

Teerentstehung und Teerabbau in einer Wirbelschicht am Beispiel von Holz

Kennziffer: 2799

Förderzeitraum: 1.7.2007 – 30.6.2010

Antragsteller: Prof. Dr. rer. nat. Frank Behrendt

Stipendiat: Stephan Gerber

*Technische Universität Berlin, Fakultät III, Institut für Energietechnik
Fachgebiet Energieverfahrenstechnik und Umwandlungstechniken regenerativer
Energien, Sekr. RDH 9, Fasanenstr. 89, 10623 Berlin
Email: frank.behrendt@tu-berlin.de, stephangerber@gmx.net*

Abstract

In dieser Arbeit wird die Holzvergasung in einer Wirbelschicht mit Hilfe eines Euler-Lagrange-Verfahrens auf Basis eines Diskreten Elemente Ansatzes im Zweidimensionalen modelliert. Es werden innerhalb der Gasphase drei virtuelle Teerbestandteile betrachtet von denen zwei als abbaubar modelliert wurden. Die Zusammensetzung des Teers erfolgt auf Basis fixer Anteile. Mit Hilfe von Parametervariationen wird der Einfluss verschiedener Prozessbedingungen auf den Teergehalt im Produktgas untersucht.

1 Einleitung

Wirbelschichtvergasungsanlagen sind gerade im kleineren Maßstab energiewirtschaftlich interessant, jedoch existieren eine Reihe von Problemen, die die Durchsetzung am Markt behindern. Insbesondere der Teergehalt des bei der Vergasung entstehenden Produktgases erzeugt durch seine hohen Kondensationstemperaturen in der weiteren Verwendung des Produktgases enorme Probleme. Es kommt zu zugesetzten Anlagenteilen und damit unter Umständen zu aufwendigen Wartungsmaßnahmen. Des Weiteren bleibt anzumerken, dass auch aus gesundheitlicher Sicht diese Stoffe kritisch zu beurteilen sind, da sie zum Teil toxisch, karzinogen und erbgutverändernd sind. Aus technischer Sicht trägt der Teer zudem auch ungenutzte Brennstoffpotentiale in sich, die sich mit einer Entsorgung des Teers doppelt negativ auswirken. Der Teer geht zum Einen als Träger chemischer Energie in der Anlage verloren und muss zum Anderen aufwändig in nachgeschalteten Anlagenteilen entfernt werden (Gaswäsche etc.). In dieser Arbeit ist ein Euler-Lagrange-Verfahren etabliert worden, welches durch seine detailgenaue Modellierung einen Einblick in die Anwendbarkeit und den Nutzen experimentell bereitgestellter Modelle für die Teerentstehung und den Teerabbau gibt. Die Arbeiten, die durch dieses Stipendium ermöglicht wurden, sind Teil der während des Stipendiums erstellten Promotionsschrift Gerber (2010).

2 Euler-Lagrange-Simulation

Euler-Lagrange-Verfahren dienen zur Modellierung mehrphasiger Strömungen mit dispersen Phasenanteilen, wobei der Begriff 'Euler' auf die Euler'sche Betrachtungsweise der fluiden Phase und der Begriff 'Lagrange' auf die Lagrange'sche Betrachtungsweise der dispersen Phasen anspielt. Modelle dieser Art werden häufig als Referenzlösungen anderer vereinfachter Modellierungsarten verwendet (z.B. Euler-Euler-Modelle, Zellmodelle etc.). Der Referenzcharakter dieser Modelle bringt es allerdings auch mit sich, dass diese Art der Modellierung meist auf Anlagen im Labormaßstab beschränkt bleibt, da der Rechenaufwand recht groß ist. Zur Bewältigung des Rechenaufwandes wurde das Verfahren parallelisiert.

Innerhalb des implementierten Verfahrens wird der Partikelabbrand vereinfacht als nulldimensional angesehen, d.h. jede Bilanzgröße des Partikels gilt für das gesamte Partikel. Innere Gradienten werden in dieser Arbeit ausgeklammert. Das Abbrandmodell beinhaltet Teilmodelle für die Aufheizung (Zhou u. a. (2004)), die Trocknung (Peters (2003)), die primäre Pyrolyse (DiBlasi u. Branca (2001)) und die anschließende Vergasung (van den Aarsen u. a. (1985); DiBlasi (1999); Hawley u. a. (1983)). Die Schrumpfung der Partikel wird während der Trocknung vernachlässigt. Während der primären Pyrolyse schrumpft das Partikel entsprechend den Darstellungen in Mermoud u. a. (2006) relativ unabhängig von der Heizrate um den Faktor drei. Die Partikelschrumpfung während der Vergasung wird als masseproportional und dichtekontant angenommen. Die Vergasungsraten sind entsprechend der oben genannten Kinetiken abhängig vom Umsatzgrad der Holzkohle und berücksichtigen damit den partikelspezifischen Charakter einer Euler-Lagrange-Simulation.

