

Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

Nr. 1, Ruhr-Universität Bochum, LS für Energieanlagen & Energieprozesstechnik

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **16147 N**

Auswirkungen mechanischer Mischung auf Wärmeübertragung und auf thermochemische Prozesse in Schüttungen von Rost- und Kleinfeuerungssystemen

(Bewilligungszeitraum: 01.07.09 - 30.06.12)

der AiF-Forschungsvereinigung

VGB-FORSCHUNGSSTIFTUNG

Bochum, 01.08.2012

Ort, Datum

Prof. Viktor Scherer

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Forschungsthema	1
2	Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse	2
3	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	3
4	Forschungsziel	4
4.1	Angestrebte Forschungsergebnisse	4
4.2	Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse	5
5	Lösungsweg und Ergebnisse	7
5.1	Veröffentlichungen	8
5.2	Verwendung der Zuwendung	8
5.3	Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen	14
5.3.1	Versuchsstands Aufbau und Messkonzept	14
5.3.2	Experimentelle Ergebnisse	17
5.3.3	DEM-Simulation ausgewählter Experimente	25
5.3.4	Analyse des Einflusses von Mischung auf die Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen	34
5.4	Stoffübertragung in bewegten Schüttungen	38
5.4.1	Vorbereitende Versuche zur Stoffübertragung in bewegten Schüttungen	39
5.4.2	Versuchsstands Aufbau und Messkonzept	41
5.4.3	Experimentelle Ergebnisse	45
5.4.4	DEM-Simulation ausgewählter Experimente	56
5.4.5	Analyse des Einflusses von Mischung auf die Stoffübertragung in bewegten Schüttungen	67
5.5	Analyse Einfluss von Mischung auf Wärme- und Stoffübertragung in bewegten Schüttungen	69
5.5.1	Kanalisation des Luftstroms durch verfahrenende Stäbe	70
5.5.2	Abkühlen oder Aufheizen der Luft und Partikel durch Stäbe	71

5.5.3	Erhöhung des Lückengrands	73
5.5.4	Homogenisierung des Temperatur- / Feuchteprofils in Strömungsrichtung	75
5.5.5	Homogenisierung des Temperatur- / Feuchteprofils über den Partikelumfang	77
5.5.6	Beurteilung der Einflussfaktoren am Versuchsstand	80
5.6	Feuerungssimulationen	82
5.6.1	DEM-Simulationsmodell	82
5.6.2	Ergebnisse Kleilfeuerung	85
5.6.3	Ergebnisse Rostfeuerung	88
6	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU	98
7	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	100
8	Umsetzung des Transferkonzepts	102
9	Literaturverzeichnis	103

1 Forschungsthema

Auswirkungen mechanischer Mischung auf Wärmeübertragung und auf thermochemische Prozesse in Schüttungen von Rost- und Kleinf Feuerungssystemen

Förderhinweis:

Das IGF-Vorhaben 16147 N/1 der Forschungsvereinigung VGB-FORSCHUNGSSTIFTUNG, Klinkerstraße 27 – 31, 45136 Essen, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

2 Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse

Aktuelle Berechnungsmethoden gestatten eine eng gekoppelte Simulation der mechanischen Bewegung von Festkörperschüttungen und deren thermochemische Wechselwirkung mit einem hindurchströmenden Medium. Da diese Verfahren auf korrekte Wiedergabe der physikalischen Vorgänge hin überprüft werden müssen und die Kenntnis der vielfältigen Prozesswechselwirkungen in ihrem Zusammenspiel noch nicht hinreichend ist, wurden entsprechende Untersuchungen durchgeführt.

Es wurden zwei Prozesse im Detail analysiert, die den gleichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten unterliegen: das konvektive Aufheizen einer Polymerkugelschüttung und das konvektive Trocknen einer Schüttung aus Silicagel. Trotz vergleichbarer Versuchsparameter wurde im ersten Fall der konvektive Wärmeübergang durch die Mischung gehemmt und im zweiten Fall der konvektive Stoffübergang gefördert. Zur phänomenologischen Analyse der unterschiedlichen Beobachtung wurden zwei versuchsstandspezifische und drei systemübergreifende Einflussfaktoren identifiziert. Bei mechanischer Mischung förderten bzw. hemmten die einzelnen Einflussfaktoren jeweils den konvektiven Übergang im unterschiedlichen Maß und führten daher in einem Fall zur Senkung der übertragenen Wärmemenge und im anderen Fall zur Steigerung der übertragenen Stoffmenge. Der Vergleich zwischen Simulationen und Experimenten ergab bezüglich der Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen eine sehr gute Übereinstimmung. Bei der Simulation der Trocknungsexperimente zeigten sich z.T. von den Experimenten abweichende Ergebnisse. Als Ursache wurden Konzentrationsprofile über den Umfang der Einzelpartikel identifiziert, die in den Simulationen nicht abgebildet wurden. Bei der Wärmeübertragung wirken sich (in dem betrachteten Parameterbereich) Umfangsverteilungen kaum aus, bei der deutlich stärker transportbehinderten Trocknung werden sie jedoch entscheidend. Eine höhere Detailtiefe und Weiterentwicklung der numerischen Modelle ist erforderlich.

Die Simulation der Verbrennung in einer Biomassenkleinfeuerung ergab nach Modellverbesserungen eine gute Annäherung experimentellen Literaturdaten. Weiterhin wurden gekoppelte Feststoff-Gas Simulationen zur Untersuchung des Einfluss der Roststabbewegung in einer Vorschubrostfeuerung verwendet. Mit der Transportgeschwindigkeit stieg der Anteil an Unverbranntem im Austrag, die Pyrolysezone wurde verbreitert und die maximale Feuerraumtemperatur sank. Für die detaillierte Überprüfung der Simulationsergebnisse und der verwendeten Modelle ist allerdings der experimentelle Datenpool für bewegte Brennstoffschüttungen noch unzureichend.

Die Auswirkung mechanischer Mischung auf thermo-chemische Prozesse in Schüttungen wurde experimentell und numerisch im Detail untersucht. Das Ziel des Vorhabens wurde somit erreicht.

3 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Wärme- und Stoffübertragung in bewegten Schüttungen spielen in vielen Anwendungen der Energieverfahrenstechnik eine zentrale Rolle und wirken sind bestimmend für parallel ablaufende chemische Prozesse. Erwähnt seien Anwendungen wie Drehrohre zum Brennen von Zementklinker, Schachtofen zu Entsäuerung von Kalkstein, Pelletfeuerungen im Bereich der Haushaltsheizungen, Rostfeuerungsanlagen für Müll- und Biomasseverbrennung oder Trommelröstanlagen aus dem Bereich der Lebensmittelindustrie. All diesen Verfahren ist gemein, dass zur wirtschaftlich optimalen Auslegung entsprechender Anlagen die genaue Kenntnis der Bewegungs-, Wärmeübertragungs- und Reaktionsvorgänge in der Schüttung erforderlich ist. Nur so können z. B. Baugrößen durch Verminderung von Sicherheitszuschlägen reduziert werden oder Aufenthaltszeiten und damit Produktionsumsatzzeiten der Einsatzstoffe minimiert werden. Eine effiziente Alternative zu experimentellen Untersuchungen stellen zunehmend numerische Simulationsverfahren dar. Eine numerische Beschreibung der mechanischen Bewegung muss von sehr vielen kleinen, diskreten Elementen ausgehen, um aus ihrem Zusammenwirken auf die Bewegung der Schüttung zu schließen. Der entsprechende Ansatz ist unter dem Namen „Diskrete Element Methode“, DEM, bekannt. Am Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik (LEAT) der Ruhr-Universität Bochum wurde in den letzten Jahren ein entsprechender paralleler 3D-DEM-Code entwickelt, der mit einem kommerziellen CFD-Code gekoppelt ist. Im Rahmen des vorliegenden Projektes sollen folgende Kernpunkte bearbeitet werden:

- mit einer experimentellen Konfiguration, bei der simultan eine mechanisch induzierte Mischung und, als Modellprozess, die Trocknung eines feuchten Schüttgutes erfolgt, wird eine Überprüfung des 3D-DEM-Rechenprogramms in Bezug auf gekoppelten Wärme- und Stofftransport durchgeführt;
- durch eine Variation der Betriebsparameter wie Roststabgeschwindigkeiten, Roststabhöhe und Gasdurchströmung soll der Einfluss der mechanischen Mischung auf den simultan dazu ablaufenden Wärme- und Stofftransport untersucht werden;
- zur Demonstration der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Verbrennungssysteme werden als industriell wichtige Anwendungen Rostfeuerungsanlagen und Kleinf Feuerungen für Biomasse simuliert und mit Messergebnissen aus der Literatur verglichen.

4 Forschungsziel

4.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Ziel dieses Projektes ist es, die Auswirkungen mechanischer Mischung auf die Wärme- und Stofftransportprozesse in Schüttungen experimentell und numerisch zu untersuchen. Hierzu wird das durch Experimente hinsichtlich mechanischer Mischung validierte DEM-Programm (abgeschlossenes AiF-Projekt 15061 N „Untersuchung von Schürung und Mischung auf Rostsystemen“) genutzt und die in diesem Projekt entwickelte Versuchseinrichtung so modifiziert und erweitert, dass der Einfluss mechanisch induzierter Mischung auf die simultane Wärme- und Stoffübertragung und damit die Grundvorgänge thermochemischer Prozesse untersucht werden kann. Um die Ergebnisse auf ihre Übertragbarkeit in die Praxis überprüfen zu können, orientieren sich Versuchsaufbau und Rechnungen an Rostsystemen und Kleinf Feuerungen (z. B. Unterschub- oder Seitenschubfeuerung). Ziel ist es, solche Systeme im Detail zu analysieren und in Abhängigkeit von den äußeren (geometrischen und betrieblichen) Randbedingungen und Materialeigenschaften zu charakterisieren. Nach erfolgreicher Validierung des Wärme- und Stofftransports werden die genannten technischen Systeme numerisch unter Berücksichtigung der Verbrennungsreaktion simuliert und mit Literaturwerten verglichen. Letztlich sollen sich Möglichkeiten zur Verbesserung der Systeme hinsichtlich des verwendbaren Brennstoffbandes, der Emissionen und der Ausbrandgüte durch gezielte Auslegung und Steuerung der Systeme eröffnen.

Es sei jedoch explizit darauf hingewiesen, dass die grundlegenden Methodik der Untersuchungen sowie die Erkenntnisse aus den Untersuchungen zum Einfluss mechanisch induzierter Mischung in Schüttungen auf Wärmeübertragung und chemische Prozesse auch auf andere Anwendungsbeispiele der Energieverfahrenstechnik übertragbar sind.

Die angestrebten wesentlichen Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Verständnis der zeitlichen und örtlichen Prozesse und deren Interaktion innerhalb einer reagierenden und bewegten Schüttung,
- direkte Anwendung auf Trocknungsprozesse,
- quantitative Aussagen über die Auswirkungen der mechanischen Mischung auf Stoff- und Wärmeübertragung und somit auch thermochemische Prozesse in Schüttungen,

- Erkenntnisse über den Einfluss stofflicher Parameter (Dichte, Korngrößenverteilung, Zusammensetzung, Heizwert usw.) auf die Wärmeübertragung und chemische Reaktion (Verbrennung) in Schüttungen,
- kostengünstiges, validiertes Hilfsmittel zur Analyse der Wärmeübertragung und der chemischen Prozesse innerhalb bewegter Schüttungen als Basis für Verbesserungen der Auslegung und des Betriebs solcher Anlagen,
- Anwendung des validierten Programmes auf zwei konkrete technische Systeme (Verbrennung auf Rosten, Pellet-Kleinfeuerungen) unter Variation betrieblicher und geometrischer Randbedingungen, um den Nachweis der Praxis-tauglichkeit zu erbringen.
- Ein überprüftes Werkzeug zur Bestimmung der Transportkenngrößen auf Rosten, deren Kenntnis als Basis einer feuerungstechnischen Auslegung notwendig ist.

4.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Der innovative Beitrag des vorgeschlagenen Forschungsvorhabens besteht in der gleichzeitigen Modellierung der dreidimensionalen mechanischen Bewegung und der thermischen sowie thermochemischen Prozesse in bewegten Schüttungen sowie ihrer experimentellen Validierung.

Generell gilt, dass die hier zu betrachtenden Einzelprozesse der Wärmeübertragung und der Reaktion aus wissenschaftlicher Sicht hinreichend bekannt sind. Dagegen können die Wechselwirkungen zwischen den Einzelprozessen der Wärmeübertragung, der Trocknung, der Pyrolyse, der heterogenen Oberflächenreaktionen wie z. B. des Koksabbrandes selbst mit hohem messtechnischem Aufwand nur näherungsweise bestimmt werden, insbesondere bei einer zusätzlichen Überlagerung mechanisch induzierter Durchmischung. Genau an dieser Stelle sollen die geplanten experimentellen und theoretischen Untersuchungen eine konkrete Wissenslücke schließen, da mit einem auf der Diskreten Elemente Methode basierendem Modell nicht nur die Einzelprozesse in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Prozessparametern sondern auch deren Interaktion abgebildet werden können.

Für das Anwendungsbeispiel Rostfeuerung bedeutet dies z. B. konkret, den Verbrennungsprozess gezielt in Abhängigkeit von der Geometrie und den Betriebsparametern steuern zu können, da die gemeinsame Wirkung des Brennstofftransportes sowie die Menge und Aufteilung der Primärluft auf den Wärmeübergang sowie deren Wechselwirkung mit den im Bett ablaufenden Prozessen im Detail erklärbar werden. In der Vergangenheit waren diese Wechselwirkungen hauptsächlich aus empirischen Erfahrungen oder stark vereinfachten Modellen bekannt. Für den Anlagenbauer und Betreiber soll somit ein kostengünstiges und zeitgemäßes Werkzeug zur Vorhersage der Auswirkung veränderter Prozessparameter und Brennstoffzusammensetzung auf den Anlagenbetrieb zur Verfügung gestellt werden. Somit sind auch Parameterstudien für die Auslegung und Optimierung der Anlagen durchführbar.

5 Lösungsweg und Ergebnisse

Im Projektzeitraum Juni 2009 bis Dezember 2009 wurde zunächst die Versuchseinrichtung zur Untersuchung der Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen aufgebaut und in Betrieb genommen. An dem Wärmeübertragungsversuchsstand wurden erste Versuchsreihen durchgeführt sowie eine Auswertemethodik entwickelt und erprobt. Zusätzlich wurde eine Messtrecke zur Auswahl und Erprobung verschiedener Granulattypen für die Untersuchung der Stoffübertragung in bewegten Schüttungen aufgebaut.

Im Bearbeitungszeitraum Januar 2010 bis Dezember 2010 wurden umfangreiche Versuchsreihen zur Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen unter Variation von Betriebs- und Materialparametern durchgeführt. Zusätzlich wurden am Wärmeübertragungsversuchsstand zahlreiche Umbaumaßnahmen durchgeführt um die Anzahl der messtechnisch erfassbaren Größen zu erhöhen. Weiterhin wurden DEM-Simulationen ausgewählter Experimente durchgeführt und es erfolgte eine numerische Parameterstudie zur detaillierten Analyse der Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen. Für die experimentelle Untersuchung der Stoffübertragung wurde das zu verwendende Trockengut bestimmt und die Verwendung eines zugegebenen Feuchteindikators erprobt.

Im Bearbeitungszeitraum Januar 2011 bis Dezember 2011 wurde der Versuchsstand zur Untersuchung der Stoffübertragung in bewegten Schüttungen aufgebaut und in Betrieb genommen. An dem Stoffübertragungsversuchsstand wurden erste Versuchsreihen durchgeführt und die Methodik zur Bestimmung der Partikeloberflächenfeuchtigkeit über eine Bildanalyse entwickelt und erprobt. Das für die Simulation von Trocknungsexperimenten erforderliche, abgewandelte Wärmeleitungsmodell wurde überprüft und eine entsprechende Anpassung des im DEM-Code implementierten Trocknungsmodells identifiziert. Weiterhin erfolgten erste Simulationen einer Biomassenfeuerung anhand von experimentellen Daten aus der Literatur.

Im Bearbeitungszeitraum Januar 2012 bis Juni 2012 wurden weitere Versuchsreihen zur Stoffübertragung in bewegten Schüttungen unter Variation von Stoff- und Betriebsparametern durchgeführt. Ausgewählte Trocknungsexperimente wurden simuliert. Dafür musste das Trocknungsmodell mehrfach modifiziert und überprüft werden. Es erfolgten weitere Simulationen einer in der Literatur beschriebenen Biomassenkleinfeuerung mit einem verbesserten DEM-Verbrennungsmodell. Zum Abschluss wurde eine Rostfeuerung unter Variation von Betriebsparametern simuliert und der Einfluss der mechanischen Mischung auf den Verbrennungsprozess analysiert.

Im Folgenden werden zunächst die Arbeiten zusammengestellt, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen. Im Abschnitt 5.2 wird auf die Verwendung der Zuwendungen eingegangen und auf die zugehörigen Ergebnisse verwiesen. Diese sind im Anschluss thematisch geordnet beschrieben: Es werden im Abschnitt 5.3 die experimentellen und numerischen Arbeiten zur Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen zusammengestellt. Im Abschnitt 5.4 erfolgt eine Übersicht über die Arbeiten zur Stoffübertragung in bewegten Schüttungen: Versuchsstandsaufbau, Experimente und Simulationen. Im folgenden Abschnitt 5.5 wird der Einfluss von Mischung auf Wärme- und Stoffübertragung in bewegten Schüttungen analysiert, es werden allgemeine und versuchsspezifische Einflussfaktoren identifiziert. Im abschließenden Abschnitt 5.6 werden die durchgeführten Verbrennungssimulationen der Kleinf Feuerungsanlage und der Rostfeuerung beschrieben.

