16 nur 21,7 % (21,0 – 22,0 %). Dies zeigt, dass ähnliche Brennstoffe doch jeweils etwas anders reagieren und eine einfache Brennstoffanalyse nicht ausreichend ist, um deren Reaktionsverhalten mittels Simulationsmodell voraussagen zu können. Der Referenzbrennstoff (Spanner Re²), der auch zur Messkampagne an der Spanner Anlage eingesetzt wurde, bildet bei den Versuchsbedingungen im Festbett-Laborvergaser das meiste Pyrolysegas mit 22,8 % (22,3 – 23,3 %) der Brennstoffmasse und hinterlässt im Reaktor 23,0 % (22,6 - 23,4 %) Pyrolysekoks. Teere und Kondenswasser des Produktgases konnten nicht so kompakt an einer Stelle im Festbett-Laborvergaser gesammelt werden, dass eine gravimetrische Bestimmung ihrer Massen möglich war. Den Reaktoraufbaus dafür zu ändern wäre nicht ohne erheblichen Aufwand möglich gewesen, da es sich um eine nach Druckgeräterichtlinie behördlich überwachte Anlage handelt. Im Projektverlauf wurde hier eine messtechnische Lösung durch Wiegen bestimmter Anlagenteile gefunden. Diese Methode konnte bisher jedoch noch nicht vollständig auf ihre Genauigkeit hin geprüft werden. Anhand der Annahme: „Sauerstoff aus dem Brennstoff, der nicht im trockenen Produktgas gemessen wird, reagiert vollständig zu Wasser, dass kondensiert!“ kann mit der Brennstoffzusammensetzung eine theoretischen Kondenswassermenge bzw. -masse und dann per Differenzrechnung eine Teermasse berechnet werden. Diese Massen (absolut Werte der Reaktormassenbilanz) sind in den Tabelle 14 und Tabelle 17 entsprechend dargestellt.

Tabelle 15: Versuchsdaten Festbett-Laborvergaser CO₂-Vergasung Referenzbrennstoff

BR-Versuchsnummer	Koks aus Versuch	Masstabilanzen							
		Input		Output					
		Koks im Reaktor Masse	Vergasungs- mittel (CO ₂)	Koks im Reaktor Masse	Pyrolysegas (tr., i.N.) bis 800°C	Gas CO ₂ -Vergasung (tr., i.N.) 850°C	Kondensat	Differenz: Out-In	
Referenzbrennstoff (Präzisionshackgut M7 P12 P16; Fichte)									
2021-00215	2021-00213	123,1 g	445,5 g	60,2 g 49%	28,6 g	512,8 g	0,0 g	32,9 g	6%
2021-00217	2021-00210	125,6 g	445,5 g	67,1 g 53%	23,1 g	512,8 g	0,0 g	31,9 g	6%
Referenzbrennstoff (Präzisionshackgut M14 P12 P16; Fichte)									
2022-00047	2022-00041	102,6 g	431,2 g	66,4 g 65%	0,0 g	463,2 g	0,0 g	-4,3 g	-0,8%
2022-00048	2022-00040	99,4 g	419,1 g	67,2 g 68%	0,0 g	446,1 g	0,0 g	-5,2 g	-1,0%
2022-00058	2022-00057	101,1 g	428,8 g	72,0 g 71,2%	0,0 g	457,9 g	0,0 g	0,0 g	0,0%
2022-00126	2022-00065	99,0 g	446,1 g	70,9 g 71,6%	0,0 g	471,9 g	0,0 g	-2,3 g	-0,4%
Referenzbrennstoff (Spanner Re² Brennstoff, Holzhackschnitzel)									
2023-00079	2023-00072	129,3 g	646,3 g	94,8 g 73,3%	0,0 g	679,8 g	0,0 g	-1,0 g	-0,13%
2023-00102	2023-00069	128,2 g	715,8 g	93,4 g 72,8%	0,0 g	758,0 g	0,0 g	7,4 g	0,87%

Beim Präzisionshackgut M7 P12 P16 ist zu erkennen, dass die Pyrolysebedingungen in vorherigen Versuch noch nicht vollständig sind, da bei der Aufheizung des Pyrolysekoksbettes unter Stickstoff noch Pyrolysegas entsteht. (siehe Tabelle 12). Damit sind diese Ergebnisse nicht vergleichbar mit denen der anderen Referenzbrennstoffe. Bei den beiden Referenzbrennstoffen M14 P12 P16 und Spanner Re² waren die jeweiligen Pyrolyseversuche vollständig, so dass bei der Pyrolysekoksbett-Aufheizung vor der Zugabe des Kohlendioxids kein Pyrolysegas entstanden ist. Dies wurde immer messtechnische während der kompletten Aufheizphase mittels µGC überprüft. Die verbleibende Vergaserkoksmassen der beiden Referenzbrennstoffe unterscheidet sich mit 68,8 % (64,7 – 71,6 %) für M14 P12 P16 und 73,1 % (72,8 – 73,3 %) für Spanner Re² ebenso wie bereits bei den Pyrolyseversuchen im Vorfeld. Im Laufe der Versuche konnte die messtechnische Genauigkeit der Reaktormassenbilanzen gesteigert werden. Ergaben sich zum Anfang der Versuchsreihen noch Bilanzfehler von 32 g bei einer Inputmassen (Pyrolysekoks und Reaktionsgas) von 568 - 570 g

was bezogen auf die Inputmasse 6 % darstellt, so konnten diese Bilanzfehler sicher in den Bereich 5 g oder weniger geführt werden, was bezogen auf die Inputmasse weniger als 1 % darstellen. Neben der reinen Massenbilanz des Reaktors wurde in der Versuchsauswertung der Vergasung mit Kohlendioxid auch die chemische Reaktion von einem Mol Kohlenstoff (C) mit einem Mol Kohlendioxid (CO_2) zu 2 Mol Kohlenmonoxid (CO) betrachtet. Für den Versuch 2022-00058 stellen sich die Messwerte wie folgt dar:

29,12 g C (Kohlenstoff bzw. Pyrolysekoks) + 93,32 g CO_2 (CO_2 -Zugabe mittels MFC, abzüglich der CO_2 -Menge im Produktgas) reagieren zu 122,33 g CO (CO-Menge aus dem Produktgas)

Diese Reaktionsgleichung ist für die anderen Versuche ebenso mit Messfehlern im mg-Bereich darstellbar, so dass eine genaue Reaktionsbeschreibung mit den Versuchen am Festbett-Laborvergaser möglich ist. Damit wurden die für Meilenstein 2 notwendigen Versuchsdaten (siehe Tabelle 16) zur Einpflege in das Simulationsmodell erfasst und an den Projektkoordinator übergeben.

Tabelle 16 Brennstoffeigenschaften und Messwerte die im Modell genutzt werden.