Die Arbeit von Neubauer (2008) gibt einen breiten Überblick über die Problematik des Teers und der verschiedenen Ansätze, Teere zu kategorisieren. In dieser Arbeit wird auch aus der Arbeit von Milne u. a. (1988) zitiert: "...kann 'Teer' als die Achillesferse der Biomassevergasung angesehen werden." Ca. 20 Jahre später schreiben Gomez-Barea u. Leckner (2009) in ihrem Übersichtsartikel Folgendes: "...tar conversion are the processes whose modelling is least satisfactory. A great research effort is still needed to improve tar chemistry." Diese beide Zitate verdeutlichen die Komplexität des Themas und den Mangel an wirklich umfassenden Modellen.

In dieser Arbeit wird mit dem Modell von Rath u. Staudinger (2001) gearbeitet, da es eine recht komplexe Modellierung des Teerabbaus erlaubt. Betrachtet werden drei Teere deren Abbau anhand von kinetischen Ansätzen beschrieben wird. Zwei der drei Teere gelten als reaktiv und zersetzen sich in eine Reihe anderer Gasphasenkomponenten (siehe Tabelle 1). Die dritte Teerkomponente wird als inert angenommen. Die Annahme eines inerten Teers spiegelt hier die Prozessbedingungen der Experimente (Temperatur, Verweilzeit, Reaktionspartner etc.) wider und nicht eine tatsächliche Nichtreaktivität des Stoffes. Alle drei Komponenten werden jedoch nicht tatsächlich als real existierende chemische Verbindung benannt, sondern als nur über ihre chemische Reaktivität definierte virtuelle Teerkomponenten,

die repräsentativ für eine gewisse Breite des Spektrums an Komponenten im Teer gelten können. Die Zerfallskinetiken der Teere sind in Tabelle 2 abgebildet. Um

Gaskomponente	Ethanol	Propanol
CO	0.602	0.534
CO ₂	0.121	0.085
C ₂ H ₂	0.137	0.211
H ₂ O	0.14	0.17

Tabelle 1: Massenanteile der beim Teerzerfall entstehenden Gase nach Rath u. Staudinger (2001)

das Modell ansetzen zu können, müssen den virtuellen Teerkomponenten Stoffeigenschaften zugewiesen werden, da das implementierte Verfahren auf Basis einer Gesamtenthalpiebilanz arbeitet. Mit den Stoffdaten der virtuellen Teerkomponenten wird zum Beispiel auch die Reaktionsenthalpie und damit die Wärmetönung der Teerabbaureaktionen festgelegt. Die Arbeit von Rath u. Staudinger (2001) berichtet über keinerlei Reaktionsenthalpien in diesem Zusammenhang. Um in etwa eine Abbaureaktion ohne Wärmetönung zu bekommen, wurden Ethanol und Propanol als virtuelle Teerkomponenten gewählt. Beide Stoffe gehören nicht zu den Teeren haben allerdings Molmassen im relevanten Bereich und erzeugen mit Ethin als repräsentatives Kohlenwasserstoffprodukt der Teerzerfallsreaktionen eine Reaktion fast ohne Wärmetönung. Die Kohlenwasserstoffdaten werden aus verschiedenen Gründen vereinfacht in Rath u. Staudinger (2001) angegeben, womit sich auf der Produktseite ein gewisser Freiheitsgrad ergab. Bezüglich Größen wie dem Brennwert ist es natürlich nicht unerheblich woraus der Massenanteil der Kohlenwasserstoffe besteht, was allerdings hier vernachlässigt werden soll.

Zudem werden in Rath u. Staudinger (2001) Massenfraktionen der Zersetzungsprodukte angegeben, die aufgrund der Elementerhaltung nur bestimmte Moleküle als Teere zulassen würden. Diese Moleküle haben aber keine sinnvollen Molmassen. Aus diesem Grund wurde auf die strikte Einhaltung der Elementerhaltung innerhalb der homogenen Teerzersetzung verzichtet.