5.1 Veröffentlichungen

Sudbrock F.; Simsek E.; Rickelt S.; Wirtz S.; Scherer V.: “Discrete element analysis of experiments on mixing and stoking of monodisperse spheres on a grate”, Powder Technology 208, Issue 1, 111–120, 2011

Simsek E.; Sudbrock F.; Wirtz S.; Scherer V.: “Influence of particle diameter and material properties on mixing of monodisperse spheres on a grate: Experiments and discrete element simulation”, Powder Technology 221, 144–154, 2012

Brosch, B.; Sudbrock F.; Wirtz S.; Scherer V.: “NN“, VGB PowerTech

5.2 Verwendung der Zuwendung

Teilziel/Arbeitspaket 1: Versuche zur Untersuchung der Wärmeübertragung in einer bewegten Schüttung

- Verwendung der Zuwendung
 - wissenschaftlich-technisches Personal

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Florian Sudbrock koordinierte den Versuchsstandsaufbau und –umbau und war für die Vorbereitung und Leitung der Experimente zuständig. (6 Personenmonate)

- Geräte

Für die Bestimmung der Partikeltemperatur wurde das Thermografiesystem der Firma Infratec eingesetzt.

- Erzielte Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.3.1 und 5.3.2 beschrieben. Das Teilziel ist zu 100% erreicht.

Teilziel/Arbeitspaket 2: Auswertung/ Experimentell gestützte Analyse

- Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Florian Sudbrock entwickelte und modifizierte die Bildauswertungsmethodik und koordinierte die Versuchsauswertung. (3 Personenmonate)

- Erzielte Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.3.1 und 5.3.2 beschrieben. Das Teilziel ist zu 100% erreicht.

Teilziel/Arbeitspaket 3: DEM-Simulationen der experimentell durchgeführten Varianten/ Auswertung

- Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Florian Sudbrock führte die DEM-Simulationen und die Auswertung durch. (4 Personenmonate)

- Leistung Dritter

Für die gekoppelte DEM-CFD-Simulation wurde eine Ansys Academic CFD Research Lizenz eingesetzt.

- Erzielte Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.3.3 beschrieben. Das Teilziel ist zu 100% erreicht.

Teilziel/Arbeitspaket 4: Vergleich der Messung-Rechnung/ Analyse von Unterschieden/ Validierung des DEM-Codes bezüglich Wärmeübertragung

- Verwendung der Zuwendung
 - wissenschaftlich-technisches Personal

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Florian Sudbrock führte den Vergleich zwischen Experiment und Simulation durch und analysierte die Unterschiede. (2 Personenmonate)

- Erzielte Ergebnisse
- Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.3.3 und 5.3.4 beschrieben. Das Teilziel ist zu 100% erreicht.

Teilziel/Arbeitspaket 5: Versuche zur Untersuchung der Stoffübertragung in einer bewegten Schüttung

- Verwendung der Zuwendung
 - wissenschaftlich-technisches Personal

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Florian Sudbrock koordinierte den Versuchsstands-aufbau und war für die Vorbereitung und Leitung der vorbereitenden Versuche und Experimente zuständig. (5 Personenmonate)

- Geräte

Für die Bestimmung der Partikeltemperatur wurde das Thermografiesystem der Firma Infratec eingesetzt.

- Erzielte Ergebnisse
- Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.4.1, 5.4.2 und 5.4.3 beschrieben. Das Teilziel ist zu 100% erreicht.

Teilziel/Arbeitspaket 6: Auswertung/ Experimentell gestützte Analyse

- wissenschaftlich-technisches Personal

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Florian Sudbrock entwickelte und modifizierte die Bildauswertungsmethodik, das neue Messkonzept und koordinierte die Versuchsauswertung. (2 Personenmonate)

- Erzielte Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.4.2 und 5.4.3 beschrieben. Das Teilziel ist zu 100% erreicht.

Teilziel/Arbeitspaket 7: DEM-Simulationen der experimentell durchgeführten Varianten/ Auswertung

- Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Florian Sudbrock führte die Anpassung des Wärmeleitungs- und Trocknungsmodells, die entsprechenden DEM-Simulationen und die Auswertung durch. (4 Personenmonate)

- Leistung Dritter

Für die gekoppelte DEM-CFD-Simulation wurde eine Ansys Academic CFD Research Lizenz eingesetzt.

- Erzielte Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.4.4 beschrieben. Das Teilziel ist zu 100% erreicht.

Teilziel/Arbeitspaket 8: Vergleich der Messung-Rechnung/ Analyse von Unterschieden/ Validierung des DEM-Codes bezüglich Trocknung

- Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Florian Sudbrock führte den Vergleich zwischen Experiment und Simulation durch und analysierte die Unterschiede. (1 Personenmonat)

- Erzielte Ergebnisse
- Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.4.4 und 5.4.5 beschrieben. Das Teilziel ist zu 100% erreicht.

Teilziel/Arbeitspaket 9: Anwendung des DEM-Codes auf heterogene Verbrennungsprozesse

- Verwendung der Zuwendung
 - wissenschaftlich-technisches Personal

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Florian Sudbrock führte DEM-Simulationen und die Auswertung durch. (1 Personenmonat)

- Erzielte Ergebnisse
 - Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.6.2 beschrieben. Das Teilziel ist zu 100% erreicht.

Teilziel/Arbeitspaket 10: Simulationen unterschiedlicher Rostkonfigurationen

- Verwendung der Zuwendung
 - wissenschaftlich-technisches Personal

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Florian Sudbrock führte DEM-Simulationen und die Auswertung durch. (1 Personenmonat)

- Leistung Dritter

Für die gekoppelte DEM-CFD-Simulation wurde eine Ansys Academic CFD Research Lizenz eingesetzt.

- Erzielte Ergebnisse
 - Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.6.3 beschrieben. Das Teilziel ist zu 100% erreicht.

Teilziel/Arbeitspaket 11: Simulation von Kleinf Feuerungen

- Verwendung der Zuwendung
 - wissenschaftlich-technisches Personal

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Florian Sudbrock führte DEM-Simulationen und die Auswertung durch. (2 Personenmonate)

- Erzielte Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.6.2 beschrieben. Das Teilziel ist zu 100% erreicht.

Teilziel/Arbeitspaket 12: Analyse der Wärmeübertragung und Reaktion des Brennstoffbetts

- Verwendung der Zuwendung
 - wissenschaftlich-technisches Personal

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Florian Sudbrock führte die Analyse der Reaktionen im Brennstoffbett durch. (1 Personenmonat)

- Erzielte Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.6.3 beschrieben. Das Teilziel ist zu 100% erreicht.

Teilziel/Arbeitspaket 13: Verallgemeinerung/ Abstraktion

- Verwendung der Zuwendung
 - wissenschaftlich-technisches Personal

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Florian Sudbrock führte die Verallgemeinerung der Erkenntnisse hinsichtlich der Wärmeübertragung und thermochemischer Prozesse innerhalb bewegter Schüttungen durch. (2 Personenmonate)

- Erzielte Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.5 beschrieben. Das Teilziel ist zu 100% erreicht.

Teilziel/Arbeitspaket 14: Abschlussbericht

- Verwendung der Zuwendung
 - wissenschaftlich-technisches Personal

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Florian Sudbrock erstellte den Abschlussbericht. (2 Personenmonate)

5.3 Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen

Für die experimentelle Untersuchung der Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen wurde im Projekt ein Versuchsstand konzipiert und aufgebaut. Aufbau und Messkonzept sind in Abschnitt 5.3.1 beschrieben. Es wurden Versuchsreihen bei variierten Betriebsparametern (Mischungsintensität, Leerrohrgeschwindigkeit, Schütthöhe, Partikeldurchmesser) durchgeführt. Die Ergebnisse der experimentellen Versuchsreihen werden in Abschnitt 5.3.2 vorgestellt. Ausgewählte Experimente wurden durch Kopplung des LEAT DEM-Codes mit dem kommerziellen CFD-Code FLUENT simuliert um die Simulationsmethodik hinsichtlich der implementierten Modelle zur Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen zu überprüfen. Die DEM-CFD Simulationsmethodik und Vergleiche zwischen Simulation und Experiment anhand ausgewählter Messwerte werden in Abschnitt 5.3.3 aufgeführt. Abschließend erfolgt in Abschnitt 5.3.4 eine detaillierte Analyse des Einflusses von Mischung auf die Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen durch Kombination von experimentellen Messdaten und den Ergebnissen einer numerischen Parameterstudie mit der überprüften DEM-CFD Simulationsmethodik.

5.3.1 Versuchsstands Aufbau und Messkonzept

Der Aufbau des Versuchsstands ist in Abb. 5.1 a schematisch dargestellt. Die Partikelschüttung (Kugeln aus Polyoxymethylen (POM) mit einem Durchmesser von 5, 10 und 20 mm) wird durch 15 Aluminiumstäbe mechanisch gemischt und dabei durch einen aufgeheizten Luftstrom, der die Schüttung von oben nach unten durchströmt, konvektiv erwärmt.

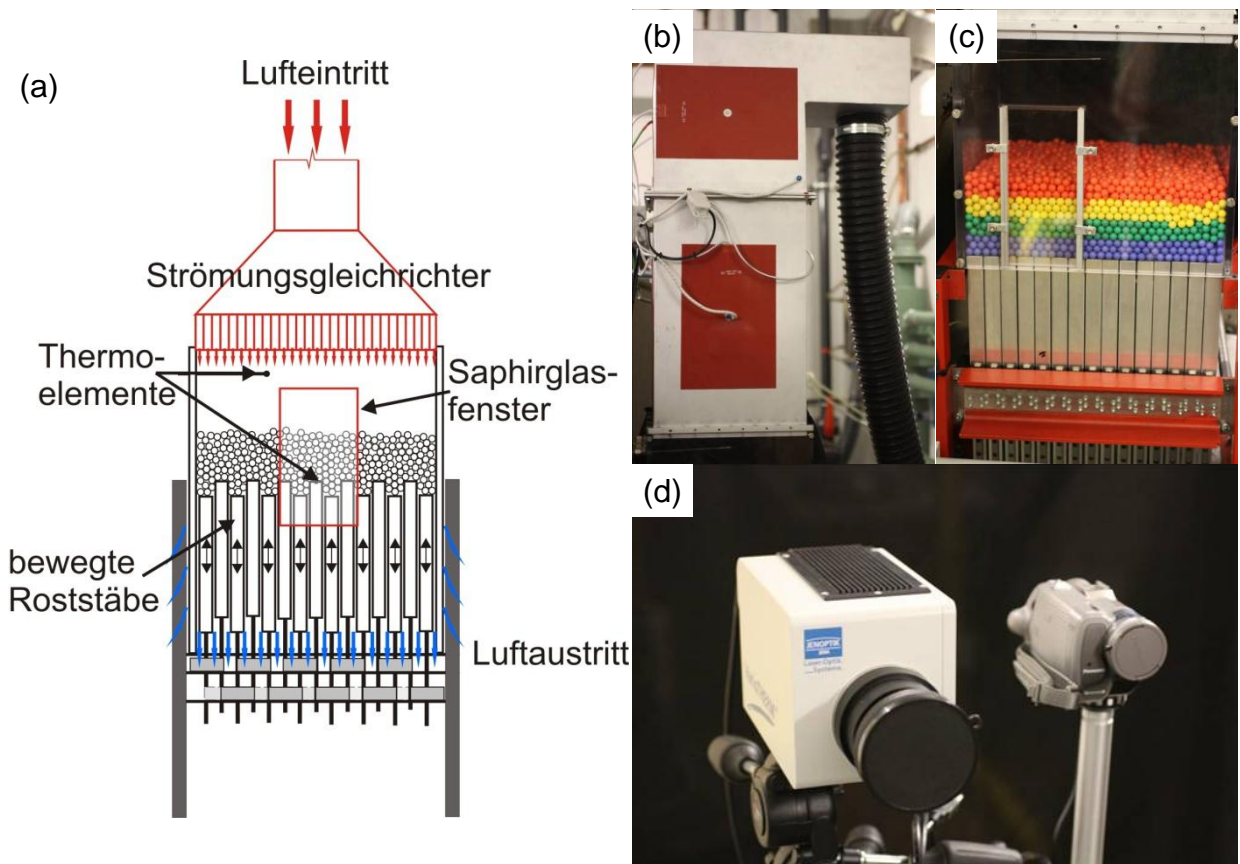


Abb. 5.1: a) Versuchsstandkonzept, b) Strömungsgleichrichter, c) POM Schüttung (Initiale Anordnung), d) Thermografiesystem und digitaler Camcorder

Die Roststäbe lassen sich jeweils durch einen einzeln ansteuerbaren Schrittmotor verfahren, wobei Beschleunigung, Geschwindigkeit und Hublänge individuell vorgegeben werden können. Durch zeitgleiches Verfahren mehrerer Stäbe mit festgesetztem Bewegungsablauf wurden 2 Bewegungsmuster bzw. Mischungsmodi definiert. Dies war zum einen der Gegenhubmodus, der sich an der Betriebsart von industriellen Schubrosten orientiert und somit für die Quantifizierung des Einflusses von Mischung auf die Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen auf Rostsystemen diente. Zum anderen der Wellenmodus, charakterisiert durch eine großflächige Umwälzung der Partikel in vertikaler und horizontaler Richtung, der sich daher insbesondere für die Überprüfung des mechanischen Einflusses bei der gleichzeitigen konvektiven Aufheizung in der DEM-Simulationsmethodik eignete. Durch die gleichzeitige Steigerung der Hublänge (66, 100, 132 mm) und der Roststabgeschwindigkeit (10, 15, 20 mm/s; die Hubdauer wurde somit konstant gehalten) wurde die Mischungsintensität variiert. Zur kontinuierlichen optischen Beurteilung des Grades der Durchmischung wurden POM-Kugeln in 4 Farben verwendet, die vor Versuchsbeginn schichtweise in den Versuchstand gefüllt wurden (Abb. 5.1 c). Nähere Angaben zu den Mischungsmodi und den Einfluss der Hublänge auf die Mischungsintensität las-

sen sich dem Abschlussbericht des AiF-Projekts 15061/N „Untersuchung von Schüttung und Mischung auf Rostsystemen“ entnehmen.

Partikel und Versuchsstand befanden sich vor Versuchsbeginn jeweils auf Umgebungstemperatur. Die Aufheizung der Partikel erfolgte nach Versuchsbeginn durch einen aufgeheizten Luftstrom, der von oben, durch einen luftdicht abschließenden Aufsatz (Abb. 5.1 b), die Schüttung durchströmt. Um ein gleichmäßiges Anströmprofil gewährleisten zu können, sind in dem Aufsatz über dem Versuchstand hintereinander ein Lochblech und ein Wabenblech angeordnet. Die Ausströmung der Heißluft aus dem Versuchsstand erfolgt durch Schlitze zwischen den beweglichen Stäben.

Für eine detaillierten Überprüfung der DEM-Simulationen hinsichtlich der implementierten Modelle zur Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen wurde ein Messkonzept entwickelt, das es ermöglichte die individuelle Partikeloberflächentemperaturen zu bestimmen und somit Temperaturprofile über der Schüttung in Strömungsrichtung zu quantifizieren. Dazu wurden die Experimente simultan mit einem digitalen Camcorder und einem Thermografiesystem aufgezeichnet (Abb. 5.1 d). Das digitale Video wurde in Einzelbilder zerlegt und über eine Bildanalyse die Positionen der an der Saphirglasscheibe des Versuchsstands anliegenden Partikel bestimmt. Die Temperaturdaten lagen in tabellarischer Form für jeden Bildpunkt des Thermografiesystems vor. Die Daten der Bildanalyse und der Thermokamera wurden über fest definierte geometrische Punkte miteinander gekoppelt, sodass zeitlich kontinuierlich Partikelposition und zugehörige Oberflächentemperatur berechnet werden konnte (Abb. 5.2).

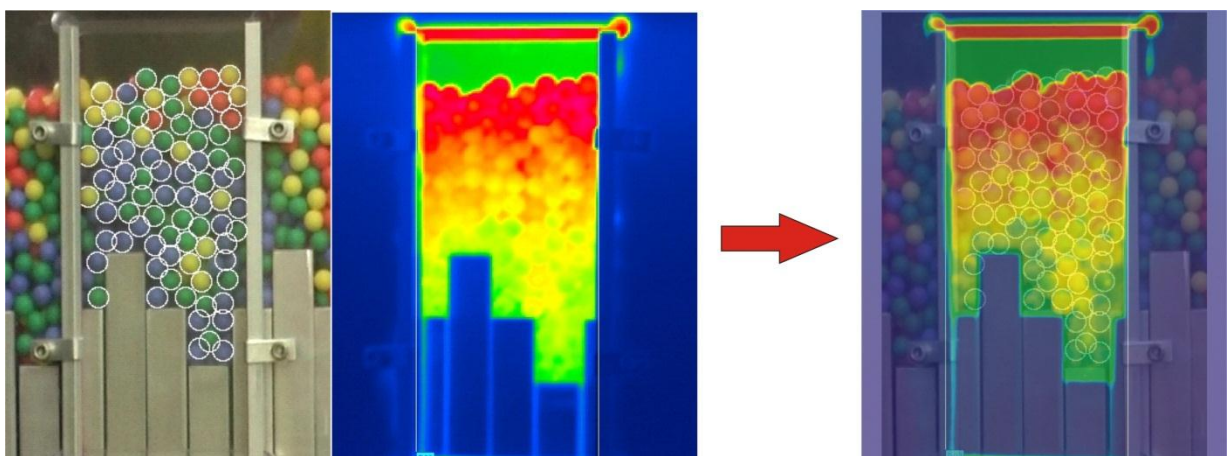


Abb. 5.2: Bildauswertung

Das System für die thermografischen Aufnahmen wurde dabei im Projekt beschafft. Es handelt sich um das Modell „VarioTherm Head II“ der Firma Infratec GmbH. Um

die Positionserkennung der POM-Kugeln anhand von Videoaufnahmen zu ermöglichen ist der Bereich über den Stäben, in dem sich die aufgewärmte Schüttung aus POM-Kugeln befindet, mit Sichtscheiben aus Polycarbonat umschlossen. Da herkömmliche Scheibenmaterialien wie Polycarbonat, Plexiglas, SiO etc. im Bereich der langwelligen Wärmestrahlung undurchlässig sind, musste die Temperaturmessung mit dem Thermografiesystem durch ein geeignetes Sichtfenster erfolgen. Für die Positionserkennung sollte das Scheibenmaterial zusätzlich Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich transmittieren. Als Material wurde daher Saphirglas gewählt und ein Sichtfenster mit dem Abmaß 10 cm x 20 cm vorgesehen. Der Emissionsgrad der POM-Kugeln bzw. der Transmissionsgrads des Sichtfensters wurde anhand von Literaturquellen bestimmt und durch Kalibrierungsexperimente im kalten und warmen, stationären Zustand überprüft bzw. angepasst.