Gemessener Parameter für das Modell	Beschreibung
Äquivalenter Partikeldurchmesser des Pyrolysekokses (Sauter-Durchmesser)	Händische Messung / statistisch. Zur Definition einer repräsentativen Partikelgröße
Schüttporosität des Pyrolysekokses (Freiraum zwischen den Partikeln)	Diese wird anhand der Schütt- und Partikel dichte des Pyrolysekokses berechnet. Eine Berechnung aus der Schüttdichte des Brennstoffs wäre wünschenswert,
Partikelporosität des Pyrolysekokses (Freiraum in den Partikeln)	Die Partikelporosität wird anhand der Partikeldichte des Pyrolysekokses gegenüber der puren Pyrolysekohlenstoffs (1.850 kg/m^3) ermittelt
Brennstofffeuchte / Wassergehalt	Wasser das mit dem Brennstoff in den Prozess gebracht wird
Gewichtsverteilung der Pyrolyseprodukte	<ul style="list-style-type: none"> - Gas - Wasser - Teer - Koks
Gaszusammensetzung des Pyrolysegases	<ul style="list-style-type: none"> - H_2 - CO - CO_2 - CH_4
Elementaranalyse	Für eine noch genauere Berechnung kann die elementare Zusammensetzung des Pyrolysekokses mit integriert werden. Sie ist jedoch bei Auswertung der Reaktivität zu berücksichtigen. Im Projekt wurde aufgrund verzögter Analysen der Kohleproben die Zusammensetzung der ersten Analyseergebnisse eines Fichtenholzkokses verwendet ($\text{C}_{1.0.41}\text{O}_{0.081}$). Aus der Analyse ergibt sich eine hypothetische molare Masse der Kohle die dann Modell berücksichtigt wird. Die verwendete beträgt $0,01375 \text{ kg/Mol}$.
CO_2 -Vergasung des Kohlebettes	Vergleichsmessung zur Modellannahme durch die ein Korrekturfaktor errechnet werden kann, falls notwendig.
Chemisch limitierte heterogene Reaktionskinetik der Pyrolysekohle gegenüber der Reaktivgase	<ul style="list-style-type: none"> - Reaktionsgeschwindigkeit der Pyrolysekohle mit den Reaktivgasen: - CO_2 - O_2 - H_2O

2.2.22 AP 4.5 Kinetikversuche Testbrennstoff

Analog den Kinetikversuchen mit dem Referenzbrennstoff (siehe Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) wurden die Versuche in diesem Arbeitspaket mit Testbrennstoff Stroh in Pelletform und Buchenackschnitzel (Reststoff der Furnierverarbeitung) durchgeführt.

Tabelle 17: Versuchsdaten Festbett-Laborvergaser Pyrolyse Testbrennstoffe

BR-Versuchsnummer	Masstabanz							
	Input		Output					
	Brennstoff im Reaktor		Koks im Reaktor		Gas (trocken, i.N.)		Kondensate gesamt berechnet	Wasser im Gas berechnet
Brennstoff (Strohpellets)								
2023-00070	1101,7 g	578,3 kg/m³	289,4 g 26,3%	303,8 kg/m³	2923 L	294,2 g 26,7%	518,1 g 47,0%	320,2 g 29%
2023-00071	1114,51 g	612,9 kg/m³	299,6 g 26,9%	314,5 kg/m³	2218 L	293,8 g 26,4%	521,1 g 46,8%	325,4 g 29%
Testbrennstoff (Buchenackschnitzel)								
2023-00074	988,35 g	242,9 kg/m³	235,2 g 23,8%	129,3 kg/m³	2395 L	886,1 g 89,7%	- g	- g
2023-00075	963,26 g	236,7 kg/m³	228,1 g 23,7%	138,6 kg/m³	2308 L	470,3 g 48,8%	264,9 g 27%	125,2 g 13%
								139,65 g 14%

Da sich die Testbrennstoffe wesentlich mehr unterscheiden als die Referenzbrennstoffe, konnte bei der Pyrolyseuntersuchung der beiden Testbrennstoffe auch sehr unterschiedliche Verhalten festgestellt werden. So gehen im Mittel 46,9 % (der Strohbrennstoffmasse in Kondensate (Wasser und Teere) während der Reaktion über. 26,5 % der Strohbrennstoffmasse werden zu Pyrolysegas und 26,6 % verbleiben als Pyrolysekoks im Reaktor. Der Buchentestbrennstoff hingegen reagiert bei der Pyrolyse zu 27,5 % Kondensate (Teere und Wasser), 48,4 % Pyrolysegas und 23,7 % Pyrolysekoks im Reaktor. Der hohe Anteil an Flüchtigen des Strohbrennstoffs kommt im Vergleich zum Buchentestbrennstoff nicht wie erwartet zum Tragen bei der Pyrolysegasbildung, stattdessen verschiebt sich das Produktverhältnis für Stroh zu den kondensierbaren Bestandteilen.

Tabelle 18: Versuchsdaten Festbett-Laborvergaser CO₂-Vergasung Testbrennstoffe

BR-Versuchsnummer	Koks aus Versuch	Masstabanz						
		Input		Output				
		Koks im Reaktor Masse	Vergasungsmittel (CO ₂)	Koks im Reaktor Masse	Pyrolysegas (tr., i.N.) bis 800°C	Gas CO ₂ -Vergasung (tr., i.N.) 850°C	Kondensat	Differenz: Out-In
Testbrennstoff (Strohpellets)								
2023-00103	2023-00070	305,0 g	622,2 g	235,1 g 77,1%	0,0 g	690,2 g	0,0 g	-1,9 g -0,2%
2023-00105	2023-00071	316,1 g	641,5 g	242,1 g 76,6%	0,0 g	719,8 g	0,0 g	4,3 g 0,4%
Testbrennstoff (Buchenackschnitzel)								
2023-00046	2023-00043	206,8 g	599,5 g	133,42 g 64,5%	0,0 g	667,5 g	0,0 g	-5,4 g -0,7%
2023-00055	2023-00050	236,7 g	616,2 g	159,41 g 67,3%	0,0 g	685,2 g	0,0 g	-8,3 g -1,0%

Wie bei der Pyrolyse unterscheiden sich die beiden Testbrennstoffe Strohpellets und Buchenackschnitzel auch bei der Vergasung mit Kohlendioxid. Beim Strohbrennstoff verbleiben nach der Reaktion mit Kohlendioxid im Mittel 76,8 % der ursprünglichen Pyrolysekoksmasse im Reaktor und beim Buchenbrennstoff nach identischer Reaktionszeit 65,9 %. Im Verhältnis zur eingesetzten Pyrolysekoksmasse entsteht auch bei der Reaktion mit CO₂ mehr Gas beim Buche- als beim Strohbrennstoff mit 685 g Produktgas aus 236,7 g Pyrolysekoks bei der Buche und 719,8 g Produktgas aus 316,1 g Pyrolysekoks aus Strohpellets. Da bei beiden Brennstoffen die Pyrolyse vollständig abgelaufen ist und somit bei der Vergasung mit CO₂ nur die Boudouard-Reaktion abgelaufen ist, ist die unterschiedliche Gasmengen durch die Koksreaktivität im Reaktionszeitraum (keine vollständige „Abreaktion“ des Kohlenstoffs mit CO₂, sondern nur 90 min Reaktionszeit) Auch hier konnte, wie bei den Referenzbrennstoffen, eine hohe Genauigkeit bei der Bilanzaufstellung erreicht werden.

2.2.23 AP 4.6 Abstimmung Datenbank

Im Verlauf der Arbeitspakete 4.4 und 4.5 wurden die Daten zur Erstellung der Datenbank für das Simulationsmodell stetig besprochen und abgestimmt, um die richtigen und vollständige Datensätze für die jeweiligen Brennstoffe erarbeiten zu können. Dazu gab es einen regelmäßigen Informationsaustausch zwischen der Hochschule Hof und dem DBFZ. Weitere Ausführungen zur Abstimmung der zum Simulationsmodell gehörenden Datenbank ist im Arbeitspaket 2.1 in Abschnitt 2.2.8 zu finden. Beide Arbeitspakete (4.6 und 2.1) wurden gemeinsam bearbeitet.

2.2.24 AP 4.7 Validierungsversuche an der Laboranlage des DBFZ

Im Verlauf der Kinetikversuche für die Referenz- und Testbrennstoffe zur Charakterisierung der Pyrolyse und Vergasung mit Kohlendioxid, wurden die Validierungsversuche parallel mit durchgeführt, da aufgrund der späten Durchführung der DBFZ-Versuche am Festbett-Laborvergaser parallel am Simulationsmodell in Hof und den Kinetikversuchen am DBFZ gearbeitet wurde. Somit fand in Abstimmung zwischen dem Projektkoordinator der Hochschule Hof und dem DBFZ während der Kinetikversuche in AP 4.4 und AP 4.5 (siehe Abschnitt 2.2.21 und 2.2.22) ein fortlaufender Datenaustausch statt, der trotz der späten DBFZ-Versuche am Festbett-Laborvergaser die Validierung und Weiterentwicklung des Simulationsmodells ermöglichte.