Bei der Bildung der Teere konnte die Arbeit von Rath u. Staudinger (2001) nicht herangezogen werden, da nur Daten für die Entstehung der drei Teere vorhanden sind, jedoch keine Aussagen bzgl. der Holzkohle- und Holzgasproduktion dokumentiert sind. Es ist aber wesentlicher Teil eines primären Pyrolysemodells, das Wechselspiel aus Holzkohleentstehung sowie Holzgas- und Holzteerentstehung abzubilden. Daher wurde das bereits genannte primäre Pyrolysemodell von DiBlasi u. Branca (2001) verwendet und der in diesem Modell berechnete Teerproduktionsterm auf die drei Teerkomponenten aufgeteilt. Zur Aufteilung wurden die

Maximalwerte der einzelnen Teere aus Rath u. Staudinger (2001) normiert (siehe Tabelle 3). Da das implementierte Verfahren sehr viele Teilmodelle verwendet, sol-

Gaskomponente	Ethanol	Propanol
A in $1/s$	$3.076 \cdot 10^3$	$1.13 \cdot 10^6$
E in kJ/mol	66.3	109.0
a	1.0	1.0
kinetischer Ansatz $r = A \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \cdot A^a$		

Tabelle 2: Kinetische Daten des Teerzerfalls nach Rath u. Staudinger (2001)

len hier aus Platzgründen nur kurz weitere Modellspezifikationen genannt werden. Eine ausführliche Dokumentation des Modells findet sich in der diesem Bericht zugrundeliegenden Promotionsschrift (siehe Gerber (2010)). Das Verfahren beruht im Weiteren auf der Diskreten Elemente Methode, eine Methode bei der die Partikelkollisionen mit Hilfe von Feder-Dämpfer-Elementen ausgeführt werden, und der Aufteilung der Partikelvolumina zwecks Bestimmung der Volumenanteile der Phasen. Diese Aufteilung ist notwendig, da ansonsten Probleme mit der Stabilität des Verfahrens auftraten.

Teerkomponente	Massenanteil
Ethanol	0.327
Propanol	0.496
Benzol	0.177

Tabelle 3: Massenanteile am Gesamtteer der bei der primären Pyrolyse entstehenden Teerkomponenten nach Rath u. Staudinger (2001)

3 Ergebnisse

Um die Sensitivität der Ergebnisse des entstandenen Modells bzgl. diverser Parameter zu testen, wurden umfangreiche Parameterstudien durchgeführt. Die grundlegenden Parameter der durchgeführten Simulation sind in Tabelle 4 und 5 aufgeführt. Auf diesem Datensatz basierend wurden insgesamt weitere 13 Szenarien berechnet, deren geänderte Parameter in Tabelle 6 verzeichnet sind.

Um den Fokus in diesem Abschlussbericht auf die Teere zu richten und den Rahmen nicht zu sprengen, werden hier nur wenige der verfügbaren Daten präsentiert. Speziell soll es dabei um die generelle Modellübereinstimmung gehen, einige Details des Vergleichsfall und ein Vergleichsszenario, bei dem der Anteil des inerten Teeres nach Tabelle 3 entsprechend den Darstellungen in Tabelle 6 geändert wurde (Fall 4).