Zum Zwecke einer Energiebilanzierung und zur Kontrolle der Ergebnisse der thermografischen Messung und Auswertung wurden zusätzlich der Luftmassenstrom, die Lufttemperatur direkt über der Schüttung und die Lufttemperatur am Boden der Schüttung, d. h. am Austritt, gemessen. Außerdem wurden Thermoelemente an den Stäben installiert um die Wärmeverteilung und Wärmeverluste in den Stäben abzuschätzen.

5.3.2 Experimentelle Ergebnisse

Ziel der Versuchsreihen war es den Einfluss von Mischung unter variierenden Betriebs- und Materialparametern zu quantifizieren. Dazu wurde jeweils die Leerrohrgeschwindigkeit bzw. der Gasmassenstrom, die Schütthöhe oder der Partikeldurchmesser für eine Versuchsreihe geändert. Eine Versuchsreihe bestand aus einem Versuch ohne Stabbewegung d. h. in ruhender Schüttung und Versuchen mit bewegten Stäben. Dabei stieg der Durchmischungsgrad jeweils mit zunehmender Hublänge bzw. Stabgeschwindigkeit an. In allen Versuchen betrug die Versuchsdauer 93 Sekunden, das entspricht 14 Hüben, die Temperatur des Eingangsluftstroms war konstant bei 80°C und die Versuche wurden im Gegenhubmodus durchgeführt.

Variation der Leerrohrgeschwindigkeit

Die Versuche wurden bei einem Massenstrom von 0,08 kg/s oder 0,16 kg/s durchgeführt, das entspricht einer Leerrohrgeschwindigkeit von 0,8 bzw. 1,6 m/s über der Schüttung. In Abb. 5.3 sind die thermografischen Aufnahmen zweier Versuchsreihen

mit 100 mm Schütthöhe und einem Kugeldurchmesser von 10 mm zu Versuchsende dargestellt.

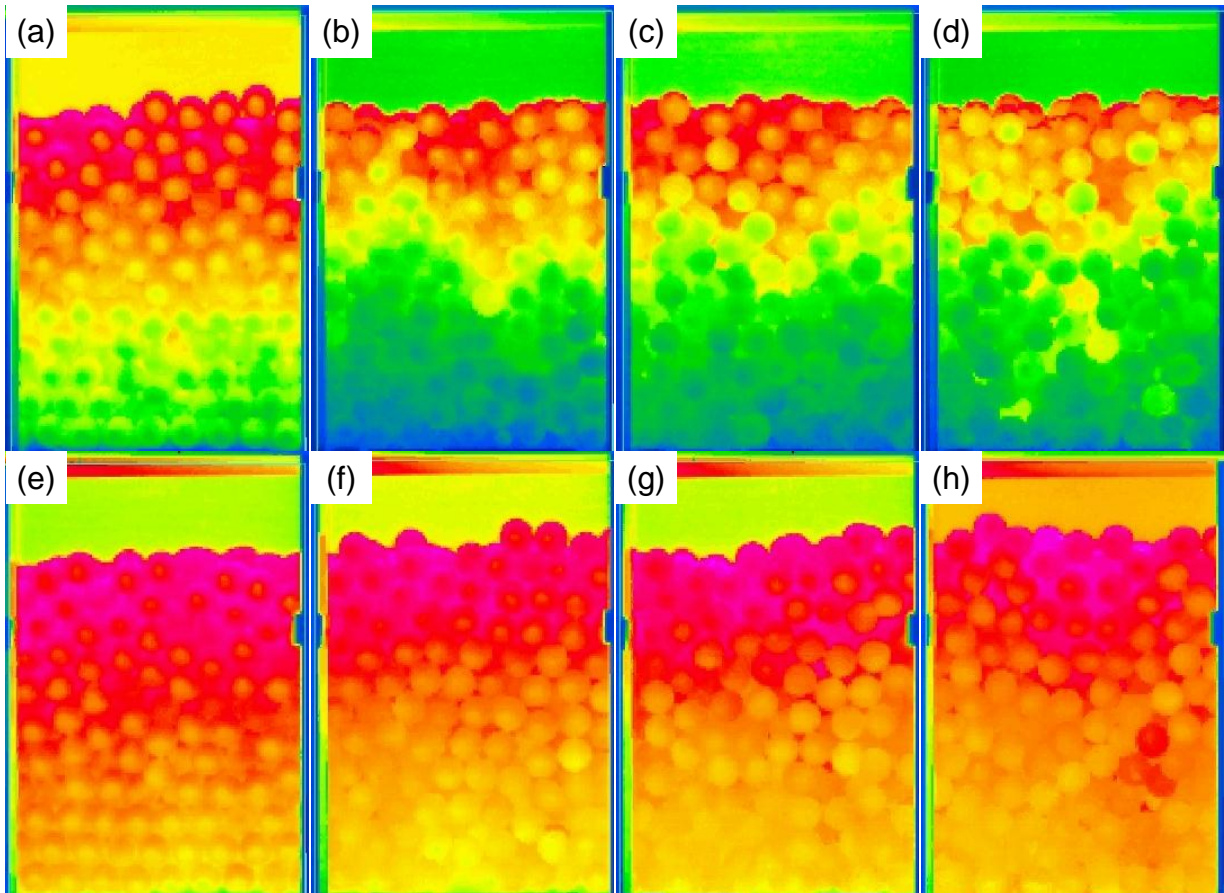


Abb. 5.3: Thermografieaufnahmen Versuchsende bei 0,8 m/s mit Hublänge a) 0 mm, b) 66 mm, c) 100 mm, d) 132 mm und bei 1,6 m/s mit Hublänge e) 0 mm, f) 66 mm, g) 100 mm, h) 132 mm

Bereits eine rein visuelle Auswertung zeigte dabei einen deutlichen Einfluss der Mischung auf die an der Saphirglasscheibe messbaren Partikeloberflächentemperaturen. Sowohl bei niedriger (Abb. 5.3 a) wie auch bei hoher Leerrohrgeschwindigkeit (Abb. 5.3 e) war die Temperatur der an der Saphirglasscheibe anliegenden Partikel im Durchschnitt am höchsten. Sobald die Schüttung gemischt wurde (Abb. 5.3 b-d, f-h), war eine deutliche Abnahme der durchschnittlichen Partikeloberflächentemperatur zu erkennen. Zudem waren insbesondere bei den Experimenten mit größter Hublänge (Abb. 5.3 d, h) auch heiße Partikel im unteren Bereich der Schüttung zu sehen. Das Temperaturprofil über der Schüttung in Strömungsrichtung wurde somit bei einer hohen Hublänge deutlich homogenisiert.

Anhand der Auswertung der messtechnisch bestimmten Partikeloberflächentemperaturen ließen sich diese Beobachtungen zusätzlich quantifizieren (Abb. 5.4).

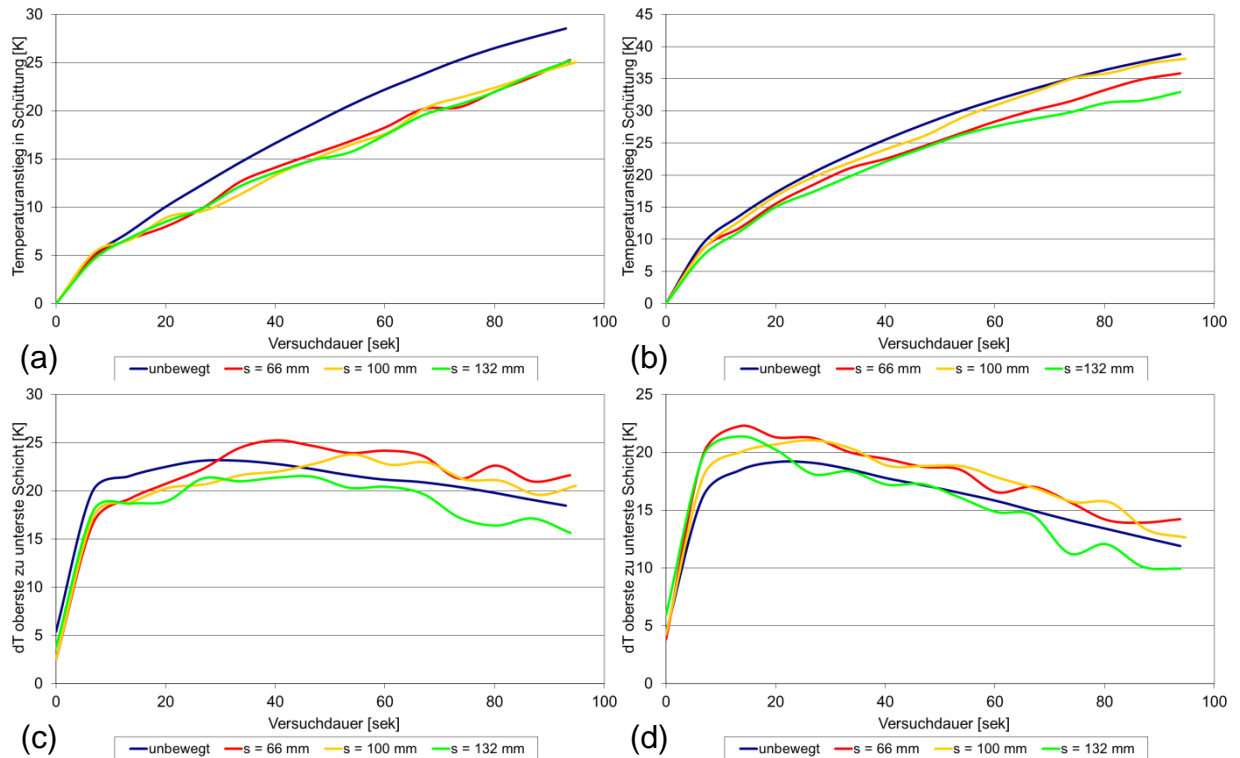


Abb. 5.4: Auswertung Partikeloberflächentemperatur: Anstieg der gemittelten Temperatur bei a) 0,8 m/s und b) 1,6 m/s; Temperaturunterschied oberste zu unterste Partikelschicht bei c) 0,8 m/s und d) 1,6 m/s

Der Anstieg der gemittelten Oberflächentemperatur in der unbewegten Schüttung war bei einer Leerrohrgeschwindigkeit von 0,8 m/s (Abb. 5.4 a) und 1,6 m/s (Abb. 5.4 b) am höchsten. Auch die Homogenisierung des Temperaturprofils über der Schüttung in Strömungsrichtung ließ sich anhand der Oberflächentemperaturen quantifizieren. Als Maß wurde dafür die Temperaturdifferenz zwischen der obersten und untersten Partikelschicht gewählt (Abb. 5.4 c,d). Bei einer großen Hublänge (132 mm) wurde, wie schon in den Thermografieaufnahmen (Abb. 5.3) zu beobachten, das Temperaturprofil deutlich homogenisiert. Bei geringerer Durchmischung war der Temperaturunterschied sogar etwas größer als bei ruhender Schüttung, da insbesondere in den unteren Partikelschichten die Oberflächentemperatur geringer war.

Zusätzlich zu der Auswertung der thermografischen Aufnahmen, die auf den sichtbaren Bereich der Saphirglasscheibe beschränkt waren, wurde die Lufttemperatur über und unter der Schüttung durch Thermoelemente gemessen. Die Thermoelemente unter der Schüttung waren dazu auf der Staboberseite platziert, um den Einfluss von Wärmesenken (wie die kalten Stäbe) auf die Bilanzierung gering zu halten. Der zeitliche Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen Eintritt (über der Schüttung) und Austritt (unter der Schüttung) diente dabei als Maß für die an die Schüttung übertragene Wärmemenge (Abb. 5.5 a, b). Bei einer Leerrohrgeschwindigkeit von 1,6 m/s nahm

die gemessene Temperaturdifferenz bei den gemischten Versuchen stärker ab als bei dem Experiment mit ruhender Schüttung (Abb. 5.5 b), es wurde somit weniger Wärme übertragen. Bei 0,8 m/s nahm dagegen die Temperaturdifferenz in ruhender am stärksten ab, was der Auswertung der thermografischen Aufnahmen widerspricht. Hierbei und in den weiteren Versuchsreihen zeigte sich, dass die Ergebnisse der Thermolemente unter der Schüttung wenig belastbar waren. So war der Einfluss von Wärmeverlustquellen zwar minimal, jedoch konnte nicht immer gewährleistet werden, dass die Thermolemente die Temperatur der ausströmenden Luft messen, sondern auch teilweise die von stehender Luft in den Zwischenräumen der Schüttung. Aus diesem Grund wurden bei der Konzipierung des Versuchsstands zur Untersuchung der Stoffübertragung in bewegten Schüttungen (siehe Kapitel 4.3) die Messstellen für die ausströmende Luft in die Stabzwischenräume versetzt.

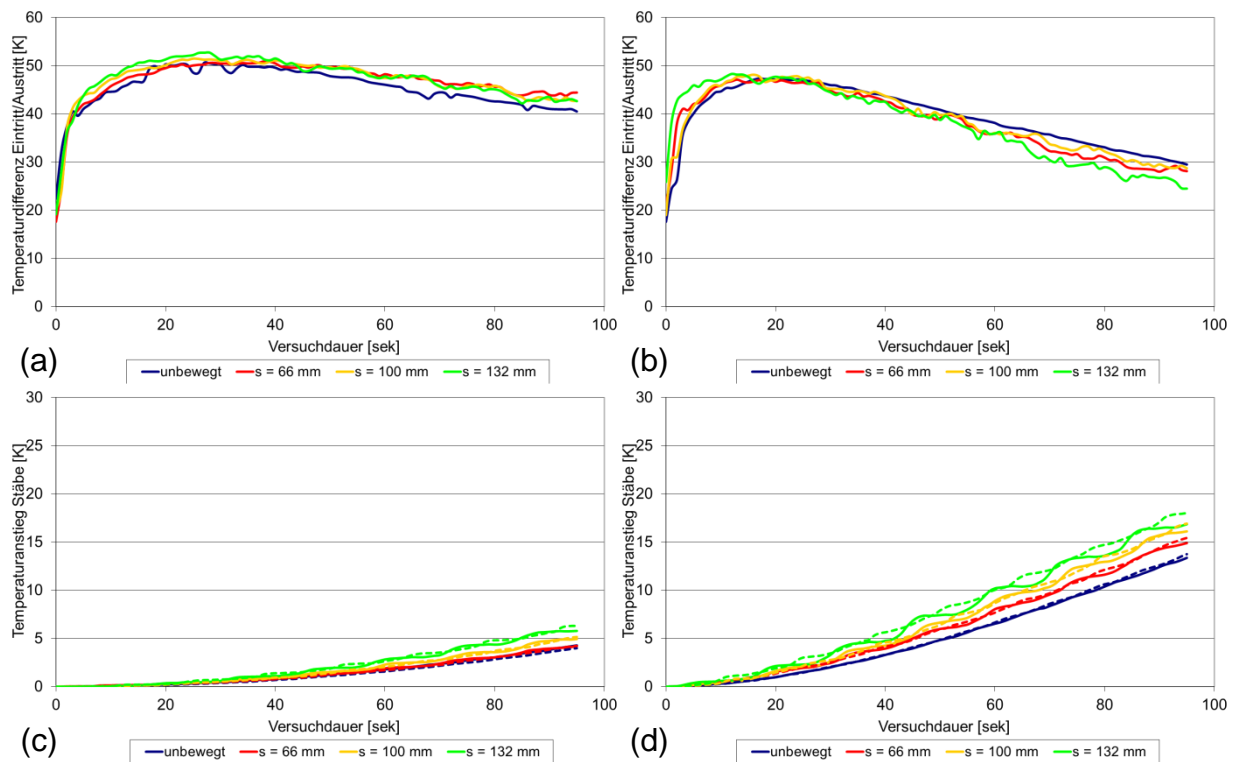


Abb. 5.5: Auswertung Thermolemente: Temperaturdifferenz Lufteintritt zu -austritt bei a) 0,8 m/s und b) 1,6 m/s; Temperaturanstieg der Stäbe bei c) 0,8 m/s und d) 1,6 m/s

Zusätzlich zu der Temperaturmessung über und unter der Schüttung waren Thermolemente innerhalb der Stäbe vorgesehen, um die auf die Stäbe übertragene Wärmemenge in abhängig von der Durchmischung bzw. Hublänge quantifizieren zu können. Dabei wurde die Temperaturverteilung sowohl in den unbewegten Stäben (durchgängige Linie in Abb. 5.5 c, d) wie auch in den bewegten Stäben (gestrichelte Linie in Abb. 5.5 c,d) vorgenommen. Der Temperaturanstieg in den Stäben erhöhte

sich dabei mit steigender Hublänge und war vergleichbar für bewegte und unbewegte Stäbe.