2.2.25 AP 4.8 Projektorganisation (Berichte, Treffen, etc.)

Innerhalb des Projektes gab es entsprechend den Ausführungen im Abschnitt 2.2 AP 1.6 Abstimmungen zwischen den Projektpartnern zu den Themen Arbeitsziel und -ergebnisse, Projekttreffen und Öffentlichkeitsarbeit. Auch die jeweiligen Zuarbeiten, um einzelne Arbeitspakete in der geplanten Reihenfolge durchführen zu können wurden regelmäßig abgestimmt. Dazu gab es die Formate Telefonate bzw. Telefonkonferenzen, Online-Treffen und physische Projekt-/Arbeitstreffen. Auch die Erstellung der jeweiligen Zwischenberichte wurde im Rahmen dieses Arbeitspaketes realisiert.

2.2.26 AP 4.9 Ökologische Bewertung

2.3 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die in Tabelle 19 dargestellten Kosten waren in dieser Höhe notwendig zur Realisierung der zuvor beschriebenen Projektergebnisse.

Tabelle 19 Kostenaufteilung nach Projektpartner und Kostenart

	HSH	DBFZ	SRe
Personalkosten (837)	185.554	247.802	121.198
Materialkosten (813)	4.157	16.800	30.255
Reisekosten (838)	2.493	3.213	613

Das Vorhaben konnte insgesamt bis auf wenige Arbeitspakete bzw. offene Arbeitsinhalte abgeschlossen werden. Verschiebungen in der Zeitplanung konnten mit Hilfe der beantragten kostenneutralen Verlängerung innerhalb der Projektlaufzeit trotzdem nur teilweise aufgearbeitet werden. Die beantragten Mittel wurden sowohl beim DBFZ als auch der HSH nicht vollständig ausgeschöpft. Diese sind den jeweiligen Mittelverwendungsnachweisen zu entnehmen. Verschiebungen innerhalb einzelner Posten wurden mit dem Projektträger abgestimmt. Sowohl beim DBFZ als auch der HSH wurden die Personalmittel aufgrund der unterschätzten Arbeit bei der Methodenentwicklung zur Versuchsdurchführung und der Erarbeitung des verbesserten Simulationsmodells bzw. der lizenzenfreien Toolbox überzogen. Durch Einsparungen bei den Reisekosten und anderen Positionen konnte dies jedoch ausgeglichen werden. Auch dies kann detailliert den jeweiligen Mittelverwendungsnachweisen entnommen werden. Somit wurden die Projektmittel angemessen für die jeweiligen Arbeiten am Simulationsmodell, den praktischen Versuchen an der TGA in Hof und dem Festbett-Laborvergaser des DBFZ sowie bei den beiden Messkampagnen an der marktnahen Testanlage der Firma Spanner Re² in Neufahrn eingesetzt. Mittelverschiebungen wurden stets beim Fördermittelgeber angezeigt bzw. beantragt, so dass auf die jeweiligen äußeren Einflüsse während der Projektlaufzeit bestmöglich reagiert werden konnte, um die gesteckten Projektziele bestmöglich erreichen zu können.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Der voraussichtliche Nutzen des Simulationsmodells besteht derzeit darin das Vergasungsverhalten von Brennstoffen für den DBFZ-Festbett-Laborvergaser und die 70 kW-Spanner Re²-Testanlage besser bzw. genauer beschreiben zu können als Modelle anderer Forschungseinrichtungen. Weiterhin ist das Modell so konzipiert, dass weitere Reaktorgeometrien implementiert werden können. Somit steht dieser Nutzen sowohl für die Firma Spanner Re², dem DBFZ und der Hochschule Hof, sowie den Industriebegleitkreis und allen anderen Modellnutzern zur Verfügung (Toolbox). Die im Projekt erzielten Simulationsergebnisse inkl. der Weiterentwicklung und Optimierung des Simulationsmodels, sowie der Erstellung der dazugehörigen Datenbank sind im Sinne des Verwertungsplans nach Projektende frei zugänglich. Hierfür wird ein Link auf der Projektwebseite der Begleitforschung und des Instituts für Wasserstoff- und Energietechnik bereitstehen. Die Toolbox kann mit Hilfe der bereitgestellten Anleitung genutzt werden. Durch den freien Zugang sowie der Programmiersprache Python können beispielsweise auch andere Forschungsinstitutionen auf das Modell zugreifen, dieses nutzen und ggf. Weiterentwicklungen oder Anpassungen für spezielle Anwendungen durchführen.

Die Ergebnisse der DBFZ-Messungen nutzen dem DBFZ als Basis für Vergasungsuntersuchungen im Projekt KeVergAv, in dem Stroh und Holz mit unterschiedlichen Aufbereitungsgraden untersucht werden sollen. Die in OpToKNuS entwickelte Untersuchungsmethode mit den entsprechenden Reaktormassenbilanzen wird hier aktuell genutzt. Weiterhin bilden die Ergebnisse die Grundlage zur weiteren Untersuchung der Projektbrennstoffe OpToKNuS mit Sauerstoff und Wasserdampf analog den TGA-Versuchen, was nicht mehr im Rahmen des Projekts abgearbeitet werden konnte. Hier wird des DBFZ mit anderen finanziellen Mitteln die noch offene Lücke schließen, wodurch im Zusammenspiel mit dem KeVergAv-Projekt eine DBFZ-interne Datenbank mit den Vergasungsverhalten unterschiedlicher Brennstoffe mit der Untersuchungsmethode Festbett-Laborvergaser entstehen soll/wird. Durch die Veröffentlichungsarbeit im OpToKNuS-Projekt bzw. des DBFZ wird diese Datenbank dann öffentlich zugänglich gemacht. Ebenso ist die in OpToKNuS entstandene Datenbank mit den kinetischen Daten der durchgeführten Versuche mit dem Link zur Tollbox auf der Projektwebseite im Bereich der Begleitforschung und der Hochschule Hof entsprechend dem Verwertungsplan öffentlich verfügbar. Weiterhin wird die schon angesprochene Methode zur messtechnischen Erfassung der Kondensate am Festbett-Laborvergaser des DBFZ bei den weiteren Versuchen mit eingesetzt, geprüft und ggf. weiterentwickelt, um alle Reaktionen am Festbett-Laborvergaser messtechnisch komplett erfassen zu können. Auch dies ist Teil des Verwertungsplans der OpToKNuS-Ergebnisse des DBFZ.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.

Im Bereich der messtechnischen Erfassung von Vergasungsreaktionen im Bereich zwischen Einzelpartikelbetrachtung (TGA-Versuche im Labor) und Orientierungsversuche an Demo- und Marktanlagen sind dem DBFZ keine neuen Erkenntnisse Dritter im Bereich der Festbettvergasung (Festbettuntersuchungen) bekannt geworden.

Während weiterer Recherchen zur genannten Projekt-Veröffentlichung Anfang 2023, konnten seitens der Hochschule Hof weitere Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Simulation von Kohlevergasung ausfindig gemacht werden. Die anhaltend intensive Forschung auf dem Gebiet der Modellierung von Biomassevergasung lässt vermuten, dass zukünftig noch wesentliche Fortschritte in der Modellentwicklung zu erwarten sind. Folgend nur eine Auswahl einiger zwischenzeitlich entstandener Ergebnisse auf dem Gebiet der Vergasungsmodellierung.