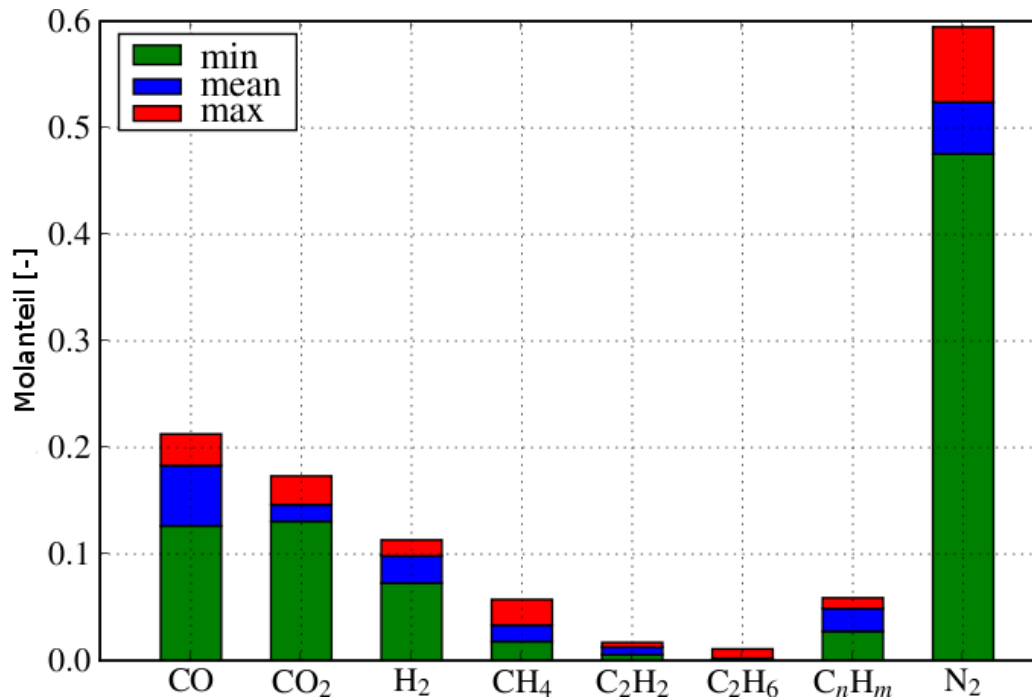


Abbildung 1: aus 19 verschiedenen Messungen gemittelte Gaszusammensetzung des Reaktors (experimentelle Daten)

Abbildung 1 zeigt die über 19 Experimente gemittelten Daten der Produktgase einer Holzvergasungsanlage im Labormaßstab. Die Daten der Simulation werden in Abbildung 2 als Fall zwei präsentiert. Es zeigt sich, dass die Konzentrationen der Hauptvergasungsprodukte Kohlenmonoxid und Wasserstoff im Vergleich zum Experiment höher sind oder zumindest am oberen Ende der experimentellen Werte liegen. Die Werte in Abbildung 1 für Stickstoff sind aus messtechnischen Gründen als Summe der Stickstoff- und Wassermolanteile zu deuten, da beide nicht explizit messbar waren. Die experimentellen Daten für Stickstoff in Abbildung 1 sind ähnlich denen aus der Simulation (Stickstoff und Wasser beachten), was auf ähnliche Produktgasausbeuten hindeutet. Dieser Rückschluss ist möglich, da sich Stickstoff im Modell vollkommen inert verhält und nur über die Luftzufuhr in den Reaktor gelangt. Entsprechend den im Vergleich zu den experimentellen Daten zu

hohen Kohlenmonoxidkonzentrationen ist die Konzentration des Kohlendioxids in der Simulation niedriger als im Experiment bzw. im unteren Wertebereich. Dies entspricht den Erwartungen. Insgesamt deuten die Simulationsdaten auf tendentiell zu hohe Vergasungsraten in der Simulation hin. Trotz dieser Ergebnisse sind die gemessenen Temperaturen im unteren Teil des Reaktors ca. 90 K höher als die aus der Simulation (Daten wurden hier nicht gezeigt), was die Annahme zu schneller Ratenausdrücke in der Simulation noch unterstützt.