Variation der Schütthöhe

Die Schütthöhe der Versuchsreihen betrug entweder 50 mm oder 100 mm. In Abb. 5.6 sind die beispielhaft die Ergebnisse für zwei Versuchsreihen mit einer Leerrohrgeschwindigkeit von 0,8 m/s und einem Kugeldurchmesser von 10 mm dargestellt.

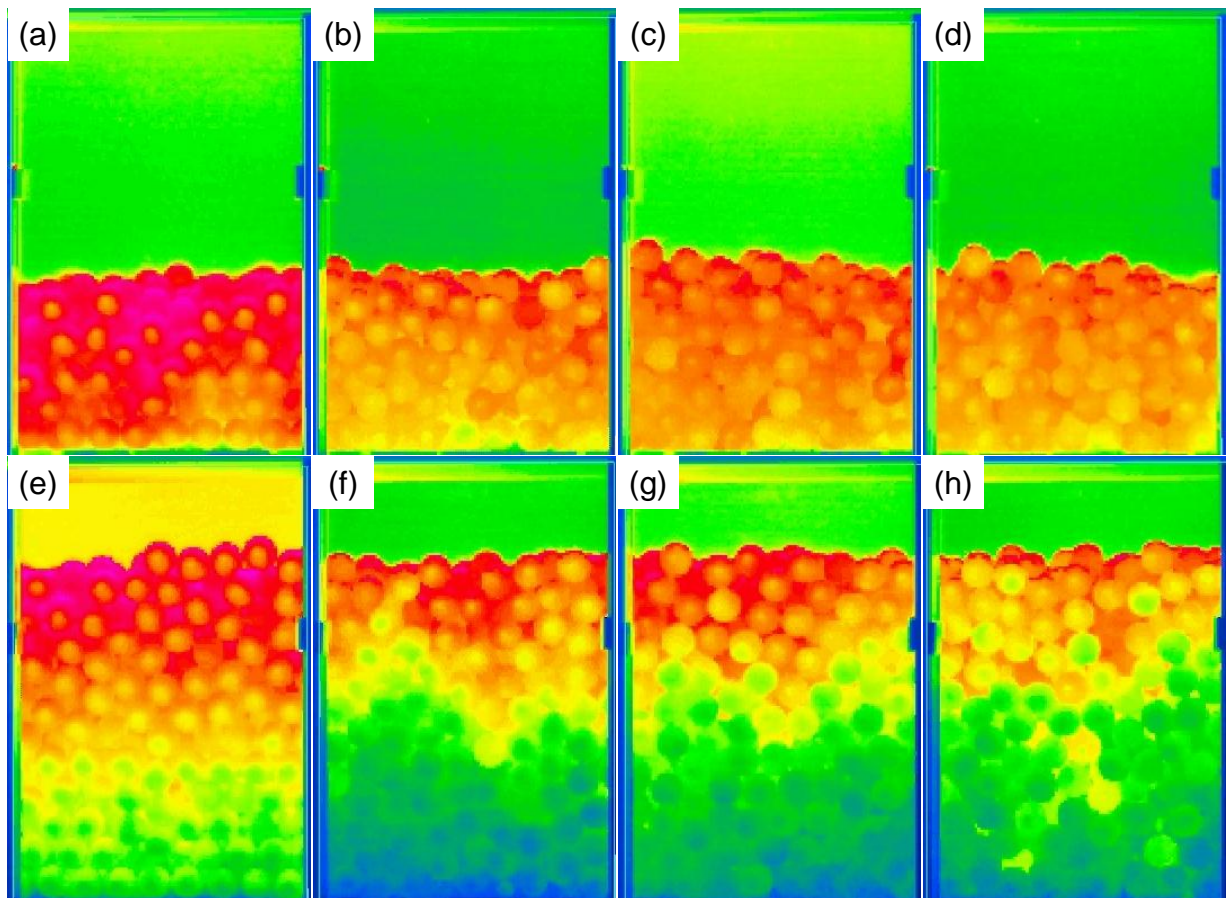


Abb. 5.6: Thermografieaufnahmen Versuchsende bei 50 mm Schütthöhe mit Hublänge a) 0 mm, b) 66 mm, c) 100 mm, d) 132 mm und bei 100 mm Schütthöhe mit Hublänge e) 0 mm, f) 66 mm, g) 100 mm, h) 132 mm

Es zeigten sich deutlich sichtbare Abweichungen zwischen den Versuchen bei ruhender Schüttung (Abb. 5.6 a, e) und den Versuchen bei Durchmischung (Abb. 5.6 b-d, f-h). Sowohl bei niedriger wie auch bei großer Schütthöhe erscheinen die an der Saphirglasscheibe sichtbaren Partikel deutlich wärmer bei ruhenden Schüttung. Zusätzlich ist zu erkennen, dass das Temperaturprofil über der Schüttung in Strömungsrichtung bei 50 mm Schütthöhe (Abb. 5.6 a-d), unabhängig von der Durchmischung, gering war. Auch die Auswertung der gemessenen Oberflächentemperaturen für die an der Saphirglasscheibe anliegenden Partikel ergab eine deutliche stär-

kere Temperatursteigerung in ruhender Schüttung sowohl bei 50 mm (Abb. 5.7 a) wie auch bei 100 mm Schütthöhe (Abb. 5.7 b). Die Auswertung der Temperaturdifferenz zwischen oberster und unterster Schicht (Diagramme hier nicht mehr weiter dargestellt) betrug bei 50 mm Schütthöhe zu Versuchsende 3-5 K und bei 100 mm Schütthöhe 10-14 K.

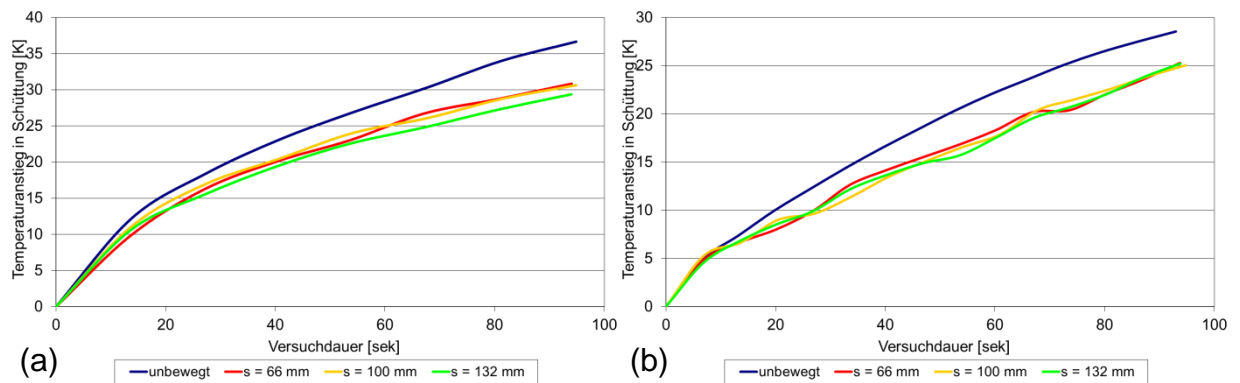
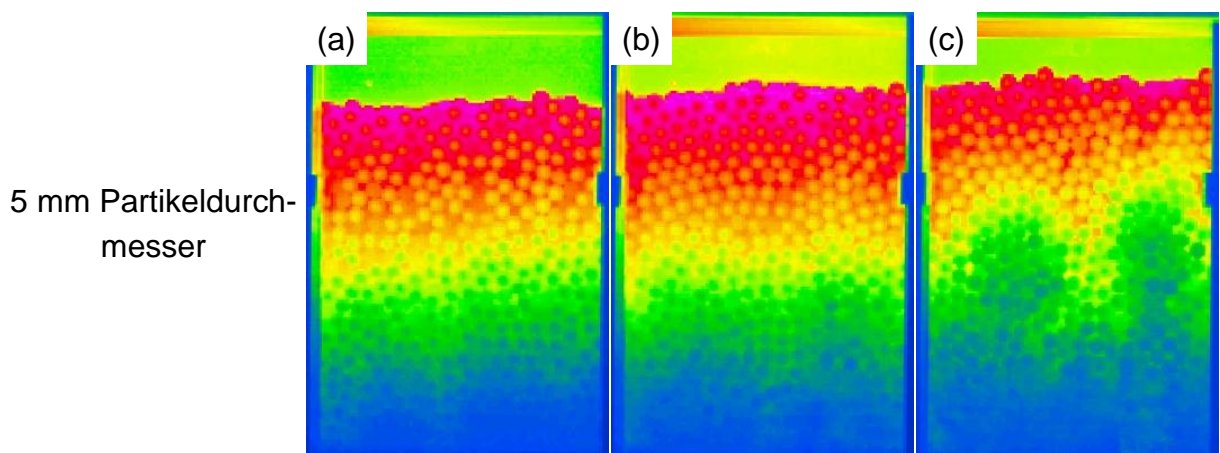


Abb. 5.7: Auswertung Partikeloberflächentemperatur: Anstieg der gemittelten Temperatur bei a) 50 mm Schütthöhe und b) 100 mm Schütthöhe

Variation des Kugeldurchmessers

Die Partikeldurchmesser in den Versuchsreihen betragen entweder 5 mm, 10 mm oder 20 mm. In Abb. 5.8 sind die beispielhaft die thermografischen Aufnahmen für drei Versuchsreihen mit einer Leerrohrgeschwindigkeit von 0,8 m/s und einer Schütthöhe von 100 mm, jeweils zu Versuchsende dargestellt.



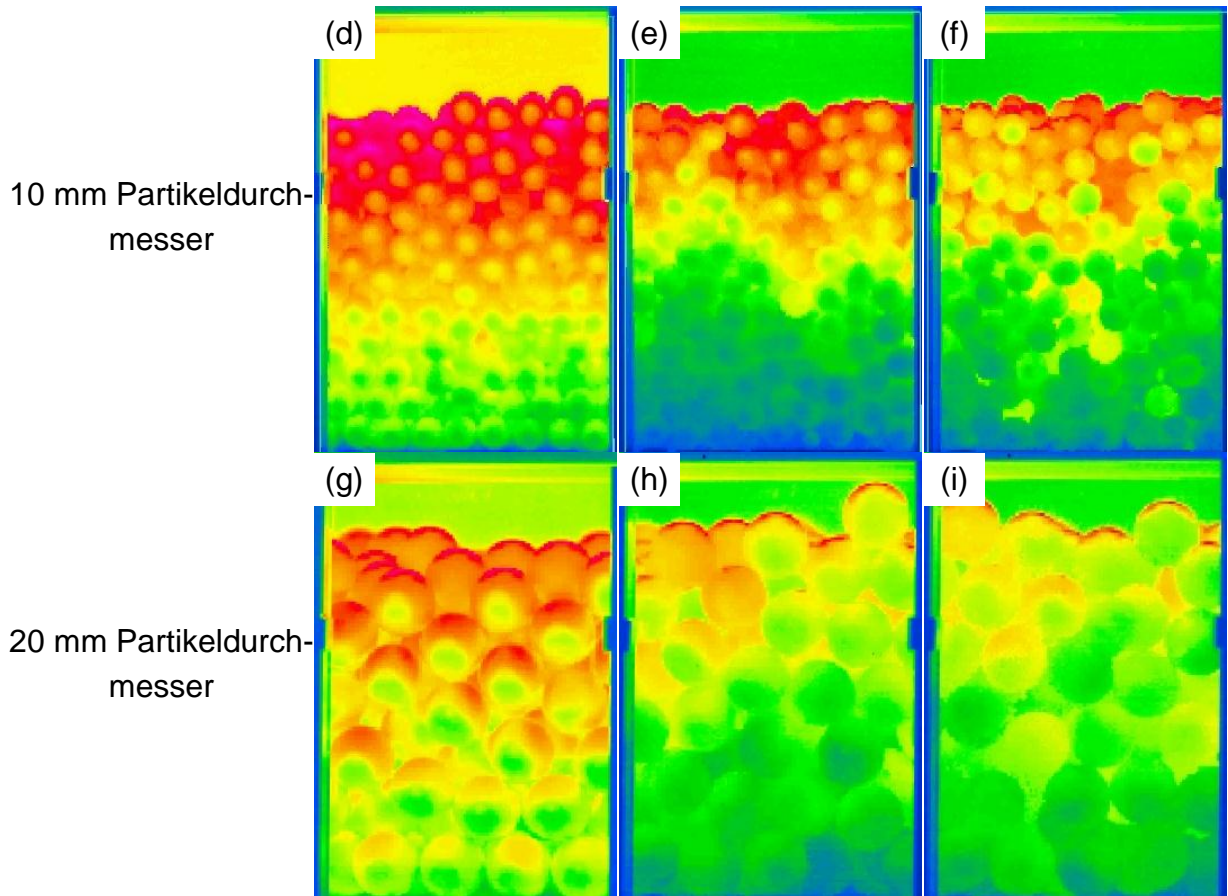


Abb. 5.8: Thermografieaufnahmen Versuchsende abhängig vom Partikeldurchmesser mit Hublänge 0 mm (linke Spalte), 66 mm (mittlere Spalte), 132 mm (rechte Spalte)

In den Thermografiebildern war zu Versuchsende eine zwischen ruhender und gemischter Schüttung deutliche abweichende Oberflächentemperatur der Partikel mit 10 mm Durchmesser (Abb. 5.8 d-f) und 20 mm Durchmesser (Abb. 5.8 g-i) an der Saphirglasscheibe zu erkennen. Bei einem Partikeldurchmesser von 5 mm (Abb. 5.8 a-c) war dagegen eine größere Abweichungen erst bei stärkerer Durchmischung (132 mm Hublänge) wahrzunehmen. Zusätzlich war in dem Versuch bei ruhender Schüttung mit einem Kugeldurchmesser von 20 mm (Abb. 5.8 g) ein deutlicher Temperaturunterschied zwischen der oberen und der unteren Kugelhälfte auszumachen. Wurde die Schüttung gemischt (Abb. 5.8 h, i), dann war dagegen nur ein geringer Unterschied zwischen Ober- und Unterseite wahrnehmbar.

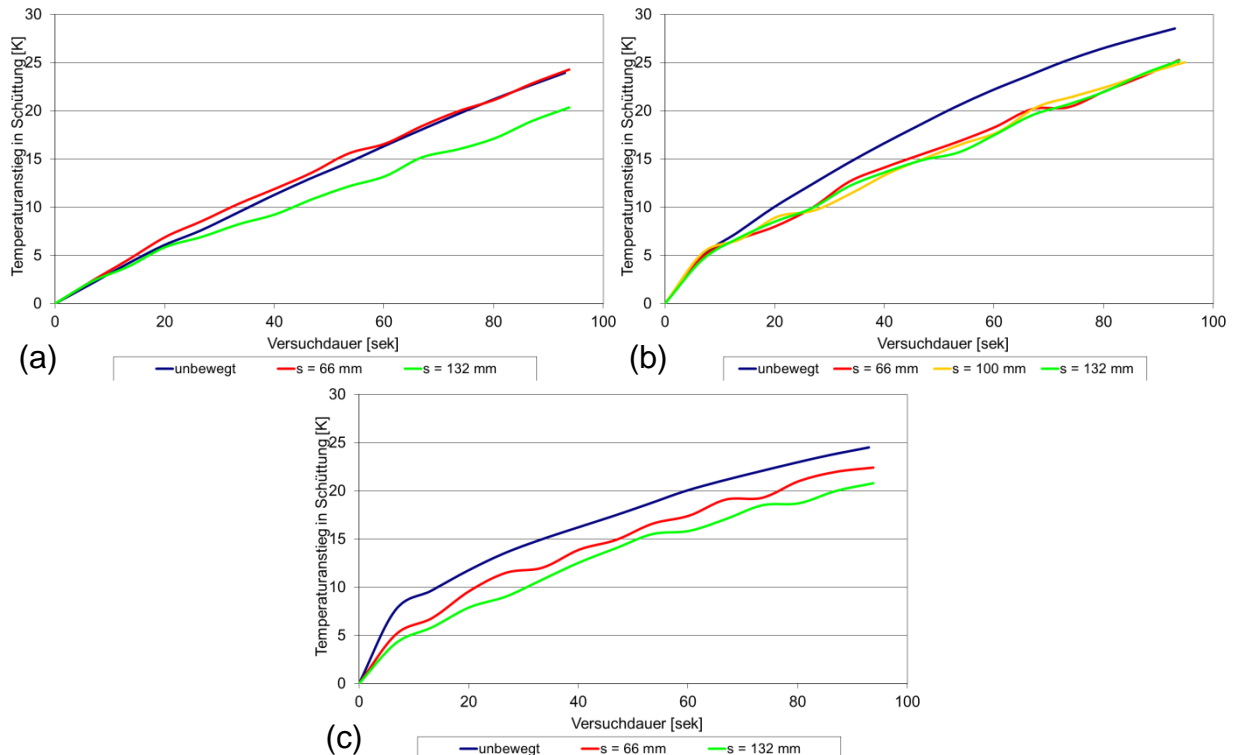


Abb. 5.9: Auswertung Partikeloberflächentemperatur: Anstieg der gemittelten Temperatur bei a) 5 mm Partikeldurchmesser, b) 10 mm Partikeldurchmesser und 20 mm Partikeldurchmesser

Bei der messtechnischen Bestimmung der Partikeloberflächentemperatur wurde dagegen nicht zwischen oberer und unterer Kugelhälfte unterschieden, sondern eine mittlere Oberflächentemperatur bestimmt. Die rein visuell beurteilten Erkenntnisse aus den thermografischen Endbildern (Abb. 5.8) wurden jedoch auch durch den berechneten Anstieg der mittlere Oberflächentemperatur, gemessen an der Saphirglasscheibe, quantifiziert (Abb. 5.9). So war bei einem Kugeldurchmesser von 10 mm (Abb. 5.9 b) und von 20 mm (Abb. 5.9 c) ein deutlich höherer Anstieg für die ruhende Schüttung zu beobachten. Bei einem Kugeldurchmesser von 5 mm (Abb. 5.9 a) waren jedoch nur minimale Unterschiede zwischen ruhender Schüttung und leicht gemischter Schüttung (Hublänge 66 mm) festzustellen. Eine geringere mittlere Schüttungstemperatur war dagegen erst bei einer stärkeren Durchmischung (Hublänge 132 mm) messbar.