Beispielsweise berichten Liang und Singer mit hochauflösten Simulationen und Mikro-Computer-Tomographie zu heterogenen Verbrennungs-Reaktionen an einzelnen Koks-Partikeln. Auch hier wird nach Ansätzen gesucht, die Vergasung von Biomassekoks besser beschreiben zu können. [17]

Nguyen et al. nutzen detaillierte CFD-Modelle für Einzelpartikel, um die Koks-Umwandlungsprozesse während der Konvertierung näher zu untersuchen und zu beschreiben. In künftigen Forschungsaktivitäten ist. [18]

Wu et al. veröffentlichten Forschungsergebnisse zur Vergasung von Kokspartikeln bei Temperaturen 1150 °C bis 1350 °C mit CO₂ und H₂O aus Pappel, Rutenhirse und Maisstroh. Dabei wurde auch die Entwicklung der Porenstruktur während der Vergasungsreaktion näher untersucht. [19]

Im Bereich der CO₂-Vergasung haben Song et al. den Zusammenhang der Reaktivität mit anorganischen Anteilen im Biomassekoks näher betrachtet und signifikante Einflüsse herausgestellt. [20]

Mit neuen Erkenntnissen im Forschungsbereich der thermochemischen Vergasung und Pyrolyse kann auch die Toolbox weiterentwickelt werden, um bessere Ergebnisse zu erzielen. Die Einbindung entsprechender Erkenntnisse erfordert jedoch eingängige Prüfung und Validierung. Darüber hinaus sind aufgrund der Komplexität und des Forschungsumfangs interdisziplinäre Forschungskooperationen weiterhin ratsam bzw. zu empfehlen.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11.

Während des Projektes wurden Zwischenergebnisse und Fortschritte auch in den wissenschaftlichen Diskurs gestellt. Die entstandenen Beiträge sind nachfolgend in Tabelle 20 gelistet.

Tabelle 20 Liste der Aktivitäten zur Öffentlichkeitsarbeit bzw. wissenschaftlichem Diskurs

Jahr	Art	Titel
2020	Vortrag	„Optimierung der thermochemischen Vergasung von Biomasse durch brennstoffspezifische Prozesssimulation“ bei der Biomass to Power and Heat 2020 (Online-Konferenz)
2021	Poster	OpToKNuS – Brennstoffeigenschaften, das Kernelement einer Holzgas-simulation bei der 10. Statuskonferenz Begleitforschung Energetische Biomassenutzung (Online-Konferenz)
2022	Vortrag und Konferenzpaper	Umfangreiche Charakterisierung von biogenen Brennstoffen zur Simulation von Vergasungs- und Verbrennungsprozessen bei der RET.Con2022 in Nordhausen.
2023	Paper	“Extensive Experimental Characterization with Kinetic Data for the Gasification Simulation of Solid Biofuels” als peer reviewed Paper im Journal „MDPI-Energies“
2023	Vortrag	Brennstoffspezifische Simulation thermochemischer Biomassevergasung - Projekt OpToKNuS bei der 12. Statuskonferenz Begleitforschung Energetische Biomassenutzung 2023
2023	Vortrag	Brennstoffspezifische Simulation thermochemischer Biomassevergasung - Projekt OpToKNuS beim 23. Fachkongress Holzenergie 2023
2024	Paper (geplant)	Noch offen

3 Literaturverzeichnis

- [1] A. Gradel, R. Honke, J. A. Wünning, T. Plessing und A. Jess, „Modeling of Biomass Gasification in a Downdraft Gasifier with Integrated Tar Adsorption,“ *Chemical Engineering & Technology*, Bd. 42, Nr. 9, pp. 1895-1906, 2019.
- [2] Fördergesellschaft Erneuerbare Energien e. V., „Holzgas Branchenguide 2020,“ Berlin, 2020.
- [3] M. R. Heinrich, A. Herrmann, A. Gradel, M. Klemm und T. Plessing, „Extensive Experimental Characterization with Kinetic Data for the Gasification Simulation of Solid Biofuels,“ *Energies*, Bd. 16, Nr. 6, p. 2888, 2023.
- [4] M. R. Heinrich, A. Gradel, A. Herrmann, M. Klemm, G. Kuffer und T. Plessing, „Umfangreiche Charakterisierung von biogenen Brennstoffen zur Simulation von Vergasungs- und Verbrennungsprozessen,“ in *Tagungsband 5. Regenerative Energietechnik Konferenz in Nordhausen 10. - 11. Februar 2022*, Nordhausen, 2022.
- [5] M. Kaltschmitt, H. Hartmann und H. Hofbauer, Energie aus Biomasse, Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [6] C. Di Blasi, „Combustion and gasification rates of lignocellulosic chars,“ *Prog. Energy Combust. Sci.*, Bd. 35, Nr. 2, pp. 121-140, 2009.
- [7] C. Schneider, M. Zeller, D. Böhm und T. Kolb, „Influence of pressure on the gasification kinetics of two high-temperature beech wood chars with CO₂, H₂O and its mixture,“ *Fuel*, Bd. 299, 2021.
- [8] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, „Ermäßiger Steuersatz für Gas, weniger Stromkosten,“ [Online]. Available: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/entlastung-fuer-deutschland/entlastung-energieabgaben-2125006#:~:text=Welche%20Entlastung%20ist%20beim%20CO2,auf%2030%20Euro%20pro%20Tonne..> [Zugriff am 01.12.2023].
- [9] VCD Verkehrsclub Deutschland e.V., „Der CO₂-Preis im Verkehr: Keine Lenkungswirkung und sozial unausgewogen,“ 14.12.2020. [Online]. Available: <https://www.vcd.org/artikel/der-co2-preis-im-verkehr-keine-lenkungswirkung-und-sozial-unausgewogen#:~:text=Die%20Abgabe%20beginnt%20in%202021,mehr%20vorgegeben%20wird%205B1%5D..> [Zugriff am 01.12.2023].
- [10] F. C. Matthes, „Der Preis Auf CO₂ - Über ein wichtiges Instrument ambitionierter Klimapolitik,“ Heinrich Böll Stiftung (Ökologie), Berlin, 2020.
- [11] Weltenergierat – Deutschland e.V., „Energie für Deutschland - Fakten, Perspektiven und Positionen im globalen Kontext | 2022,“ 05.2022.
- [12] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, „Bundesförderung für effiziente Gebäude,“ [Online]. Available:

<https://www.energiewechsel.de/KAENEF/Redaktion/DE/Dossier/beg.html>. [Zugriff am 01 12 2023].

- [13] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle , „Modul 2: Prozesswärme aus Erneuerbaren Energien,“ [Online]. Available: https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Energieeffizienz_und_Prozesswaerme/Modul2_Prozesswaerme/modul2_prozesswaerme_node.html. [Zugriff am 01 12 2023].
- [14] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle , „Zulassung von Wärme- und Kältenetzen,“ [Online]. Available: https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Kraft_Waerme_Kopplung/Waerme_Kaeltenetze/waerme_kaeltenetze_node.html. [Zugriff am 01 12 2023].
- [15] „Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (ErneuerbareEnergien-Gesetz - EEG 2023),“ 26 07 2023. [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2023.pdf. [Zugriff am 01 12 2023].
- [16] C. R. Vitasari, G. Meindersma und A. B. de Haan, „Water extraction of pyrolysis oil: The first step for the recovery of renewable chemicals,“ *Bioresource Technology*, Bd. 102, Nr. 14, pp. 7204-7210, 2011.
- [17] D. Liang und S. Singer, „Pore-resolving simulations to study the impacts of char morphology on zone II combustion and effectiveness factor models,“ *Combustion and Flame*, Bd. 229, Nr. 111405, 2021.
- [18] C. B. Nguyen, J. Scherer, M. Hartwich und A. Richter, „The morphology evolution of char particles during conversion processes,“ *Combustion and Flame*, Bd. 226, pp. 117-128, 2021.
- [19] R. Wu, J. Beutler, C. Price und L. L. Baxter, „Biomass char particle surface area and porosity dynamics during gasification,“ *Fuel*, Bd. 264, Nr. 116833, 2020.
- [20] Q. Song, X. Wang, C. Gu, N. Wang, H. Li, H. Su, J. Huo und Y. Qiao, „A comprehensive model of biomass char-CO₂ gasification reactivity with inorganic element catalysis in the kinetic control zone based on TGA analysis,“ *Chemical Engineering Journal*, Bd. 398, Nr. 125624, 2020.