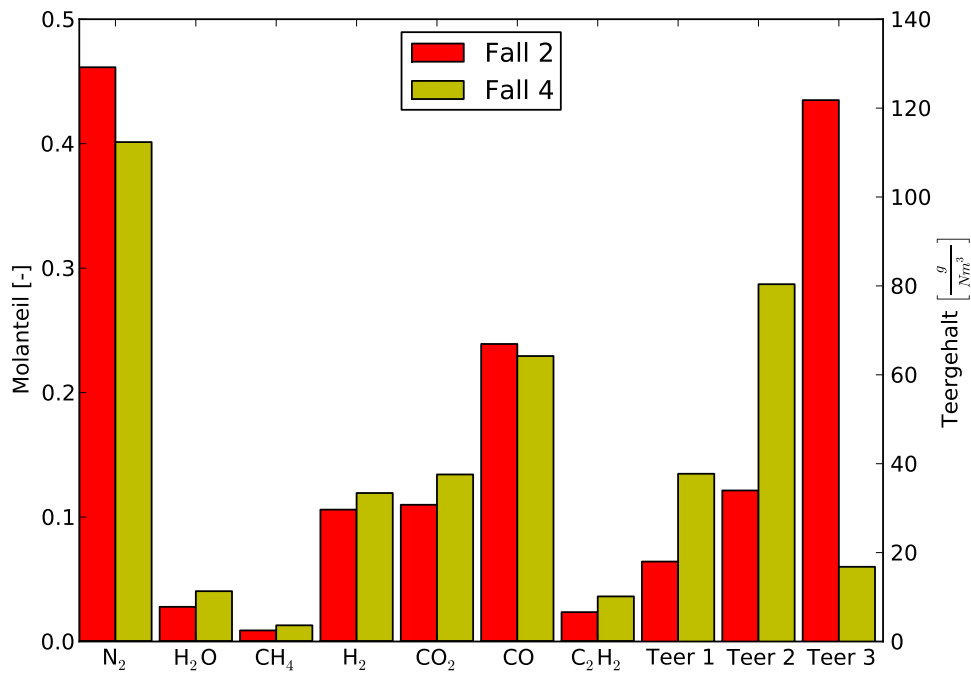


Abbildung 2: Auslasskonzentrationen der Fälle 2 und 4

Die Teerkonzentrationen in der Simulation sind genau wie die Kohlenwasserstoffe mit deutlichen Abweichungen behaftet. Diese Abweichungen zeigten sich allerdings auch schon in der Arbeit von Gerber u. a. (2010), in der ein ähnliches Modell angewandt wurde allerdings auf Basis einer Euler-Euler-Methode. Insbesondere zeigt der Vergleich der experimentellen Daten mit denen der Simulation, dass ca. eine Größenordnung zwischen den Ergebnissen liegt. Gründe für diese Differenzen sind vielfältig und sollen hier kurz angesprochen werden. Zum Einen führen niedrigere Betttemperaturen in der Simulation zu niedrigeren Abbauraten der Teere und somit zu höheren Teerausbeuten. Auf der anderen Seite wird bei höheren Betttemperaturen tendentiell mehr Teer aus dem Holz gebildet. Zudem ist Holzkohle dafür bekannt, katalytische Eigenschaften in Hinsicht auf das Cracken von Teeren zu haben, was in dieser Arbeit allerdings nicht berücksichtigt wurde und somit zu höheren Teerkonzentrationen im Auslass führt.

Eng mit den Teerkonzentrationen verbunden sind die Kohlenwasserstoffkonzentrationen. Kohlenwasserstoffe können im Modell zum Einen während der primären Pyrolyse entstehen und zum Anderen während des Crackens von Teeren. Da die Heizraten der frischen Holzpartikel im Reaktor sehr hoch sind, entsteht deutlich mehr Teer als Holzgas und damit hat auch die Kohlenwasserstoffentstehung bei der Zersetzung der Teere eine tendenziell größere Bedeutung als die durch das Holzgas bedingte. In den Experimenten liegen die Daten der Kohlenwasserstoffe ca. Faktor vier höher als in den Simulationen. Dies geht einher mit den zu hohen Teerkonzentrationen in den Simulationen. Auf der anderen Seite wurde in dieser Arbeit die heterogene Bildung von Methan nicht berücksichtigt, da diese nur mit Hilfe von Katalysatoren bei Normaldruck relevant ist. Die Asche im Holz oder der Holzkohle wurde hier aber nicht berücksichtigt.

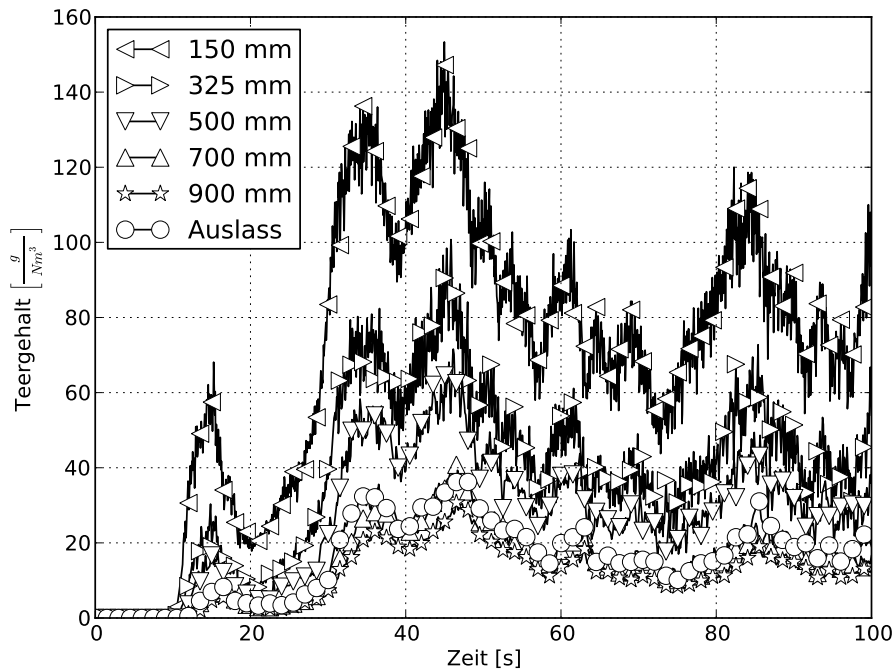


Abbildung 3: Teer 1 für verschiedene Höhenstufen im Reaktor (Fall 2)

Die Abbildungen 3 bis 5 zeigen die zeitliche Entwicklung der Teerkonzentrationen im Reaktor auf verschiedenen Höhenstufen. Die stark schwingenden Signale sind in ihren Extrema miteinander gekoppelt. Die Extrema zeigen einen zeitlichen Verzug mit steigender Reaktorhöhe, was auf die Verweilzeit im Reaktor zurückzuführen ist. Der Abbau der Teere geht offensichtlich im unteren Teil des Reaktors deutlich besser vonstatten als im oberen, was sich klar anhand der vorherrschenden Temperaturen erklären lässt. Eine Analyse der Signalschwankungen, die die relativen Amplituden der anderen Produktgase überschreiten, steht noch aus. Der

Anteil des inerten Teeres in Abbildung 5 zeigt naturgemäß deutlich kleinere Änderungen über die Höhe.