Zusammenfassend ergaben die experimentellen Untersuchungen immer eine mit steigender Mischungsintensität abnehmende auf die Schüttung übertragene Wärmemenge. Dieses Ergebnis war dabei unabhängig von Leerrohrgeschwindigkeit, Schütthöhe und Partikeldurchmesser. Eine Einschränkung ist allerdings, dass die Messung auf einen kleinen Bereich der Schüttung (Partikel an der Saphirglasscheibe) begrenzt war. Eine generelle, auf die Gesamtschüttung bezogene Aussage war

auch mit den Messergebnissen der Thermoelemente über und unter der Schüttung nicht möglich. Zudem wurden die Experimente immer in einem nicht vorgewärmten Versuchsstand begonnen, die initiale Temperatur war somit die Umgebungstemperatur, die im Laborraum zwar nicht den äußeren Temperaturänderungen unterworfen war, aber über das Jahr gesehen einen Unterschied von 10 K aufwies. Aus den genannten Gründen konnte eine allgemeingültige Quantifizierung des Einflusses von Mischung auf die Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen nur durch den Vergleich mit zusätzlichen numerischen Simulationen erfolgen. In DEM-Simulationen ist es zum einen möglich konstante Start- und Randbedingungen für alle Versuchsreihen vorzugeben, zum anderen sind detaillierte Messgrößen (Lufttemperatur, Partikeltemperatur(-verteilung), etc.) über die gesamte Schüttung und zu jedem Zeitpunkt bekannt. Im folgenden Abschnitt wird daher erst die DEM-Simulationsmethodik überprüft und dann im Abschnitt 5.3.4 zur detaillierten Analyse des Einflusses von Mischung auf die Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen miteinbezogen.

5.3.3 DEM-Simulation ausgewählter Experimente

Die Simulation der ausgewählten Experimente erfolgt durch eine instationäre Kopplung (Impuls- und Wärmeaustausch) des LEAT DEM-Codes (Beschreibung der Partikelphase: mechanische Bewegung, Wärmeleitung im Partikel) mit dem kommerziellen CFD-Code FLUENT (Beschreibung der Gasphase). Im Folgenden wird zuerst die DEM-Simulation kurz erläutert, danach die Modellierung der Gasphase mit FLUENT und die Kopplung mit DEM beschrieben und zum Abschluss dann ausgewählte Experimente mit Simulationen verglichen.

DEM-Simulationen

Die Berechnung der mechanischen und thermodynamischen Vorgänge in der Partikelphase (Schüttung aus POM-Kugeln) und die Wärmeleitung in den Partikeln erfolgte über die Diskrete Elemente Methode (DEM). Bei der DEM wird das mechanische Verhalten der Schüttung aus der Translation- und Rotationsbewegung der Einzelpartikel bestimmt. Dazu werden die Newton'schen Bewegungsgleichungen integriert:

$$m_i \frac{d^2 \vec{x}_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^N \vec{F}_{ij} + m_i \vec{g}; \quad \theta_i \frac{d^2 \vec{\varphi}_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^N \vec{M}_{ij} \quad (5.1)$$

Eine detaillierte Beschreibung und Überprüfung der mechanischen Berechnung im LEAT DEM-Code und der Bestimmung der notwendigen physikalischen Materialpa-

parameter ist dem Abschlussbericht des vorhergegangenen AiF-Projekts 15061 N „Untersuchung von Schürung und Mischung auf Rostsystemen“ zu entnehmen.

Da es sich bei dem untersuchten Schüttgut um POM-Kugeln handelt, die weder besonders klein sind noch eine hohe innere Wärmeleitung aufweisen, musste in dem Berechnungsmodell für die Partikeltemperatur ein inneres, radiales Temperaturprofil berücksichtigt werden ($Bi > 1$). Unter der Annahme, dass die Stoffwerte des Partikels über den Radius und die Zeit konstant sind und es keine inneren Wärmequellen gibt ließ sich die radiale Temperaturverteilung in einem über den Umfang gleichmäßig konvektiv erwärmten, kugelförmigen Partikel bestimmen über:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (rT) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.2)$$

Der Vorteil der genannten Annahme ist, dass es für die resultierende Differentialgleichung eine analytische Lösung gibt. Die radiale Temperaturverteilung kann damit zu jedem Zeitpunkt und ohne die Abweichungen und den Rechenaufwand eines numerischen Verfahrens berechnet werden. Der zur Beschreibung des konvektiven Wärmeübergangs benötigte Wärmeübergangskoeffizient α wurde dabei über eine Nusselt-Korrelation von Gnielinski bestimmt:

$$Nu_p = 2 + \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2} \quad (5.3)$$

$$Nu_{lam} = 0.664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (5.4)$$

$$Nu_{turb} = \frac{0.037 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr}{1 + 2.443 \cdot Re^{-0.1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (5.5)$$

$$Nu = f_\varepsilon \cdot Nu_p \quad (5.6)$$

$$f_\varepsilon = 1 + 1.5 \cdot (1 - \varepsilon) \quad (5.7)$$

Die Nusseltzahl wurde dabei zuerst für eine umströmte Einzelkugel aus einem laminaren und einem turbulenten Komponente berechnet (5.3). Die laminare Komponente (5.4) und die turbulente Komponente (5.5) sind jeweils Funktionen der Reynolds- und Prandtl-Zahl. Die Erhöhung des lokalen Wärmeübergangs für Einzelpartikel in Schüttungen wurde über einen Faktor bestimmt (5.6), der abhängig von der Schüttungsporosität ε bzw. dem Lückengrand berechnet wird (5.7).

Neben dem unter den Betriebsbedingungen des Versuchsstands dominierenden Wärmetransportmechanismus, der Konvektion, wurde in den DEM-Simulationen zusätzlich die Kontaktwärmeleitung zwischen den Partikeln und zwischen Partikel und Wand berücksichtigt und diese zusätzlichen Wärmeströme über den Umfang des Einzelpartikels aufgelöst. Eine detaillierte Beschreibung der in den DEM-Simulationen verwendeten Wärmeübertragungs- und Wärmeleitungsmodelle ist Rickelt et al. [1] zu entnehmen.

Für die Berechnung der Temperaturverteilung im Partikel war die Vorgabe zusätzliche Materialparameter (neben den Parametern für die Partikelmechanik) erforderliche. Da POM ein häufig verwendetes und gut vermessenes Polymer ist, konnten die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität der Partikel anhand von Literaturquellen festgesetzt werden und sind Tab. 5.1 in aufgelistet.

Tab. 5.1: Thermische Materialparameter POM-Kugeln

Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]: 0,292

Wärmekapazität c_p [J/kgK]: 1439

FLUENT-Modell und Kopplung

Die numerische Beschreibung der Gasphase (vorgewärmter Luftstrom) im Versuchsstand erfolgte mit dem kommerziellen CFD-Programm FLUENT. Da die direkte, eingebettete Abbildung der Einzelpartikel im Berechnungsgitter einen enormen Zeit- und Rechenaufwand bedeutet und die von der Bewegung der Einzelpartikel hervorgerufene stetige Veränderung des Berechnungsgitter innerhalb der FLUENT-Simulationen nicht abgebildet werden kann, wurde zur Modellierung der Partikelschüttung der Ansatz einer porösen Feststoffphase gewählt. Der von der Schüttung hervorgerufene Druckverlust wurde dabei nach der Ergun-Gleichung als Funktion der Schüttungs-Porosität ε und des durchschnittlichen Partikeldurchmessers d_p berechnet:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150 \cdot \mu_f \cdot (1 - \varepsilon)^2}{\bar{d}_p^2 \cdot \varepsilon^3} \cdot v_0 + \frac{1,75 \cdot \rho_f \cdot (1 - \varepsilon)}{\bar{d}_p \cdot \varepsilon^3} \cdot v_0^2 \quad (5.8)$$

Die an die Partikelschüttung übertragene Wärme wurde über Quellterme (in diesem Fall Wärmesenken) berücksichtigt.

Zusätzlich zu dem Volumen über und innerhalb der Partikelschüttung bezog das Berechnungsgitter auch die Roststäbe ein. Das Einschnüren des Luftstroms vor den Stabzwischenräumen und die sich durch die Stabbewegung verändernde Versuchsräumgeometrie wurden somit berücksichtigt. Ebenso wurde der Wärmeverlust an die nicht vorgeheizten Außenwände des Versuchsstands in FLUENT berechnet.

Die Kopplung zwischen der instationären DEM-Simulation und der instationären FLUENT-Simulation schloss das gesamte durch Partikel besetzte Volumen in beiden Berechnungsgittern mit ein. Die Volumenkopplung erfolgte dabei in beide Richtungen über ein Transfergitter hoher Auflösung. Aus der FLUENT-Simulation wurden Geschwindigkeitsvektor, Temperatur und weitere Größen an die jeweilige Position im DEM-Berechnungsgitter zugeordnet und umgekehrt die lokale Schüttungsporosität und die lokal von den Partikeln aufgenommene Energiemenge zurückgegeben. Da es sich um eine instationäre Simulation handelte, diente die Datenübertragung gleichzeitig zur zeitlichen Synchronisation und fand in fest definierten Zeitabständen statt.

Vergleich DEM-Simulationen und Experiment

Ein Vergleich zwischen Simulation und Experiment wurde für mehrere Versuchsreihen durchgeführt. Zur Analyse dienten dabei zum einen die thermografischen Aufnahmen der Versuche und zum anderen das für die an der Saphirglasscheibe anliegenden Partikel bestimmte Temperaturprofil über der Schüttung in Strömungsrichtung.

Als erstes werden Experimente im Wellen-Modus bei 1,6 m/s Leerrohrgeschwindigkeit, 100 mm Schütthöhe und 10 mm Kugeldurchmesser mit den jeweiligen Simulationen verglichen. Im Wellenmodus kam es dabei neben einer vertikalen Vermischung auch zu einer großflächigen horizontalen Umwälzung der Partikelschüttung, die in Verbindung mit der konvektiven Erwärmung der Partikelschicht von oben nach unten zu sehr charakteristischen durch die Saphirglasscheibe messbaren Temperaturprofilen führte. Da die Temperaturprofile im gleichen Maße von der konvektiven Erwärmung, wie auch von der mechanischen Durchmischung beeinflusst wurden, eigneten sich die Experimente im Wellen-Modus besonders gut für Überprüfung der gekoppelten DEM/CFD-Simulationen. Um den auswertbaren Bereich zu vergrößern wurden die Experimente zudem zweimal durchgeführt, wobei die Position der Saphirglasscheibe versetzt wurde (Abb. 5.10).

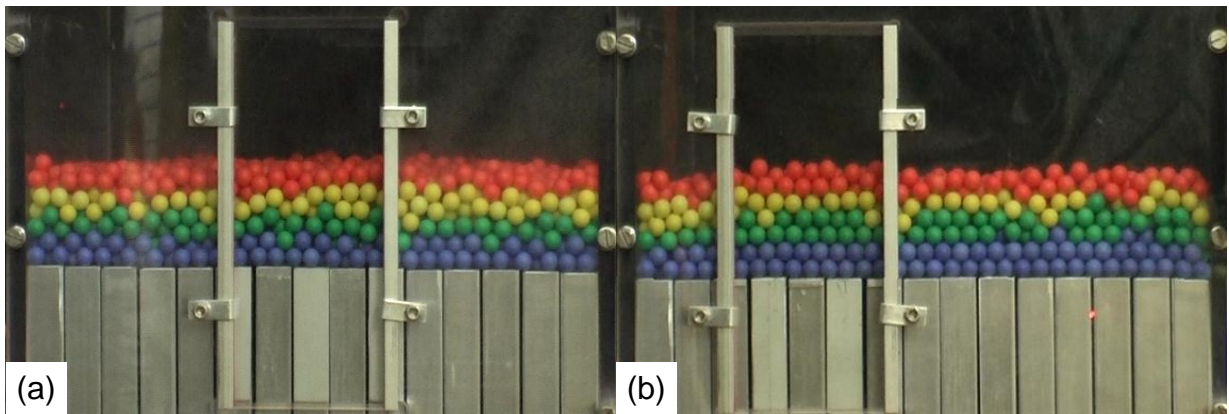


Abb. 5.10: Frontansicht des Versuchsstands mit Saphirglasscheibe a) in „normaler“ Position b) versetzt

Die thermografischen Aufnahmen sind für zwei Experimente mit 100 mm Hublänge in Abb. 5.11 zusammengestellt und zwei Auswertzeitpunkte den jeweiligen Simulationsergebnissen gegenübergestellt.

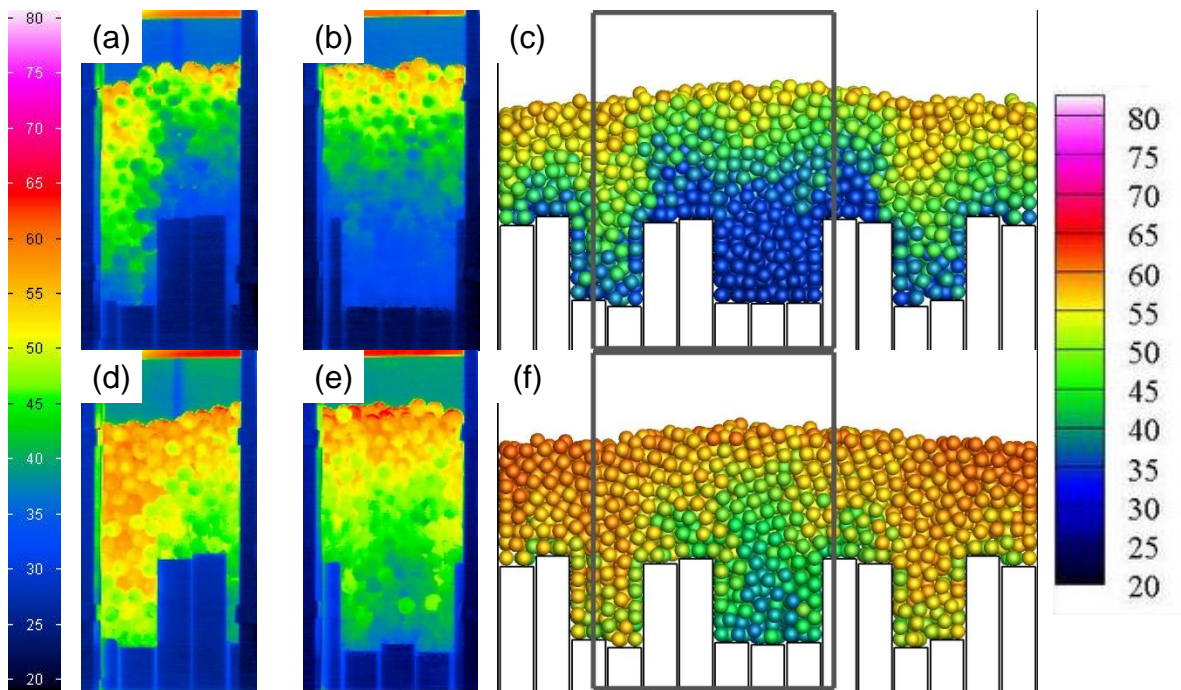


Abb. 5.11: Vergleich Thermografieaufnahmen: nach 35 s a) Experiment 2, b) Experiment 1 c) Simulation nach 62 s d) Experiment 2, e) Experiment 1 f) Simulation

Die Auswertung der visualisierten Oberflächentemperaturen zeigt, dass die in den Experimenten zu beobachtende Verteilung der wärmeren und kälteren Partikel an der Saphirglasscheibe (Abb. 5.11 a, b, d, e) exakt in gleicher Form in den Simulationsergebnissen widerfand (Abb. 5.11 c, f). Neben der räumlichen Temperaturverteilung wurde auch der zeitlichen Verlauf der Aufwärmung korrekt simuliert, so dass sowohl zu einem frühen Auswertzeitpunkt (Abb. 5.11 a-c) wie auch zu einem späten

Auswertezeitpunkt (Abb. 5.11 d-f) keine signifikanten Unterschiede zu erkennen waren.

Ein weiterer Vergleich aus der Versuchsreihe, bei dem die Schüttung allerdings nicht gemischt wurde, ist in Abb. 5.12 dargestellt. Auch bei unbewegter Schüttung stimmte die visualisierte Temperaturverteilung der Experimenten (Abb. 5.12 a, b, d, e) sehr gut mit den Simulationsergebnissen (Abb. 5.12 c, f) überein. Dies gilt für den ersten (Abb. 5.12 a-c) und den zweiten Auswertezeitpunkt (Abb. 5.12 d-f).