Anhang A

Zeitplan vor Projektbeginn

Anhang B

Zeitplan zu Projektende

Anhang C

Gleichungen, für Ursprungs- und Labor-Reaktor-Modell im Überblick. [3] (Gleichungsnummern sind der jeweiligen Gleichungsspalte zugeordnet)

Beschreibung	UrsprungsmodeLL	Ref.	Adaption für DBFZ-Reaktor	Gl.-Nr.
Feststofftransport und Massenänderung	$\frac{\partial \gamma_i}{\partial t} = -u_s \frac{\partial \gamma_i}{\partial z} + M_i \sum r_i$	[4]	$\frac{\partial \gamma_{char}}{\partial t} = r_{char} M_{char}$	(1.1) (1.2)
Gastransport	$\frac{\partial \gamma_j}{\partial t} = -\frac{\partial(u_g \gamma_j)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_j \frac{\partial \gamma_j}{\partial z} \right) + \varepsilon M_j \sum r_j$	[4]	$\frac{\partial \gamma_j}{\partial t} = -\frac{\partial(u_g \gamma_j)}{\partial z} + M_j \sum_j r_j$	(2.1) (2.2)
Gasgeschwindigkeit	In Quelle nicht explizit beschrieben		$u_{g,n,i+1} = \left(u_{g,n-1} + \frac{R}{p_0} \frac{n_z}{\varepsilon_s} \sum_j \gamma_j \right) T_{gi}$	(-) (3)
Energie- und Wärmetransport	$\gamma_s \frac{\partial(T_s c_{p,s})}{\partial t} = -\gamma_s u_s \frac{\partial(T_s \cdot c_{p,s})}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) + \sum_n r_n \Delta H_{n,i} + \dot{Q}_{ws} + \dot{Q}_{gs}$ $\gamma_g \frac{\partial(T_g c_{p,g})}{\partial t} = -\gamma_g \frac{\partial(u_g T_g c_{p,g})}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial z} \right) + \varepsilon \sum_m r_m \Delta H_{m,j} + \dot{Q}_{wg} + \dot{Q}_{sg}$	[4]	$T_{TC1}(t) = A_{TC1} t^4 + B_{TC1} t^3 - C_{TC1} t^2 + D_{TC1} t + E_{TC1}$ $T_{TC2}(t) = A_{TC2} t^2 + B_{TC2} t + C_{TC2}$ $T(z, t) = \frac{T_{TC2} - T_{TC1}}{Z_{TC2} - Z_{TC1}} (z - z_{TC1}) + T_{TC1}$ $A_{TC1} = -2.0448 \times 10^{-14}$ $B_{TC1} = 5.5397 \times 10^{-10}$ $C_{TC1} = -4.9341 \times 10^{-6}$ $D_{TC1} = 2.2135 \times 10^{-2}$ $E_{TC1} = 7.6942 \times 10^2$ $A_{TC2} = -6.1077 \times 10^{-7}$ $B_{TC2} = 7.1354 \times 10^{-3}$ $C_{TC2} = 8.0184 \times 10^2$	(4) (6) (4) (7) (4) (8) (5) (-)
Wandheizung	$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial z} \right) + \dot{Q}_{el} \cdot \frac{dz}{l_R} + (\dot{Q}_{gw} + \dot{Q}_{sw}) \cdot dV$	[4]	nicht angewandt	(9) (-)
Partikelporosität	$\frac{\partial \varepsilon_p}{\partial t} = -u_s \frac{\partial \varepsilon_p}{\partial z} - \sum_i \frac{\partial \gamma_i}{(1-\varepsilon) \rho_i}$	[4]	$\frac{\partial \varepsilon_p}{\partial t} = -r_{char} M_{char} \frac{1}{\gamma_{char,0}} (1 - \varepsilon_{p,0})$	(10.1) (10.2)
Wasserverdunstung	$r_v = -S_{p,o} \beta_{H_2O} (c_{H_2O,sat} - c_{H_2O})$	[33]	nicht angewandt	(11) (-)
Pyrolyse	$r_{pyr} = \frac{-m_{bm} k_{0,pyr}}{M_{bm}} e^{-\frac{E_{A,pyr}}{RT}}$	[4]	nicht angewandt	(12) (-)
Massentransport	$\beta_j = \frac{Sh_j D_{j,N_2}}{d_p}$	[32]	angewandt	(13) (-)
Sherwood-Zahl	$Sh_j = 1.9 \cdot (2 + 0.644 Re^{0.5} Sc_j^{0.33})$	[32]	angewandt	(14) (-)

Binärer Diffusions- koeffizient	$D_{j,N_2} = \frac{1,43 \times 10^{-7} T^{1,75} \left[\frac{1}{M_j} + \frac{1}{M_{N_2}} \right]^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{2} \left[(G_j)^{\frac{1}{3}} + (G_{N_2})^{\frac{1}{3}} \right]^2}$	[34]	angewandt
---------------------------------------	---	------	-----------

(15) (-)

Effektiver Diffusions- koeffizient	$D_{j,eff} = \frac{\varepsilon_p}{\tau} D_{pore}$ with $\tau = 3$ and $D_{pore} = D_{j,N_2}$	[32]	angewandt
--	---	------	-----------

(16) (-)

Modifiziertes Thiele-Moduls	$\Phi = \frac{d_p}{6} \sqrt{\left(\frac{v_{c,j} + 1}{2}\right) \frac{k_{char,j,chem} \rho_c (1 - \varepsilon_p) c_j^{v_{c,j}-1}}{D_{j,eff}}}$	[32]	$\Phi = \omega_{cf} \frac{d_p}{6} \sqrt{\left(\frac{v_{char,j} + 1}{2}\right) \frac{k_{char,j,chem} \rho_{char} (1 - \varepsilon_p) c_i^{v_{c,j}-1}}{D_{j,eff}}}$
--------------------------------	---	------	---

(17.1) (17.2)

Effektivitätsfaktor	$\eta = \frac{\tanh(\Phi)}{\Phi}$	[32]	angewandt
---------------------	-----------------------------------	------	-----------

(18) (-)

Effektive Reaktionsrate	$k_{char,j,eff} = \frac{1}{\bar{S}_{p,o} \beta_j c_j^{1-v_{c,j}} + \frac{1}{\eta k_{char,j,chem}}}$	[35]	angewandt
----------------------------	---	------	-----------

(19) (-)

Anhang D

Angewandte Formeln im stationären Modell (Toolbox)