Als weiteres Beispiel der Anwendung der in dieser Arbeit entstandenen Simulation dient die Abbildung 2, in der der bereits besprochene Fall zwei mit einem Fall basierend auf einem verringertem Anteil des inerten Teeres verglichen wird. Die anderen Teeranteile wurden entsprechend erhöht, um den gleichen Teermassenstrom bei gleicher Temperatur zu erhalten. Es zeigt sich der deutliche Einfluss (ca. 20% weniger Gesamtteer) auf die Teerproduktion. Das Modell reagiert also stark auf die Änderungen dieses Aspekts, womit gezeigt ist, dass das Teerabbaumodell als eines der sensitiven Modelle innerhalb der Simulation gelten muss. Weitere Ergebnisse sind der Arbeit Gerber (2010) zu entnehmen.

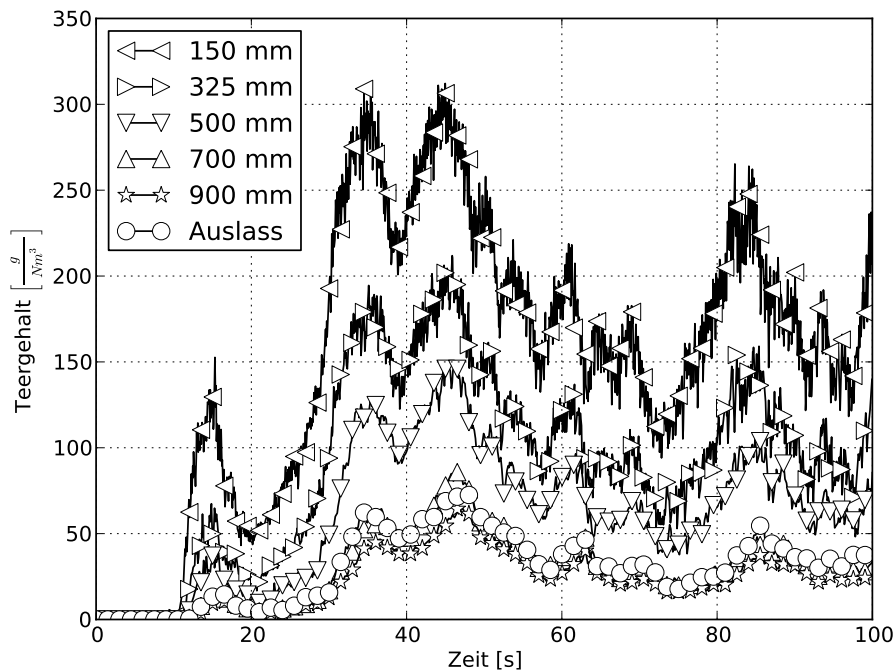


Abbildung 4: Teer 2 für verschiedene Höhenstufen im Reaktor (Fall 2)

4 Ausblick

Die entstandene Simulation ist in vielen Bereichen auf dem aktuellen Stand der Forschung der CFD-basierten Modellierung der Vergasung von Holz in Wirbelschichten. Nichts desto trotz müssen jenseits der Wiedergabe der Hauptgasphasenkomponenten noch Modellanpassungen vorgenommen werden, um die Differenzen bzgl. der Temperatur- und Konzentrationsdaten zu beseitigen. Nachdem dies