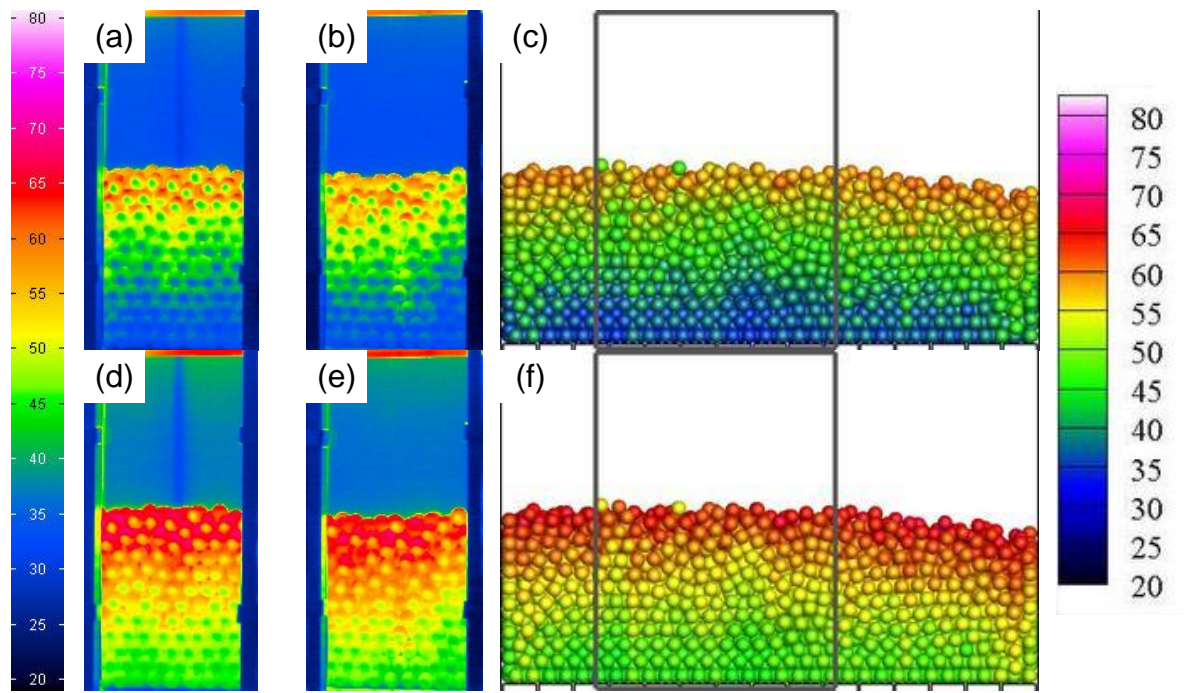


Abb. 5.12: Vergleich Thermografieaufnahmen: nach 35 s a) Experiment 2, b) Experiment 1 c) Simulation nach 62 s d) Experiment 2, e) Experiment 1 f) Simulation

Neben dem qualitativen Vergleich wurde zudem ein quantitativer Vergleich anhand der gemessenen Partikeloberflächentemperatur durchgeführt. Dazu ist für die bereits vorher gewählten Auswertezeitpunkte die durchschnittliche Partikeloberflächentemperatur über die dimensionslose Schichthöhe (0 = unterstes Partikel, 1 = oberstes Partikel) aufgetragen (Abb. 5.13). Das somit quantitative Temperaturprofil über der Schütthöhe in Strömungsrichtung wird dabei für Versuche in ruhender Schüttung, mit 66 mm, 100 mm, und mit 132 mm Hublänge verglichen.

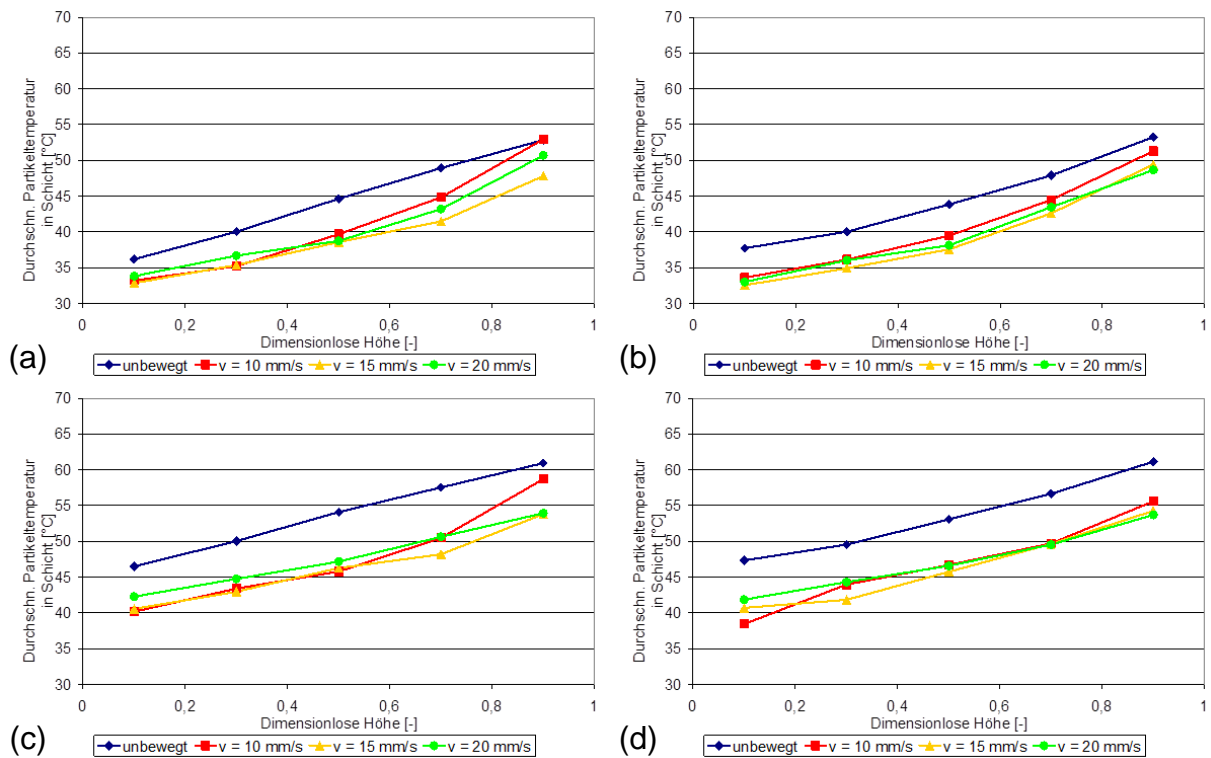


Abb. 5.13: Vergleich Temperaturprofil über der Schütthöhe Wellenmodus: nach 35 s a) Experiment und b) Simulation; nach 62 s c) Experiment und d) Simulation

Auch der quantitative Vergleich der experimentellen Daten (Abb. 5.13 a, c) mit den Simulationsdaten (Abb. 5.13 b, d) zeigte eine sehr gute Übereinstimmung sowohl für den ersten Auswertzeitpunkt (Abb. 5.13 a, b), wie auch für den zweiten Auswertzeitpunkt (Abb. 5.13 c, d). Dabei ist besonders hervorzuheben, dass nicht nur das absolute Temperaturniveau und das Temperaturprofil über der Schütthöhe, sondern auch der durch Mischung hervorgerufene Einfluss auf die Temperaturprofile nahezu exakt in den Simulationen berechnet wurde.

Ein zweiter Vergleich wurde anhand von Experimenten im Gegenhubmodus bei einer Leerrohrgeschwindigkeit von 0,8 m/s, einer Schütthöhe von 50 mm und einem Durchmesser von 10 mm durchgeführt. Der Gegenhubmodus war dabei durch eine sehr geringe Vermischung in horizontaler Richtung charakterisiert, die im Saphirglasfenster gemessenen Temperaturen sind somit repräsentativ für die gesamte Breite des Versuchsstands. Dies wurde zusätzlich durch Experimente mit versetztem Saphirglasfenster überprüft, bei denen keine signifikanten Unterschiede in der Temperaturmessung auftraten. Im Folgenden sind daher nur experimentelle Ergebnisse aus der Versuchsreihe mit dem Fenster in mittiger Position zu zwei Auswertzeitpunkten (nach 20 s und 80 s) gezeigt (Abb. 5.14).

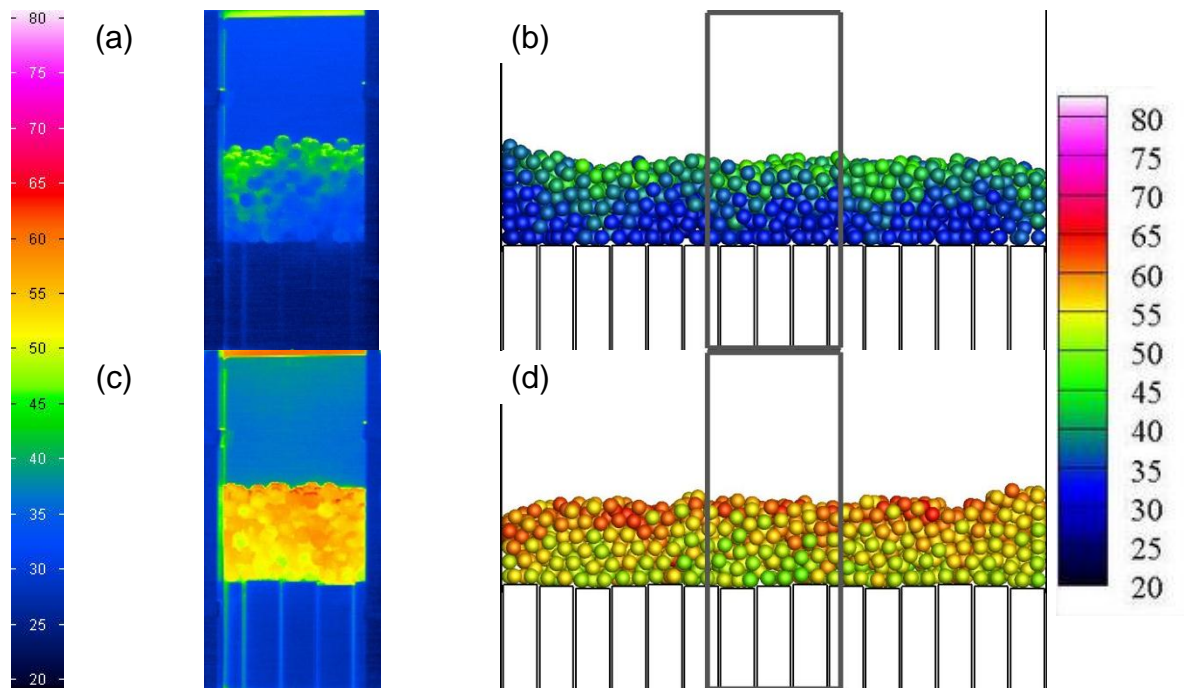


Abb. 5.14: Vergleich Thermografieaufnahmen Gegenhub: nach 20 s a) Experiment und c) Simulation nach 80 s c) Experiment und d) Simulation

Der Vergleich der visualisierten Oberflächentemperatur der Partikel zeigte auch im Gegenhubmodus eine gute Übereinstimmung von Experiment (Abb. 5.14 a, c) und Simulation (Abb. 5.14 b, d). Lediglich nach 80 s erschienen die Partikel an der Saphirglasscheibe in der Simulation (Abb. 5.14 d) etwas kälter als im Experiment (Abb. 5.14 c).

Auch das quantitative Temperaturprofil über der Schütthöhe in Strömungsrichtung zeigte nach 80 s eine leichte Abweichung zwischen Experimenten (Abb. 5.15 c) und Simulationen (Abb. 5.15 d). Das durchschnittliche Temperaturniveau der Simulationen lag dabei leicht unter dem der Experimente. Jedoch gilt auch für die Simulationen im Gegenhubmodus, dass experimentelle Beobachtungen zum Einfluss von Mischung auf die Wärmeübertragung (Absenken der an der Saphirglasscheibe gemessenen Partikeloberflächentemperaturen) korrekt berechnet wurden.

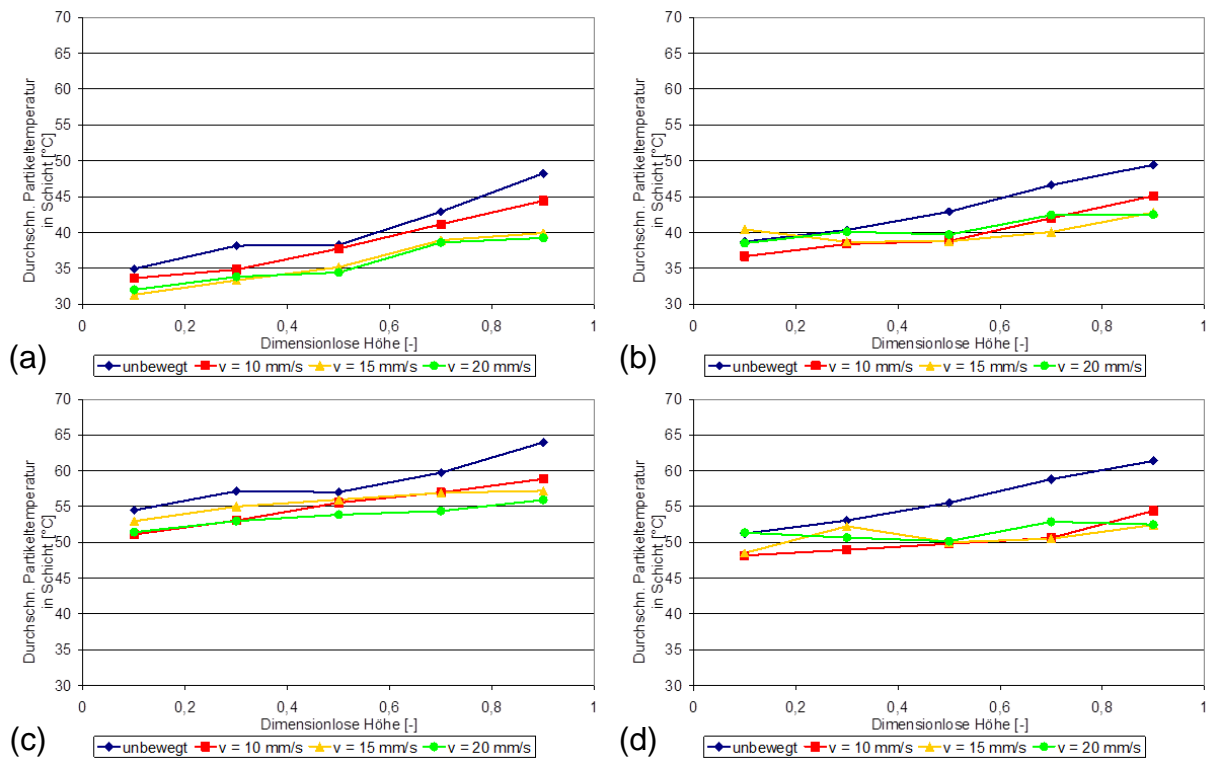
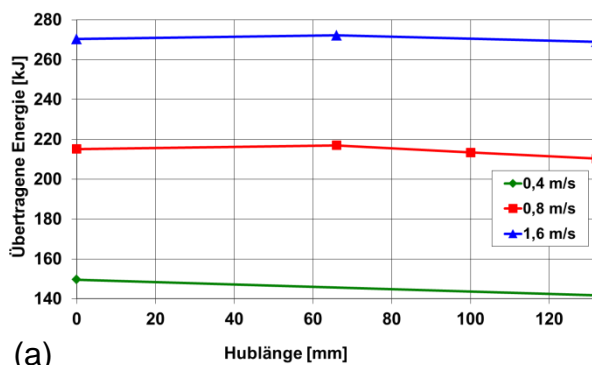


Abb. 5.15: Vergleich Temperaturprofil über der Schütthöhe Gegenhubmodus: nach 20 s a) Experiment und b) Simulation; nach 80 s c) Experiment und d) Simulation

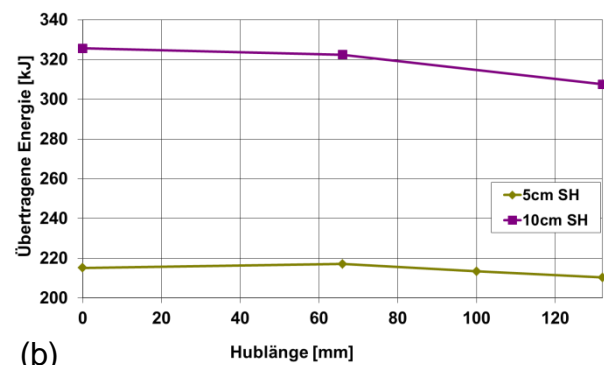
Zusammenfassend ergab die Überprüfung der gekoppelten DEM-FLUENT-Simulationen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Experimenten. Sowohl der visuelle Vergleich der Thermografieaufnahmen wie auch die Gegenüberstellung der Partikeloberflächentemperaturen bzw. abgeleiteter Kenngrößen ergaben, dass die die Simulationsmethodik die experimentellen Ergebnisse im Detail (Temperaturprofil im Saphirglasfenster) vorhersagen kann. Bezüglich des Einflusses von der mechanischen Mischung auf die Wärmeübertragung wurde die Auswirkung qualitativ und quantitativ vergleichbar zu den Experimenten simuliert. Die gekoppelten DEM-FLUENT-Simulationen sind somit hinsichtlich der Gültigkeit der implementierten Wärmeübertragungs- und Wärmeleitungsmodelle überprüft und werden im Folgenden für eine detaillierte Analyse des Einflusses von Mischung auf die Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen verwendet.