Beschreibung	Stationäres Modell
Feststofftransport und -massenänderung	$\frac{\partial \gamma_i}{\partial z} = -u_s \frac{\partial \gamma_i}{\partial z} + M_i \sum r_i$
Feststoffgeschwindigkeit	$u_s = \dot{m}_{BM_{tr}} \frac{w_{Koks}}{3600 \gamma_{Koks}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{d_R}{2}\right)^2 \pi}$
Gastransport und -massenänderung	$\frac{\partial \gamma_j}{\partial z} = M_j \frac{\sum r_j}{u_g} - y_j \cdot (f_T + f_p + f_n)$
Temperaturkorrektur	$f_T = \frac{\partial T_g}{\partial z} \frac{1}{T_g}$
Porositätskorrektur	$f_p = \frac{(\varepsilon + (1-\varepsilon)\varepsilon_p)}{\left(\varepsilon + (1-\varepsilon)\left(\varepsilon_p + \frac{\partial \varepsilon_p}{\partial z}\right)\right)} - 1$
Stoffmengenkorrektur	$f_n = \frac{\dot{n}}{n_0}$ $\dot{n} = \frac{\sum r_j}{u_g}$
	$n_0 = \frac{101325}{8.314 \cdot T_g} (\varepsilon + (1-\varepsilon)\varepsilon_p) \cdot 1x10^{-9}$
Gasgeschwindigkeit	$\frac{\partial u_g}{\partial z} = u_g \cdot (f_T + f_p + f_n)$
Energetransport	$\frac{\partial T_{Koks}}{\partial z} = \frac{\dot{Q}_{sg}}{c_{p,Koks} \gamma_{Koks} u_s}$ $\frac{\partial T_{Gas}}{\partial z} = \frac{\dot{Q}_{gs}}{c_{p,Gas} \gamma_{Gas} u_g} \cdot \sum r \Delta H$
Energieaustausch zwischen Bett und Gas	$\dot{Q}_{sg} = \sum r \Delta H + \frac{\left(\left(\frac{d_p}{2}\right)^2 + d_p l_p\right)}{l_p \left(\frac{d_p}{2}\right)^2}$ $\dot{Q}_{gs} = \sum r \Delta H - \lambda_g Nu (T_g - T_{Koks}) (1-\varepsilon) \frac{\left(\left(\frac{d_p}{2}\right)^2 + d_p l_p\right)}{l_p \left(\frac{d_p}{2}\right)^2}$
Partikelporosität	$\frac{\partial \varepsilon_p}{\partial z} = -\frac{\frac{\partial \gamma_{Koks}}{\partial z}}{\rho_{0,Koks} (1-\varepsilon)} \frac{1}{\rho_{0,Koks} (1-\varepsilon)}$
Massentransport-Koeffizient	$\beta_j = \frac{Sh_j D_{j,N_2}}{d_p}$
Sherwood-Zahl	$Sh_j = 1.9 \cdot (2 + 0.644 Re^{0.5} Sc^{0.33})$
Binärer Diffusionskoeffizient	$D_{j,N_2} = \frac{1,43 \times 10^{-7} T^{1.75} \left[\frac{1}{M_j} + \frac{1}{M_{N_2}} \right]^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{2} \left[(G_j)^{\frac{1}{3}} + (G_{N_2})^{\frac{1}{3}} \right]^2}$
Effektiver Diffusionskoeffizient	$D_{j,eff} = \frac{\varepsilon_p}{\tau} D_{pore}$ with $\tau = 3$ and $D_{pore} = D_{j,N_2}$

Modifiziertes Thiele-Moduls

$$\Phi = \frac{d_p}{6} \sqrt{\left(\frac{v_{c,j} + 1}{2}\right) \frac{k_{char,j,chem} \rho_c (1 - \varepsilon_p) c_j^{v_{c,j}-1}}{D_{j,eff}}}$$

Effektivitätsfaktor

$$\eta = \frac{\tanh(\Phi)}{\Phi}$$

Effektive Reaktionsrate

$$k_{char,j,eff} = \frac{1}{S_{p,o} \beta_j c_j^{1-v_{c,j}} + \frac{1}{\eta k_{char,j,chem}}} C_F$$

Konversions-Faktor mit
(Biomasse-Struktur-
Parameter)

$$C_F = F \sqrt{1 - \Psi_{j,BM} \ln(F)}$$

Anhang E

Analyseberichte der Brennstoffe

Parameter	Brennstoffe				
Bezeichnung	PHS (P12-16, W7)	PHS (P12-16, W14)	HHS Spanner Re ²	Pellets Stroh	
Prüfberichtnummer	AL-2021- 0237-000	AL-2023- 0190-000	AI-2023- 0191-000	AI-2023- 0192-000	
Materialnummer	BR-07101 (Probe 1)	BR-07100	BR-08988	BR-08989	
AL_Anionen Eluat (nach DIN EN 12457-4)					
Fluorid	mg/kg TS	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Chlorid	mg/kg TS	12,1	16,9	24,6	2240
Nitrid	mg/kg TS	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Bromid	mg/kg TS	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Nitrat	mg/kg TS	10,9	n. n.	17,8	692
Sulfat	mg/kg TS	1,08	4,06	14,0	627
Phosphat	mg/kg TS	54	62,5	123,0	543
AL_Elementaranalyse (nach DIN EN ISO 16948)					
Stickstoff	mg/kg TS	0,24	0,2	0,22	0,66
Kohlenstoff	mg/kg TS	51,3	51,3	50,4	46,7
Wasserstoff	mg/kg TS	6,17	6,02	6,06	5,68
Chlor	% TS	0,01	n. n.	0,01	0,21
Schwefel	% TS	0,01	0,01	0,01	0,09
AL_Heizwert, Brennwert (Ho nach DIN EN ISO 18125: 2017-08, Hu nach DIN EN ISO 18125)					
Brennwert Ho	kJ/kg TS	20.060	19.520	20.170	18.280
Heizwert unterer Hu (H,N,S korrig.)	kJ/kg TS	18.750	18.240	18.890	17.080
AL_Wassergehalt (nach DIN EN 15934)					
Wassergehalt Ofenmethode	% OS	8,3	8	6	9,3
AL_thermische Parameter (Asche 550 °C nach DIN EN ISO 18122, Glühverlust nach DIN EN 15935, Asche 815 °C nach DIN 51719, Flüchtige nach DIN EN ISO 18123, Kohlenstoff nach DIN 51734)					
Asche 550°C	% TS	0,4	0,2	0,3	6,5
Glühverlust	% TS	99,6	99,8	99,7	93,5
Aschegehalt 815 °C	% TS	0,32	0,3	0,4	5,9
flüchtige Substanzen	% TS	84,9	85,7	84,9	74,9
fixer Kohlenstoff	% TS	14,8	14	14,7	19,2

Parameter	Brennstoff				
	PHS (P12-16, W7)	PHS (P12-16, W14)	HHS Spanner Re ²	Pellets Stroh	
AL_Hydridbildner im Totalaufschluss (nach DIN EN ISO 16967 DIN EN ISO 16968)					
Arsen	mg/kg TS	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Bismut	mg/kg TS	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Quecksilber	mg/kg TS	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Selen	mg/kg TS	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
AL_ICP-OES Totalaufschluss (nach DIN EN ISO 16967 DIN EN ISO 16968)					
Aluminium	mg/kg TS	50,3	4,81	4,39	58,9
Barium	mg/kg TS	25,4	22,4	11,7	19,8
Calcium	mg/kg TS	916	931	1090	3.400
Cadmium	mg/kg TS	0,266	0,344	n. n.	n. n.
Cobalt	mg/kg TS	n. n.	0,156	n. n.	n. n.
Chrom	mg/kg TS	0,683	0,331	0,497	1,86
Kupfer	mg/kg TS	0,868	0,824	0,85	2,48
Eisen	mg/kg TS	14,8	12,5	9,06	74
Kalium	mg/kg TS	316	452	490	13.900
Lithium	mg/kg TS	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Magnesium	mg/kg TS	128	146	150	724
Mangan	mg/kg TS	182	241	140	30,6
Molybdän	mg/kg TS	0,116	n. n.	n. n.	n. n.
Natrium	mg/kg TS	n. n.	n. n.	n. n.	268
Nickel	mg/kg TS	0,424	0,342	0,603	0,624
Phosphor	mg/kg TS	36,1	44	75,9	376
Blei	mg/kg TS	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Schwefel	mg/kg TS	64,3	66,8	84,9	853
Silizium	mg/kg TS	n. n.	134	154	13.500
AL_Größenverteilung (nach ISO 17827)					
> 63 mm	%	0	0	0	0
> 45 mm	%	0	0	0	0
> 16 mm	%	1,3	1,2	25,8	0
> 8 mm	%	96,9	97,2	54,9	0
> 3,15 mm	%	1,7	1,2	17,9	99,5

> 2 mm	%	0	0,1	0,5	0
> 1 mm	%	0,1	0,1	0,5	0,1
> 0,5 mm	%	0	0,1	0,2	0,1
Auffangschale	%	0	0,1	0,2	0,3

Anhang F

Stand der Technik aus dem Antrag (Kapitel 2) mit den dortigen Quellenangaben (antragsspezifische Nummerierung).