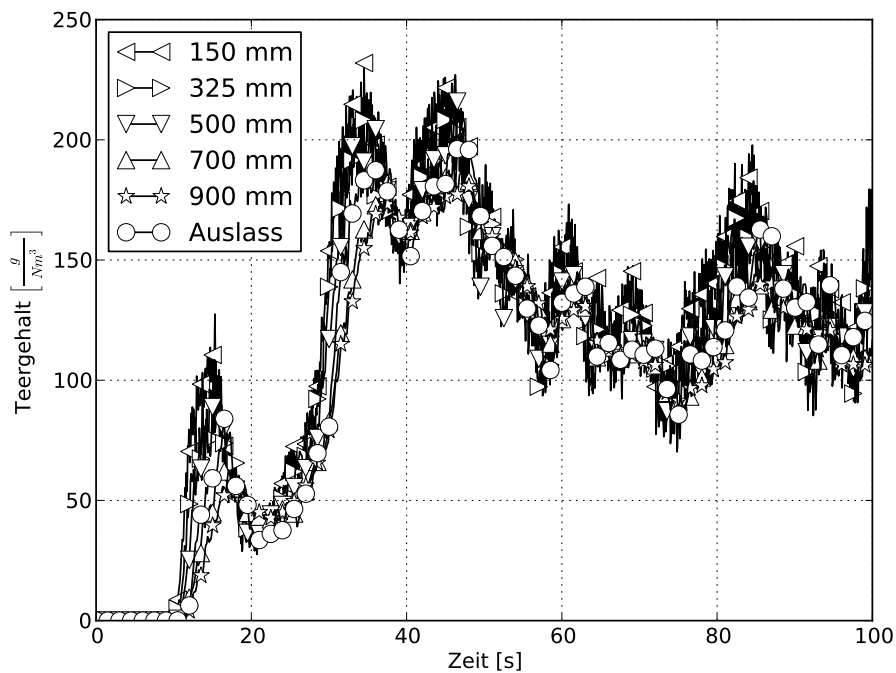


Abbildung 5: Teer 3 für verschiedene Höhenstufen im Reaktor (Fall 2)

geschehen ist, sollen die berechneten Szenarien von den Experimentatoren nachgestellt werden, um die Gültigkeit des Modells zu belegen bzw. Schwachstellen zu offenbaren. In erster Linie sollen daher in weiteren Arbeiten die Wärmeleitung und Wärmestrahlung innerhalb der festen Phase, die Dreidimensionalität des Problems und die stärkere Polydispersität der Festphase berücksichtigt werden.

5 Danksagung

Antragsteller und Stipendiat danken der Max-Buchner-Forschungstiftung ausdrücklich für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit.

Anfangs- oder Randbedingungen	Typ bzw. Wert der Anfangs- oder Randbedingung	Einheit
Anfangswerte		
Temperatur	800	K
Massenanteil Stickstoff	1	-
Geschwindigkeit	0	m/s
Druck	100010	Pa
Randbedingungen der Feldgleichungen im Fluid:		
Wandtemperatur	800	K
Einlasstemperatur	670	K
Massenanteil der Spezies im Auslass	hom. NR	-
Massenanteil der Spezies an der Wand	hom. NR	-
Massenanteil Sauerstoff im Einlass	0.233	-
Massenanteil Stickstoff im Einlass	0.767	-
sonstige Spezies im Einlass	0	-
Druck im Auslass	100000	Pa
Druck im Einlass	hom. NR	-
Geschwindigkeit an der Wand	no slip	-
Geschwindigkeit im Einlass	0.25	m/s
Geschwindigkeit im Auslass	hom. Neumannrandbedingung	-
Zeitschritte der Simulationsteile	Wert	Einheit
Fluidfeldberechnungen	$5 \cdot 10^{-5}$	s
Partikelbewegung	$1/3$ von $5 \cdot 10^{-5}$	s
Bilanzen des Partikels(Masse etc.)	variabel	-
homogene Chemie	variabel	-
hom. NR - homogene Neumannrandbedingung, DR - Dirichletrandbedingung		

Tabelle 4: Rand- und Anfangsbedingungen der fluiden Phase

Anfangswerte der Holzpartikel:		
scheinbare Dichte	777.78	kg/m ³
Masse	2.61e-05	kg
Durchmesser **	4	mm
Massenanteil Wasser	0.1	-
Massenanteil Holz	0.9	-
Massenanteil Holzkohle	0.0	-
Temperatur **	300	K
Geschwindigkeit	0	m/s
Rotationsgeschwindigkeit	0	1/s
Anfangswerte der Holzkohlepartikel:		
Anzahl der Partikel insgesamt (Fälle 1-6)	12 000	-
Anzahl der Partikel insgesamt (Fälle 7-14)	11 952	-
scheinbare Dichte	450	kg/m ³
Durchmesser (erste Partikelklasse)	1	mm
Durchmesser (zweite Partikelklasse)	1.5	mm
initialer Umsatzgrad	1.0	-
Massenanteil Wasser	0.0	-
Massenanteil Holz	0.0	-
Massenanteil Holzkohle	1.0	-
Temperatur **	950	K
Geschwindigkeit	0	m/s
Rotationsgeschwindigkeit	0	1/s
Kollisionsparameter Partikel-Partikel:		
Federsteifheit	600	N/m
Reibungsbeiwert	0.2	-
Verlustbeiwert **	0.8	-
Kollisionsparameter Partikel-Wand:		
Federsteifheit	300	N/m
Reibungsbeiwert	0.2	-
Verlustbeiwert **	0.6	-
** siehe Tabelle 6 bzgl. evtl. variiertes Parameter		