5.3.4 Analyse des Einflusses von Mischung auf die Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen

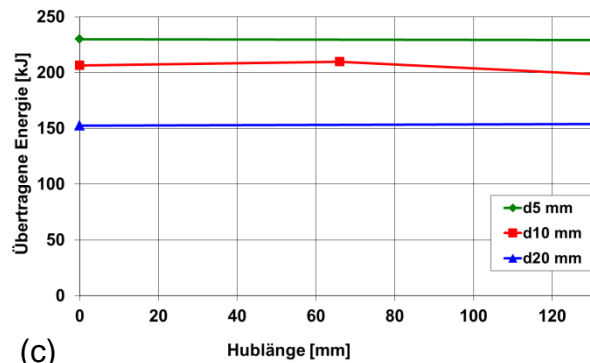
Für die detaillierte Analyse des Einflusses von Mischung auf die Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen wurde eine numerische Parametervariation mit der überprüften DEM-FLUENT-Simulationsmethodik durchgeführt. Der Vorteil der numerischen Untersuchung war zum einen, dass die Zahl der auswertbaren Messgrößen prinzipiell sehr groß (lokale Porosität, lokaler Wärmeübergang, lokale Strömungsgeschwindigkeit, lokale Partikeloberflächentemperatur, lokale Lufttemperatur,...) und der Zugang uneingeschränkt (zu jedem Zeitpunkt, für jedes Partikel) war. Zum anderen konnten in den Simulationen gleiche Start- und Randbedingungen (Umgebungs- bzw. Starttemperatur, adiabate Wände und Roststäbe) gesetzt werden. Zusätzlich sollen die gefundenen Zusammenhänge allerdings auch mit den experimentellen Ergebnissen verglichen werden. Untersucht wurde der Einfluss von Mischung auf die Wärmeübertragung in Abhängigkeit von der Leerrohrgeschwindigkeit, der Schütthöhe und dem Partikeldurchmesser. Dabei ist hervorzuheben, dass im Folgenden nicht der direkte Einfluss von der Leerrohrgeschwindigkeit, der Schütthöhe und dem Partikeldurchmesser auf die Wärmeübertragung untersucht wird. Hier ergaben Experimente und Simulationen erwartungsgemäß, dass bei größerer Leerrohrgeschwindigkeit, Schütthöhe und bei kleinerem Partikeldurchmesser mehr Wärme übertragen wird. Stattdessen wird untersucht wie sich der Einfluss von Mischung unter Veränderung von Betriebsparametern ändert. Mit anderen Worten ausgedrückt bedeutet dies, unter welchen Betriebsbedingungen ist die Wärmeübertragung in ruhender bzw. wann in bewegter Schüttung in dem untersuchten Versuchsstand größer. Zur Quantifizierung des Einflusses dient dabei die auf die Partikelschüttung übertragene Wärmemenge (Abb. 5.16).



(a)



(b)



(c)
Abb. 5.16: Auswertung Einfluss von Mischung auf übertragene Wärmemenge: bei a) variierter Leerrohrgeschwindigkeit, b) variierter Schütthöhe und c) variiertem Partikeldurchmesser

Ergebnisse der Simulationen mit 10 mm Partikeln bei einer Schütthöhe von 100 mm zeigen, dass die Unterschiede zwischen bewegter und unbewegter Schüttung mit sinkender Leerrohrgeschwindigkeit stiegen (Abb. 5.16 a). Das heißt je niedriger die Leerrohrgeschwindigkeit ist, desto förderlicher ist eine Wärmeübertragung in ruhender Schüttung. Vergleichbare Ergebnisse zeigte die Auswertung der mittleren Partikeloberflächentemperatur an der Saphirglasscheibe (Abb. 5.17). Für die Experimente mit einem Partikeldurchmesser von 10 mm war die Abweichung zwischen ruhender und bewegter Schüttung bei der geringeren Anströmgeschwindigkeit deutlich höher.

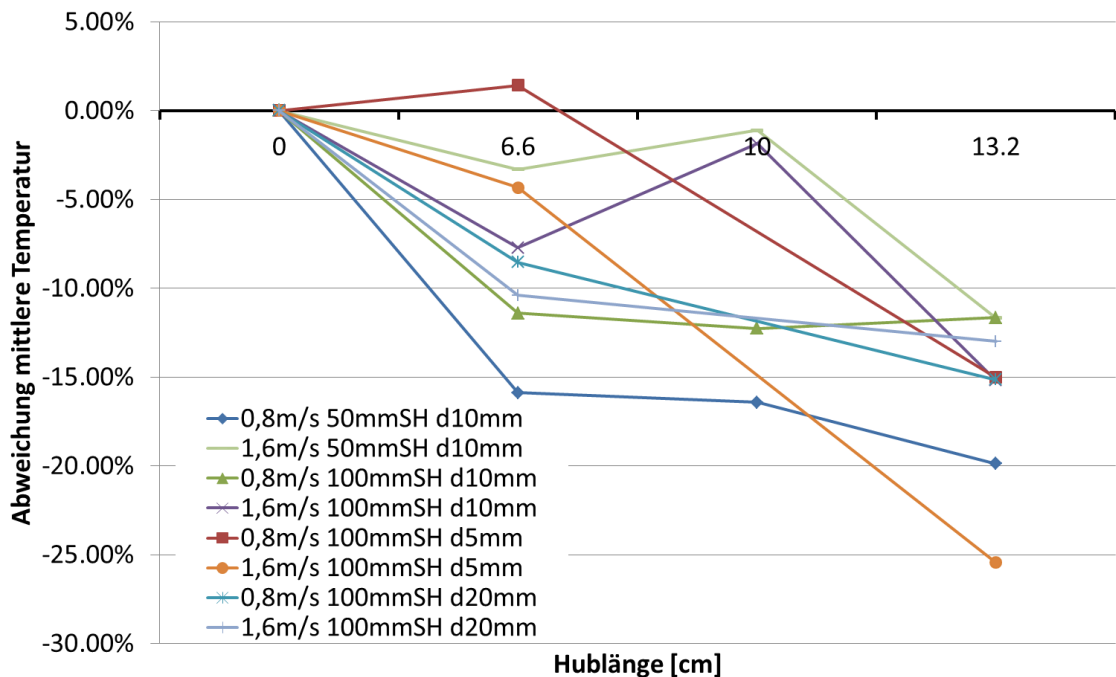


Abb. 5.17: Abweichung (gegenüber ruhender Schüttung) der an der Saphirglasscheibe gemessenen mittleren Partikeloberflächentemperatur

Einen ähnlichen Effekt wie durch Verringerung der Leerrohrgeschwindigkeit konnte durch das Steigern der Schütthöhe erreicht werden. Das heißt mit zunehmender Schütthöhe vergrößerten sich die Unterschiede zwischen ruhender und bewegter Schüttung, wie am Beispiel der Simulationen mit einer Leerrohrgeschwindigkeit von 0,8 m/s und einem Partikeldurchmesser von 10 mm gezeigt (Abb. 5.16 b). In den Experimenten konnte die beschriebene Auswirkung der Schütthöhe nicht eindeutig nachgewiesen werden. Bei einer Leerrohrgeschwindigkeit von 0,8 m/s sanken bei 100 mm die Unterschiede zwischen ruhender und bewegter Schüttung, die anhand der mittleren Oberflächentemperatur bestimmt wurden (Abb. 5.17). Bei einer Leerrohrgeschwindigkeit von 1,6 m/s vergrößerten sich die Unterschiede zwischen ruhender und bewegter Schüttung mit steigender Schütthöhe, so wie es in den Simulationen berechnet wurde. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Experimente nicht unter exakt gleichen Rand- und Betriebsbedingungen durchgeführt wurden und die Auswertung nur auf die durch die Saphirglasscheibe sichtbaren Partikel beschränkt war.

In Tab. 5.2 ist zusammenfassend dargestellt, um welchen absoluten und relativen Wert die übertragenen Wärmemenge zwischen ungemischter und am stärksten gemischter Schüttung (132 mm Hublänge) in den Simulationen abwich, wenn die Leerrohrgeschwindigkeit und die Hublänge variiert wurden.

Tab. 5.2: Abweichung zwischen ruhender und stark gemischter Schüttung

Leerrohrgeschwindigkeit [m/s]	Schütthöhe [mm]			
	50		100	
	Absolut [kJ]	Relativ	Absolut [kJ]	Relativ
0.4	7.780	5.20%	24.244	12.61%
0.8	4.857	2.26%	18.024	5.54%
1.6	1.435	0.53%	10.220	2.18%

Die konvektive Wärmeübertragung ist demnach insbesondere bei hoher Schüttung und geringen Leerrohrgeschwindigkeiten in ruhender Schüttung effektiver.

Die numerischen Untersuchungen des Einflusses von Mischung auf die Wärmeübertragung unter Variation des Partikeldurchmessers ergaben keinen eindeutigen bzw. einen nur geringen Einfluss des Partikeldurchmesser (Abb. 5.16 c). Dabei muss allerdings angemerkt werden, dass Temperaturprofile über den Partikelumfang, wie sie insbesondere bei einem Kugeldurchmesser von 20 mm in den Experimenten mit ruhender Schüttung auftraten (Abb. 5.8 g), in den Simulationen nicht aufgelöst wurden. Zudem hätte eine weitergehende numerische Studie mit umfangreicher Parametervariation (insbesondere für 5 mm Partikel) den zeitlichen Projektrahmen deutlich überschritten. An der experimentell gemessenen, mittleren Partikeloberflächentemperatur ließ sich zudem keine klar definierbare Auswirkung festmachen (Abb. 5.17).

Der Vollständigkeit halber ist in Abb. 5.18 zusätzlich der Einfluss von Mischung anhand der Wärmemenge quantifiziert, die aus der über und unter der Schüttung gemessenen Lufttemperatur bestimmt wurde. Wie bereits vorher beschrieben, waren die Temperaturmessungen unter der Schüttung fehlerbehaftet. Es ist deutlich zu erkennen, dass keine eindeutige Aussage zum Einfluss von Mischung auf die Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen anhand der Lufttemperatur getroffen werden kann. Die gefundenen Zusammenhänge zwischen Mischung und den variierten Betriebsparametern ließen sich ebenso nicht überprüfen.

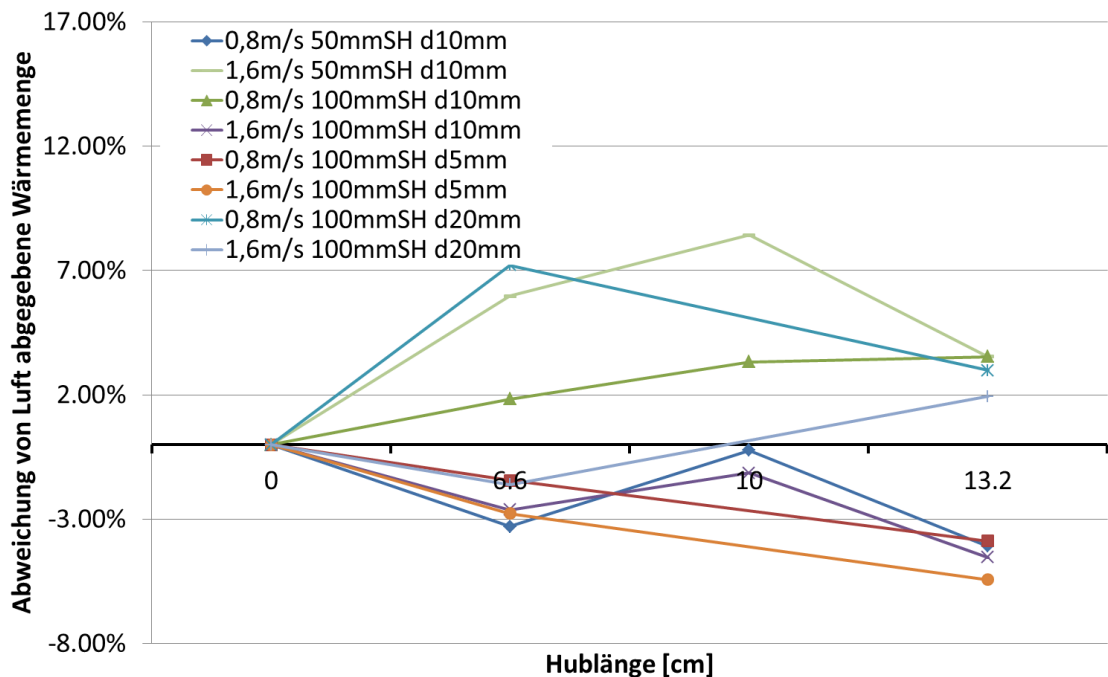


Abb. 5.18: Abweichung (gegenüber ruhender Schüttung) der durch Thermoelemente über und unter der Schüttung bestimmten von der Luft abgegebenen Wärmemenge

Eine umfassende Analyse des Einflusses von Mischung auf konvektive Transportvorgänge (Wärme und Stoff) in bewegten Schüttungen, in der zusätzlich allgemeine und versuchsstandspezifische Einflussfaktoren herausgestellt sind, erfolgt daher in Abschnitt 5.5 unter Berücksichtigung der Trocknungsexperimente und Trocknungssimulationen.

5.4 Stoffübertragung in bewegten Schüttungen

Die experimentelle und numerische Untersuchung der Stoffübertragung in bewegten Schüttungen musste zuerst durch Vorversuche vorbereitet werden, in denen das zu untersuchende Material definiert und eine partikelbasierte Auswertemethodik entwickelt wurde. Eine Zusammenfassung ist in Abschnitt 5.4.1 aufgeführt. Auf Grundlage der am Wärmeübertragungsversuchsstand gewonnenen Erkenntnisse und der Vorversuche wurde Trocknungsversuchsstand konzipiert und aufgebaut. Die Versuchseinrichtung und das Messkonzept sind in Abschnitt 5.4.2 beschrieben. Versuchsreihen wurden bei variierten Betriebsparametern (Mischungsintensität, Schütthöhe, Partikeldurchmesser, Lufttemperatur, Leerrohrgeschwindigkeit) durchgeführt. In Ab-

schnitt 5.4.3 werden die Ergebnisse der experimentellen Versuchsreihen vorgestellt. Ausgewählte Experimente wurden vergleichbar zu den Wärmeübertragungsversuchen durch Kopplung des LEAT DEM-Codes mit dem kommerziellen CFD-Code FLUENT simuliert um die Simulationsmethodik hinsichtlich der implementierten Modelle zur gekoppelten Wärme- und Stoffübertragung bzw. thermo-chemischer Prozesse in bewegten Schüttungen zu überprüfen. Die notwendigen Anpassungen in DEM-CFD Simulationsmethodik und Vergleiche zwischen Simulation und Experiment anhand ausgewählter Messwerte werden in Abschnitt 5.4.4 aufgeführt. Zum Abschluss erfolgt in Abschnitt 5.4.5 eine kurze Analyse des Einflusses von Mischung auf die Stoffübertragung in bewegten Schüttungen anhand von experimentellen Ergebnisse und Auswertung der Simulationsdaten.

5.4.1 Vorbereitende Versuche zur Stoffübertragung in bewegten Schüttungen

Ein Hauptziel des Projekts war die Untersuchung von thermo-chemischen Prozessen in bewegten Schüttungen. Als messtechnisch gut zu vermessender Beispielprozess, in dem Wärme- und Stoffübertragung gekoppelt und in gegenseitiger Abhängigkeit auftreten, sollte dafür die Trocknung einer Partikelschüttung untersucht werden. Dazu musste zuerst ein geeignetes granulares Material gefunden werden. Die Anforderungen aus experimenteller Sicht an das Material waren dabei:

- Eine große Aufnahmekapazität für Wasser bezogen auf das Trockengewicht → Gewichtsabnahme auswertbar
- Regenerierbarkeit → Material kann wiederverwendet werden
- Gesundheitlich unbedenkliche Handhabung

In Hinblick auf die angestrebten Simulationen ausgewählter Experimente mit der DEM/CFD-Simulationsmethodik ergaben sich zusätzliche Anforderungen:

- Mechanische Stabilität → Zerschneiden von Körnern prinzipiell mit der DEM beschreibbar erfordert aber zuerst eine Überprüfung der Mechanik (kein Inhalt des Projekts)
- Mindestgröße → Transportvorgänge im Partikel haben Einfluss auf die konvektive Übertragung, Simulationsdauer

- Kugelform → Die in der DEM-Simulation verwendeten Modelle wurden nur für kugelförmige Körper überprüft
- Materialparameter gut vermessen und in Literatur dokumentiert

Zusätzlich musste für einen detaillierten Vergleich von Experimenten und Simulationen und eine umfassende Überprüfung der gekoppelten DEM-FLUENT-Simulationen hinsichtlich der Beschreibung von thermo-chemischen Prozessen in bewegten Schüttungen eine Auswertemethodik entwickelt werden, die, vergleichbar zu der Messung der Oberflächentemperatur der Partikel, die individuelle Oberflächenfeuchtigkeit einzelner Partikel quantifiziert. Daher wurde zu Anfang eine Messtrecke konzipiert, die die Trocknung oder Befeuchtung von ruhenden Schüttungen unter kontrollierten Bedingungen ermöglichte (Abb. 5.19 a). Zur Untersuchung wurde das Material von unten mit Luft durchströmt, wobei Strömungsgeschwindigkeit, relative Feuchte und Temperatur des Luftstroms variiert werden können. Das angestrebte Messkonzept sah vor, dass die Quantifizierung der individuellen Partikeloberflächenfeuchtigkeit über einen Feuchteindikator erfolgt, der abhängig von der Oberflächenfeuchtigkeit seine Farbe ändert. Daher befand sich das Material in einem Glaszylinder und konnte mit einem digitalen Camcorder bzw. einer Industriekamera zur späteren Farbauswertung aufgezeichnet werden. Es wurden verschiedene im Handel erhältliche Kombinationen aus Silica-Gel und Feuchteindikator ausgetestet (Abb. 5.19 b), jedoch bestand immer die Problematik, dass die Partikel zu klein waren, zu stark von der Kugelform abwichen, beim Kontakt mit Kondenswasser zerbrachen oder die über eine Bildanalyse auswertbare Farbänderung zu gering war.