Aktueller Stand der Technik ist das Betreiben von kleintechnischen Vergasungsanlagen mit Holzpellets oder wohl definierten, hochwertigen Hackschnitzeln mit niedriger Brennstofffeuchte und gleichbleibender Brennstoffqualität [3] (z. B. SpannerRE² GmbH [4], Burkhardt GmbH [5], LiPRO Energy GmbH & Co. KG [6], Holzenergie Wegscheid GmbH [7] u. a.). Aufgrund stetig steigender Brennstoffpreise und der aktuellen Förderpolitik müssen deutsche Hersteller von thermischen Biomassevergasungsanlagen auf internationale Märkte ausweichen. Zum Beispiel sind laut der Firma ENTRADE Energiesysteme AG mehr als 130 unterschiedliche Brennstoffzusammensetzungen an deren Anlagen getestet worden [8]. Eine detaillierte Auskunft über die Brennstoffdaten und -eigenschaften sowie die damit verbundenen Wartungsintervalle stehen jedoch nicht zur Verfügung. In [9] wird beschrieben, dass Holzpellets einen stabilen Betrieb gewährleisten können. Jedoch ist unklar, ob oder inwieweit die weiteren getesteten Brennstoffe einen kontinuierlichen Prozess erlauben. Aufgrund der aktuellen Marktbedingungen hat die Firma ENTRADE Energiesysteme AG Ende 2018 Insolvenz angemeldet, was den Umstand der engen Marktsituation und der Notwendigkeit einer breiteren Informationsgrundlage noch einmal unterstreicht.

Bisher veröffentlichte Modelle zu Vergasungsreaktoren mit Festbett basieren zumeist auf der einfacher zu beschreibenden Vergasung von reinem Kohlenstoff [10, 11, 12] oder arbeiten mit erheblichen Vereinfachungen in den Stoffeigenschaften oder thermodynamisch elementaren Faktoren wie der Geschwindigkeit des Gasstromes. Des Weiteren basieren verfügbare Modelle zumeist auf kinetischen Daten aus Literaturquellen. Aufgrund der hohen Variation der Reaktivität des Restkohlenstoffes aus unterschiedlichen Rohstoffen kann dies einen Prozess nur mit mäßiger Genauigkeit beschreiben, weshalb in vielen Quellen auf eine Notwendigkeit zur Erweiterung von Umfang und Detailgrad der Modelle hingewiesen wird [13, 14]. Genau diese bisherigen Schwachpunkte sowie weitere Modelldetaillierungen sollen in dem geplanten Projekt bearbeitet werden, um eine realitätsnahe Vorhersage gewährleisten zu können. Die Grundlage dabei bilden neben dem Modell auch die belastbaren und sicher bekannten Messergebnisse des Projektes

Die fachliche Kompetenz der Projektpartner im Konsortium ist durch die Erfahrungen der Partner in ihren einzelnen Teilgebieten gegeben.

Am iwe existiert derzeit ein Modellansatz zur Vorhersage von verbleibendem Kohlenstoff während des Vergasungsprozesses. Derzeit berücksichtigt das eindimensionale, transiente Modell u. a. folgende temperaturabhängige Einflüsse:

- homogene und heterogene chemische Reaktionen der relevanten Komponenten,
- Massentransportphänomene (äußerer Stofftransport, Porendiffusion),

- Wärmetransportphänomene als Widerstandsnetzwerk,
- Porosität des Feststoffes und des Bettens in Abhängigkeit des Kohlenstoffabbaus,
- veränderliche Geschwindigkeit des durchströmenden Gases.

Erste Berechnungen mit dem Modell lieferten prozessnahe Ergebnisse für den Versuchsreaktor des iwe. Damit lässt sich neben dem Kohlenstoffumsatz auch die Produktgaszusammensetzung mit guter Übereinstimmung darstellen. Die kinetischen Daten für das numerische Modell basieren bisher jedoch auf einer Mischung aus Literaturdaten und Versuchsreihen für einen definierten Rohstoff bei konstantem Druck. Dazu wurden bereits erste Ergebnisse während der „Integration of Sustainable Energy Expo & Conference 2018“ (iSEnEC) in Form des Vortrages „Numerical modelling of downdraft gasification processes“ vorgestellt [15]. Das Modell soll im geplanten Projekt als Basis dienen und durch die Einbindung der Vielzahl an realen Versuchsdaten der unterschiedlichen Anlagen (DBFZ, Spanner Re² GmbH) wesentlich an Praxisnähe und Vorhersagegenauigkeit gewinnen. Weiterhin ist so die praxisnahe Erweiterung auf verschiedene Brennstoffe und veränderliche Reaktorgeometrie geplant. Die Hochschule Hof ist mit dem iwe sowie einer Ausbildung für Simulationen im Master Maschinenbau eine Forschungs- und Ausbildungsstätte für den Teilbereich Simulation von thermochemischen Prozessen.

Das DBFZ ist spezialisiert im Umgang mit Biomassen und ein langjähriger Erfahrungsträger im Bereich der thermochemischen Vergasung sowie im Besitz von Versuchsständen, die für das Projekt erforderlich sind. Dazu sind das Bioraffinerietechnikum [16] und das Aufbereitungs- und Kompaktierungstechnikum [17] zu nennen. Des Weiteren ist das DBFZ im Besitz einer hochmodernen Anlage mit integrierter TGA (thermogravimetrische Analyse) im kg-Maßstab zur detaillierten Analyse von thermochemischen Umwandlungsprozessen. Damit können prozessrelevante Parameter und Daten variiert, gesteuert und ausgelesen werden. Die Anlage wurde kürzlich erfolgreich in Betrieb genommen und ist nun in der Lage, die erforderlichen kinetischen Daten für genauere numerische Modelle zu liefern. Vorteile der Anlage sind die Genauigkeit der Messdaten sowie die vollständige Prozessüberwachung und Steuerung für wissenschaftliche Messungen. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Vergasung unter variablen Drücken bis zu 20 bar, variablen Vergasungsmitteln sowie der Aufnahme der Brennstoffmassenabnahme während der Reaktion untersucht werden kann. Die Untersuchung verschiedener Brennstoffe ist hier ebenso möglich und Ziel der Anlage. [18]

Die Spanner Re² GmbH zeichnet sich durch Erfahrung im Bau von Vergasungsanlagen aus und ist in der Lage eine marktnahe Testanlage für die Versuchszwecke umzurüsten und zu betreiben. Das Unternehmen hat seit 2007 über 700 Anlagen für das In- und Ausland herstellen und verkaufen können und ist damit bereits als kompetenter Akteur auf dem Markt der kleintechnischen Holzvergasung vertreten.

Im späteren Projektverlauf kann sich der Aufbau einer öffentlichen Datenbank z. B. an der Datenbank FRED orientieren, welche im Jahr 2018 online gegangen ist. Bezuglich der Brennstoffzusammensetzung besteht hier eine Datenbank aus unterschiedlichsten statistischen Messwerten zu Brennstoffen, welche in einem Gemeinschaftsvorhaben zwischen dem LfU und dem TFZ zusammengetragen wurden. Diese beinhaltet jedoch keine kinetischen Daten zur Vorhersage der thermochemischen Umsetzung der Brennstoffe und kein Berechnungstool zur Reaktorauslegung. [19]

Aufzuführen sind außerdem die Projekte „VergaOpt“, „stROhgas“ und „GASASH“. Sowohl bei „VergaOpt“ als auch bei „stROhgas“ liegt jedoch der Fokus in den Untersuchungen zur Brennstoffaufbereitung und -klassifizierung in Bezug auf die Brennstoffqualität. Zur Bereitstellung der Brennstoffe für das hier dargestellte Projekt kann also auf den Erfahrungen des DBFZ aufgebaut werden. Damit können direkt potentielle alternative Reststoffe für die projektspezifischen Analysen bzw. Versuche verwendet werden [20] [21]. Grundlage dieser Projekte ist im Gegensatz zum geplanten Projekt ausschließlich der praktische Versuchsbetrieb ohne Simulationsarbeit.