Tabelle 5: Parameter und Anfangswerte der festen Phase

Simulationsfall	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Holzkohleanfangs- temperatur in K	850	950	1050	950	950	950	950	950	950	950	950	950	950	950
Verlustbeiwert Partikel- Partikel-Kollision	0.8	0.8	0.8	0.8	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Verlustbeiwert Partikel- Wand-Kollision	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Holzmassenstrom in Partikel pro Sekunde	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.63	0.543	2.17	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	8.68
Massenanteil inerte Teer	0.177	0.177	0.177	0.0177	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177
Wandtemperatur in K	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	900	1000	800
Eingangstemperatur des Holzes in K	300	300	300	300	300	300	300	300	360	300	300	300	300	300
Einströmgeschwindigkeit der Luft	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.375	0.25	0.25	0.25	0.25
Einströmtemperatur der Luft in K	670	670	670	670	670	670	670	670	670	670	770	670	670	670
Durchmesser der Holzpartikel in mm	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2

Tabelle 6: variierte Parameter der Simulationen für alle 14 Fälle

Literatur

- [van den Aarsen u. a. 1985] AARSEN, E. G. d. ; BEENACKERS, A. A. C. M. ; SWAALJ, W. P. M.: Wood pyrolysis and carbon dioxide char gasification kinetics in a fluidized bed. In: OVEREND, R. P. (Hrsg.) ; MILNE, T. A. (Hrsg.) ; MULGE, L. K. (Hrsg.): *Fundamentals of thermochemical biomass conversion*. London : Elsevier, 1985, S. 691–715
- [DiBlasi 1999] DiBLASI, C.: Reactivities of some biomass chars in air. In: *Carbon* 37 (1999), S. 1227–1238
- [DiBlasi u. Branca 2001] DiBLASI, C. ; BRANCA, C.: Kinetics from primary product formation from wood pyrolysis. In: *Ind. Eng. Chem. Res.* 40 (2001), S. 5547–5556
- [Gerber 2010] GERBER, S.: *Grobstruktursimulation der Biomassevergasung in einer Wirbelschicht am Beispiel von Holz*, Technische Universität Berlin, Diss., 2010
- [Gerber u. a. 2010] GERBER, S. ; BEHRENDT, F. ; OEVERMANN, M: An Eulerian modeling approach of wood gasification in a bubbling fluidized bed reactor using char as bed material. In: *Fuel* 83 (2010), S. 9393
- [Gomez-Barea u. Leckner 2009] GOMEZ-BAREA, A. ; LECKNER, B.: Gasification of biomass in fluidised bed: Review of modelling. In: *Proceedings of the 20th International Conference on Fluidised Bed Combustion* Bd. 20, 2009, S. 13–26
- [Hawley u. a. 1983] HAWLEY, M. C. ; BOYD, M. ; ANDERSON, C. ; DEVERA, A.: Gasification of wood char and effects of intraparticle transport. In: *Fuel* 62 (1983), S. 213–216
- [Mermoud u. a. 2006] MERMOUD, F. ; SALVADOR, S. ; STEEN, L. Van d. ; GOLFIER, F.: Influence of the pyrolysis heating rate on the steam gasification rate of large wood char particles. In: *Fuel* 85 (2006), S. 1473–1482
- [Milne u. a. 1988] MILNE, T. A. ; EVANS, R. ; ABATZOGLOU, N.: Biomass Gasifier 'Tars': Their nature, formation and conversion. NREL, NREL/TP-570-25357, 1988. – Forschungsbericht
- [Neubauer 2008] NEUBAUER, Y.: *Online-Analyse von Teer aus der Biomassevergasung mit Lasermassenspektrometrie*, Technische Universität Berlin, Diss., 2008
- [Peters 2003] PETERS, B.: *Thermal conversion of solid fuels*. First. WIT-Press, 2003
- [Rath u. Staudinger 2001] RATH, J. ; STAUDINGER, G.: Cracking reactions of tar from pyrolysis of spruce wood. In: *Fuel* 80 (2001), S. 1379–1389

[Zhou u. a. 2004] ZHOU, H. ; FLAMANT, G. ; GAUTHIER, D.: DEM-LES simulation of coal combustion in a bubbling fluidized bed Part II: coal combustion at the particle level. In: *Chemical Engineering Science* 59 (2004), S. 4205–4215