„GASASH“ hingegen befasst sich vorrangig mit der Entwicklung einer Anlage mit temperaturflexiblem Betrieb. Damit soll der Einsatz von aschereichen Brennstoffen wie Gärresten oder Reisspelzen ermöglicht werden. Zudem werden dabei die Verwertungsmöglichkeiten von Aschen untersucht. [22]

Schutzrechte / Patente / Software

Die Programmierung erfolgt auf einer wissenschaftlich und kommerziell lizenzierten MATLAB-Version an der Hochschule Hof und kann diesbezüglich mit dem jährlichen Erwerb von Lizenzen weiter genutzt werden.

Das Projekt ist unberührt von den Patentansprüchen der Spanner Re² GmbH. Weitere Schutzrechte bzw. Patente und Rechte Dritter stehen der Durchführung und geplanten Ergebnisverwertung nach Kenntnis der Antragsteller nicht entgegen.

Bei dem geplanten Projekt handelt es sich im Kern um die Entwicklung einer Software, was in Deutschland nicht patentwürdig ist. Eine breite Anwendung der Toolbox und Simulation zu gewährleisten stellt zudem das Ziel des Projektes dar. Diese mit Patenten und Lizenzen zu schützen würde deshalb hinderlich sein. Dennoch wurde eine Recherche nach Patenten zu Simulations- und Modellierungssoftware von thermischen Vergasungsprozessen durchgeführt. Alle dazu gefundenen Schriften sind nur auf den Japanischen Raum beschränkt und befinden sich zudem seit spätestens 2012 noch in Anmeldestatus. Diese wären folgende:

JP2004250574A zeigt eine allgemeine Beschreibung einer Berechnung, bei der die Reaktionen in einem Festbettreaktor in mehrere Schichten aufgeteilt werden. Die Schrift befindet sich aber seit 2004 im Anmeldestatus.

(<https://patents.google.com/patent/JP2004250574A/en?q=software&q=simulation&q=biomas&oq=software+simulation+biomass>, zu letzte aufgerufen am 01.02.2019)

JP2012229326A bezieht sich auf gemischte grasartige Brennstoffe, die durch Voruntersuchungen nachgebildet und Mixturen simuliert werden.

(<https://patents.google.com/patent/JP2012229326A/en?q=software&q=simulation&q=biomas&oq=software+simulation+biomass>, zu letzte aufgerufen am 01.02.2019)

JP2011225844A beschreibt ein Modul, in dem ein Brennstoff voruntersucht wird, und mit einer Simulation die Menge an Vergasungsmittel für den Prozess errechnet und vordefiniert.

(<https://patents.google.com/patent/JP2011225844A/en?q=software&q=simulation&q=biomas&oq=software+simulation+biomass>, zu letzte aufgerufen am 01.02.2019)

In JP2011195671A wird die Modellierung eines Festbettvergasers ähnlich dem Projekt beschrieben. basiert jedoch auf der Vorgabe von experimentellen Temperaturwerten. Diese werden bei der geplanten Simulation jedoch errechnet.

(<https://patents.google.com/patent/JP2011195671A/en?q=software&q=simulation&q=biomas&oq=software+simulation+biomass>, zu letzte aufgerufen am 01.02.2019)

- [3] J. Karl, Dezanrale Energiesysteme, München: Oldenbourg Verlag, 2012.
- [4] „www.holz-kraft.com/de/“ Spanner Re² GmbH, 2018. [Online]. Available: <https://www.holz-kraft.com/de/>. [Zugriff am 08 2018].
- [5] „www.burkhardt-gruppe.de/“ Burkhardt GmbH, 2018. [Online]. Available: <https://burkhardt-gruppe.de/hp1/Startseite.htm>. [Zugriff am 08 2018].
- [6] „lipro-energy.de/de/“ LiPRO Energy GmbH & Co. KG, 2018. [Online]. Available: <https://lipro-energy.de/de/>. [Zugriff am 08 2018].
- [7] Holzenergie Wegscheid GmbH, „holzenergie-wegscheid.de/“ Holzenergie Wegscheid GmbH, 01 2019. [Online]. Available: <https://www.holzenergie-wegscheid.de>. [Zugriff am 01 2019].
- [8] ENTRADE Energiesysteme AG, „http://www.entrade.de/“ 2018. [Online]. Available: <http://www.entrade.de/forschung.html>. [Zugriff am 05 2018].
- [9] C. Zuber, „Erfahrungen mit alternativen Brennstoffen im Entrade Biomassevergaser E3,“ in Tagungsband „Biomass to Power and Heat“, Zittau, Hochschule Zittau/Görlitz, 2016, pp. 125 - 134.
- [10] K. Bryden und K. Ragland, „Numerical modeling of a deep, fixed bed combustor,“ *Energy fuels*, Bd. 10, Nr. 2, pp. 269 - 275, 1996.
- [11] M. L. Hobbs, „Modeling fixed-bed coal gasifiers,“ *AIChE Journal*, Bd. 38, Nr. 5, pp. 681 - 702, 1992.
- [12] H. Yoon und J. Wei, „A model for moding-bed coal gasification reactors,“ *AIChE Journal*, Bd. 24, Nr. 5, pp. 885-903, 1978.

- [13] C. Di Blasi, „Dynamic behaviour of stratified downdraft gasifiers,” *Chemical Engineering Science*, pp. 2931-2944, 2000.
- [14] C. Di Blasi, Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis, Elsevier Ltd., 2008.
- [15] A. Gradel, T. Plessing, A. Jess, R. Honke und J. Wünning, „www.isenec.org,“ Integration of Sustainable Energy Expo & Conference, 2018. [Online]. Available: <https://www.isenec.org/de/events/vortrag/numerical-modelling-of-downdraft-gasification-processes-s/688973>. [Zugriff am 08 2018].
- [16] DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, „<https://www.dbfz.de/>,“ DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, 2018. [Online]. Available: <https://www.dbfz.de/forschungsbereiche/bioraffinerien/technik.html>. [Zugriff am 07 2018].
- [17] DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, „<https://www.dbfz.de/>,“ DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, 2018. [Online]. Available: <https://www.dbfz.de/forschungsbereiche/thermo-chemische-konversion/technik.html>. [Zugriff am 07 2018].
- [18] DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, „<https://www.dbfz.de/>,“ DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, 2018. [Online]. Available: <https://www.dbfz.de/presse/pressemitteilungen-2018/biomasseforscher-nehmen-versuchsanlage-zur-weiterentwicklung-der-biomassevergasung-in-betrieb.html>. [Zugriff am 07 2018].
- [19] A. Otto, „Feste Regenerative Energieträger Datenbank,“ Bayerisches Landesamt für Umwelt 2018, 2018. [Online]. Available: <http://www.fred.bayern.de/index.htm>. [Zugriff am 10 08 2018].
- [20] „Projektkurzbeschreibung für stROHgas nach www.enargus.de,“ [Online]. Available: <https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi?op=enargus.eps2&q=stROHgas&s=14&m=1&v=10&id=515926>. [Zugriff am 08 2018].
- [21] „Projektkurzbeschreibung für VergaOpt nach www.enargus.de,“ [Online]. Available: <https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi?op=enargus.eps2&q=VergaOpt&s=14&m=1&v=10&id=520868>. [Zugriff am 08 2018].
- [22] „Projektkurzbeschreibung für GASASH nach www.enargus.de,“ [Online]. Available: <https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi?op=enargus.eps2&q=GASASH&s=14&m=1&v=10&id=941612>. [Zugriff am 08 2018].