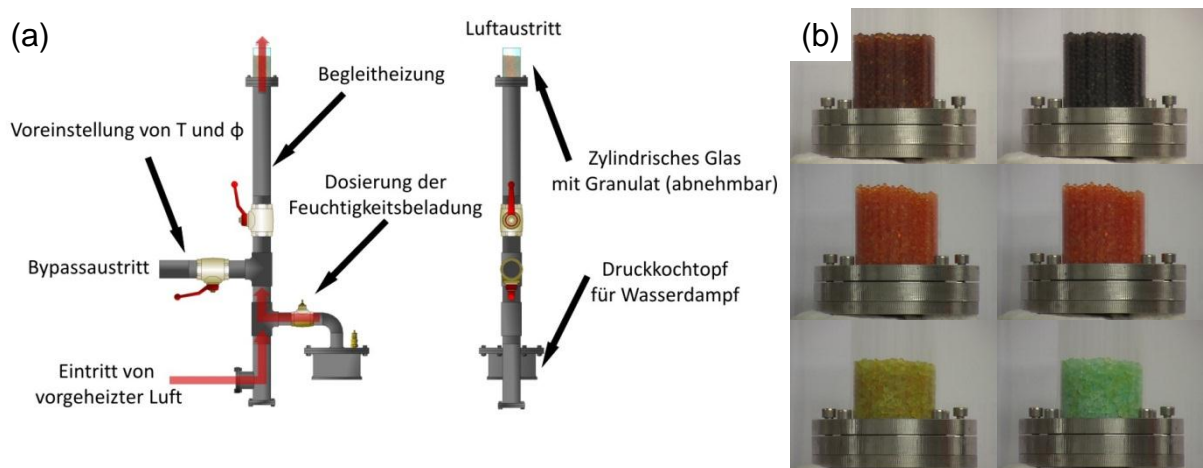


Abb. 5.19: a) Aufbau Befeuchtungs-/Trocknungsmesstrecke, b) Im Handel erhältliche Silicagel im trockenem (links) und befeuchtetem (recht) Zustand

Daher wurde im zweiten Schritt dazu übergegangen einen anderen Silicageltyp (weitporig) zu verwenden, der im handelsüblichen Zustand farblos ist (Abb. 5.20 a). Das Material blieb auch beim direkten Kontakt mit Wasser stabil und war kugelförmig (Durchmesser 6-10 mm), damit erfüllte es die gestellten Anforderungen. Für die Auswertung der Partikeloberflächenfeuchte wurde dazu übergegangen einen Feuchtigkeitsindikator aus einem sauren Salz in Verbindung mit einem PH-Indikator selbst herzustellen. Das farblose, weitporige Silicagel wurde anschließend mit dem flüssigen Indikator imprägniert. Die Farbeigenschaften bzw. der Farbumschlagpunkt wurden hinsichtlich der bildanalytischen Auswertbarkeit für verschiedene pH-Indikatoren und verschiedene Salze in der Messtrecke erprobt (Abb. 5.20 a). Ausgewählt wurde abschließend eine Kombination aus Bromphenolblau (pH-Indikator) und Zinksalz, da diese den für die Bildanalyse am besten auswertbaren Farbumschlag aufwies.

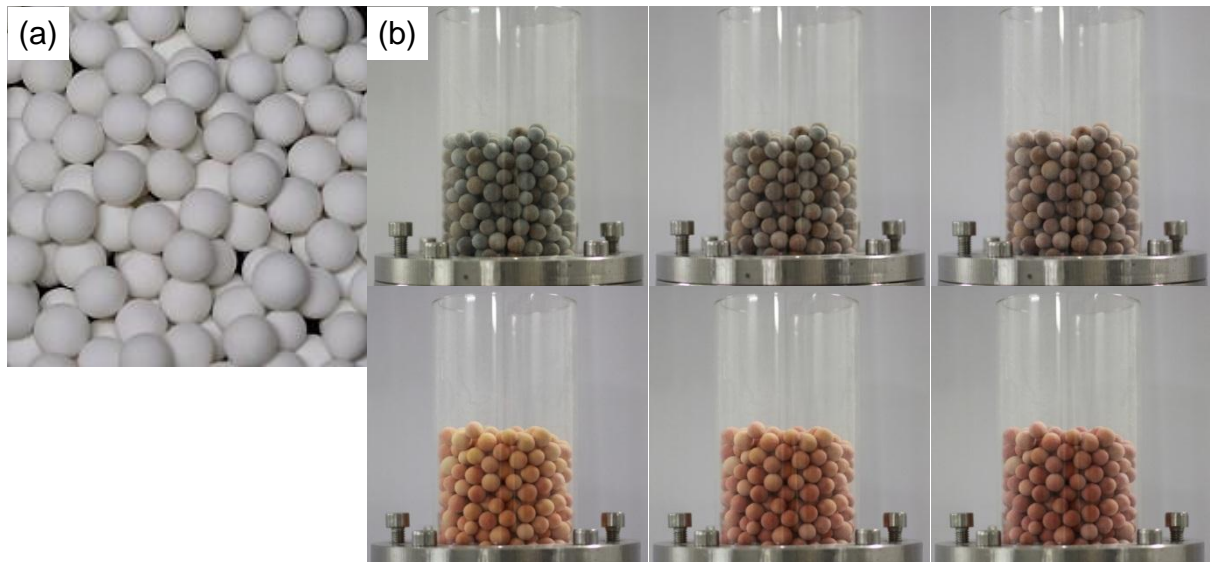


Abb. 5.20: a) Weitporiges Silicagel im Lieferzustand, b) Versuche mit unterschiedlichen Kombinationen aus pH-Indikator und Salz

5.4.2 Versuchsstandsaufbau und Messkonzept

Der Versuchsstand zur Untersuchung der Stoffübertragung in einer bewegten Schüttung orientierte sich konzeptionell an dem Wärmeübertragungsversuchsstand. In Abb. 5.21 a ist der Aufbau schematisch dargestellt und in Abb. 5.21 b ist ein Bild des Versuchsstands zu sehen. Die Schüttung aus Silicagelkugeln wird von oben mit vorgewärmter, trockener Luft durchströmt und gleichzeitig durch vertikal bewegliche Stäbe mechanisch gemischt. Die Hublänge betrug dabei erneut 0, 66 und 100 mm bei gleicher Hubdauer und mit dem Verfahrensweg steigender Mischungsintensität. Der

Versuch wurde simultan von einer digitalen Kamera und einer Thermokamera aufgezeichnet. Somit konnten den an der Saphirglasscheibe sichtbaren Silicagel Kugeln eine Oberflächentemperatur zugeordnet werden. Aufgrund der im Betrieb des Wärmeübertragungsversuchsstands gewonnenen Erkenntnisse wurden jedoch einige Änderungen vorgenommen. Zum einen verfügt der Trocknungsversuchsstand über eine Be- und eine Entladeklappe. Die Silicagel Schüttung wurde erst zu Versuchsbeginn eingefüllt und über zwei Schieber, die während des Versuches gleichzeitig die Randwände darstellen, in den Untersuchungsraum geschoben (Abb. 5.21 c). Zu Versuchsende wurde die Schüttung aus dem Versuchsraum hinausgeschoben und über die Entladeklappe entnommen. Ein Vorteil der Änderung war, dass der Versuchsstand vor Versuchsbeginn aufgeheizt werden konnte. Dadurch war die Starttemperatur der Versuche unabhängig von der Umgebungstemperatur einstellbar und die Auskondensation von Wasser an kalten Elementen unterhalb der Schüttung wurde vermieden. Zudem konnte die Vorwärmungs- und Trocknungszeit vor Versuchsbeginn minimiert werden.

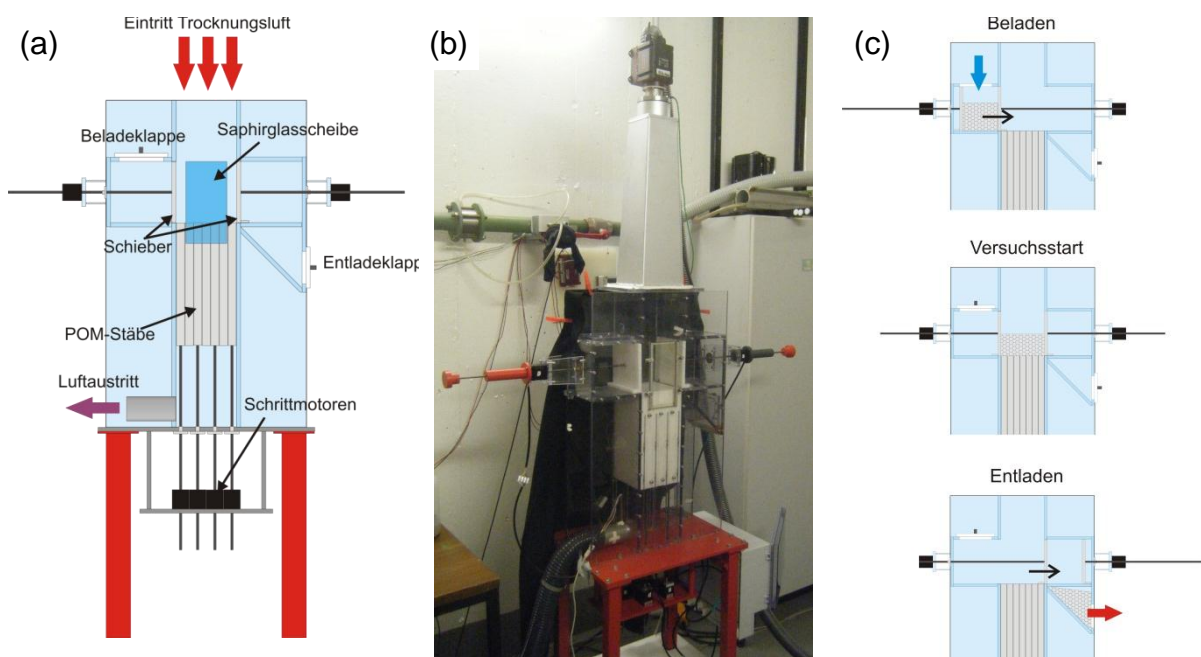
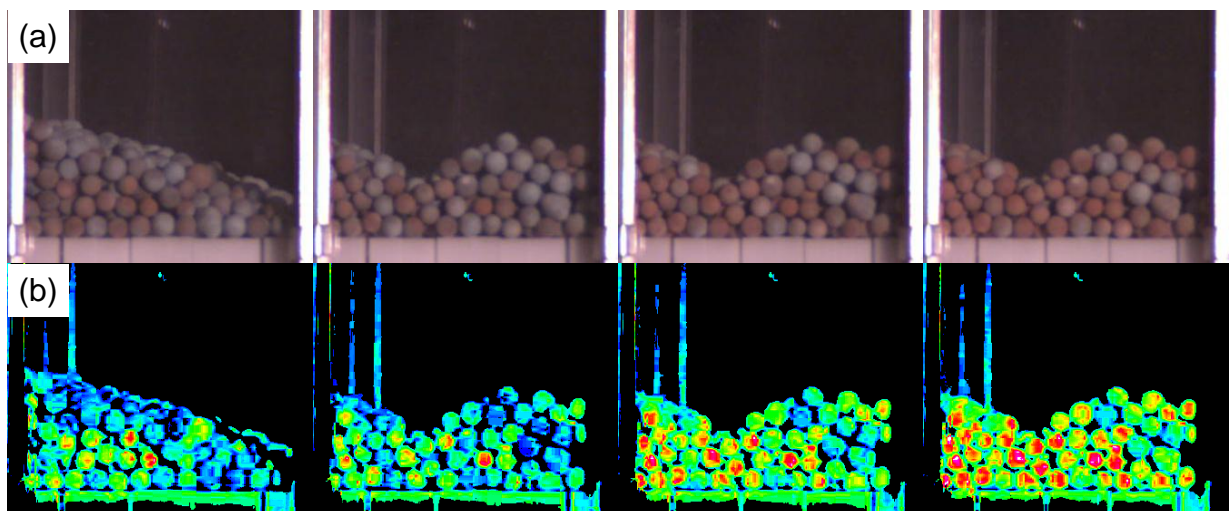


Abb. 5.21: a) Versuchsstandkonzept, b) Versuchsstandbild, c) Be- und Entladekonzept

Eine zusätzliche Änderung war die luftdichte Kapselung des Versuchsraums. Die Luftzufuhr und -abfuhr erfolgte jeweils über eine Leitung, wodurch integrale Größen über Messstellen in Zu- und Abluft eindeutig zu bestimmen waren. Außerdem wurden die Messstellen für Temperatur und rel. Luftfeuchte direkt unter der Schüttung von der Staboberseite (Wärmeübertragungsversuchsstand) auf die Stabzwischen-

räume verlegt. So war gewährleistet, dass die Messwerte in der abströmenden Luft genommen wurden.

Wie bereits in Abschnitt 5.4.1 erläutert sollte insbesondere in Hinblick auf die detaillierte Überprüfung der gekoppelten DEM-FLUENT-Simulationen hinsichtlich der Beschreibung von thermochemischen Prozessen in bewegten Schüttungen die Messung der Oberflächenfeuchtigkeit der an der Saphirglasscheibe anliegenden Silicagel Partikel erfolgen. Dazu wurde die Farbänderung der mit Feuchteindikator präparierten Partikel mittels einer Bildanalyse bestimmt und somit die Veränderung der Oberflächenfeuchtigkeit quantifiziert. Es stellte sich für die Quantifizierung als besonders geeignet heraus, nicht auf die (im ursprünglichen Videoformat vorliegenden) RGB-Farbwerte der Bilddateien zurückzugreifen, sondern die Einzelbilder in den HSV-Farbraum zu transformieren und die Verfärbung über die Änderung des H-Wertes zu bemessen. In Abb. 5.22 b ist der zeitliche Verlauf der berechneten Feuchtigkeitswerte in Falschfarbenbildern visualisiert. Es ist gut zu erkennen, dass die in den Originalbildern (Abb. 5.22 a) durch den Trocknungsfortschritt hervorgerufene Farbänderung (blau zu rot) über die Bildauswertung erfasst wird. Zusätzlich wurde, wie bei der experimentellen Untersuchung der Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen, der Versuch gleichzeitig thermografische aufgezeichnet (Abb. 5.22 c) und die tabellarischen Temperaturdaten den anhand der digitalen Videoaufnahmen bestimmten Partikelpositionen geometrisch und zeitlich kontinuierlich zugeordnet. Somit konnten Position, Oberflächentemperatur und –feuchtigkeit jedes an der Saphirglasscheibe anliegenden Silicagel Partikels aus den Messdaten berechnet werden.



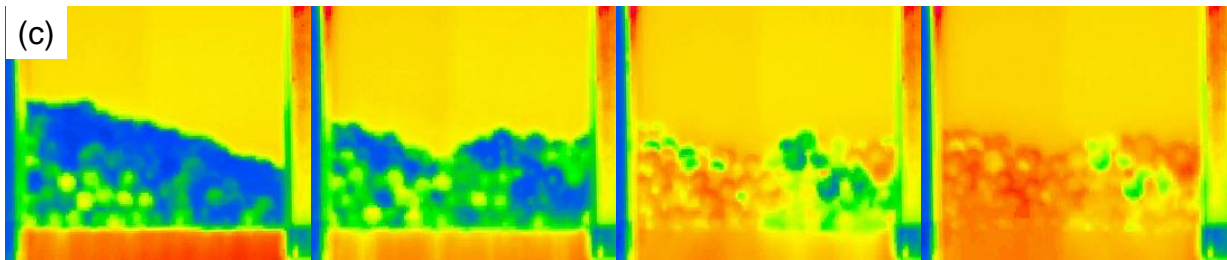


Abb. 5.22: Partikelbasierte Bildauswertung zeitlicher Verlauf der Oberflächenfeuchte und -temperatur: a) Originalaufnahme, b) Quantifizierte Oberflächenfeuchtigkeit, c) Thermografische Aufnahme

Es zeichnete sich jedoch bereits in den vorbereitenden Experimenten ab, dass auch mit großem Aufwand eine zur thermografischen Messung vergleichbare Genauigkeit bei der Bestimmung der Partikeloberflächenfeuchtigkeit nicht zu erreichen ist. Daher war es erforderlich die Zugänglichkeit für Messungen in der Gasphase zu verbessern, um die partikelbasierten Messdaten sinnvoll zu ergänzen und eine genaue Bestimmung von integralen Größen aber auch lokalen Unterschieden unter der Schüttung zu ermöglichen. Es kamen daher digitale, kapazitive Feuchtesensoren (bis 125°C und 100% rel. Luftfeuchte) auf Chipgröße zum Einsatz (Abb. 5.23 b). Ein Vorteil der Sensoren war, dass sie aufgrund der geringen Baugröße auch für Messungen in den Stabzwischenräumen eingesetzt werden konnten. Außerdem wird neben der rel. Luftfeuchte auch die Lufttemperatur gemessen und ausgegeben und der Sensor reagiert dynamisch ($t_{63} < 4$ s) auf Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen. Für den Einsatz der Sensoren am Versuchsstand wurden ein Konzept zur Stromversorgung und Kommunikation und ein System zur Messwerterfassung und -speicherung auf dem Steuerungsrechner über I²C-Bus entwickelt. Neben Messstellen in den Stabzwischenräumen wurden zusätzliche Feuchtesensoren um Temperatur und rel. Feuchte in der anströmenden Luft über der Schüttung und im Austritt zu messen (Abb. 5.23 a). Zur integralen Berechnung der übertragenen Wassermenge wurde der Eingangs- und Ausgangsmassenstrom gemessen. Außerdem wurde die übertragene Wassermenge als Bilanzgröße über die Massenabnahme der Schüttung gravimetrisch direkt gemessen. Ergänzend wurden der Vordruck und die Umgebungsdaten (Temperatur und rel. Luftfeuchte) aufgezeichnet.

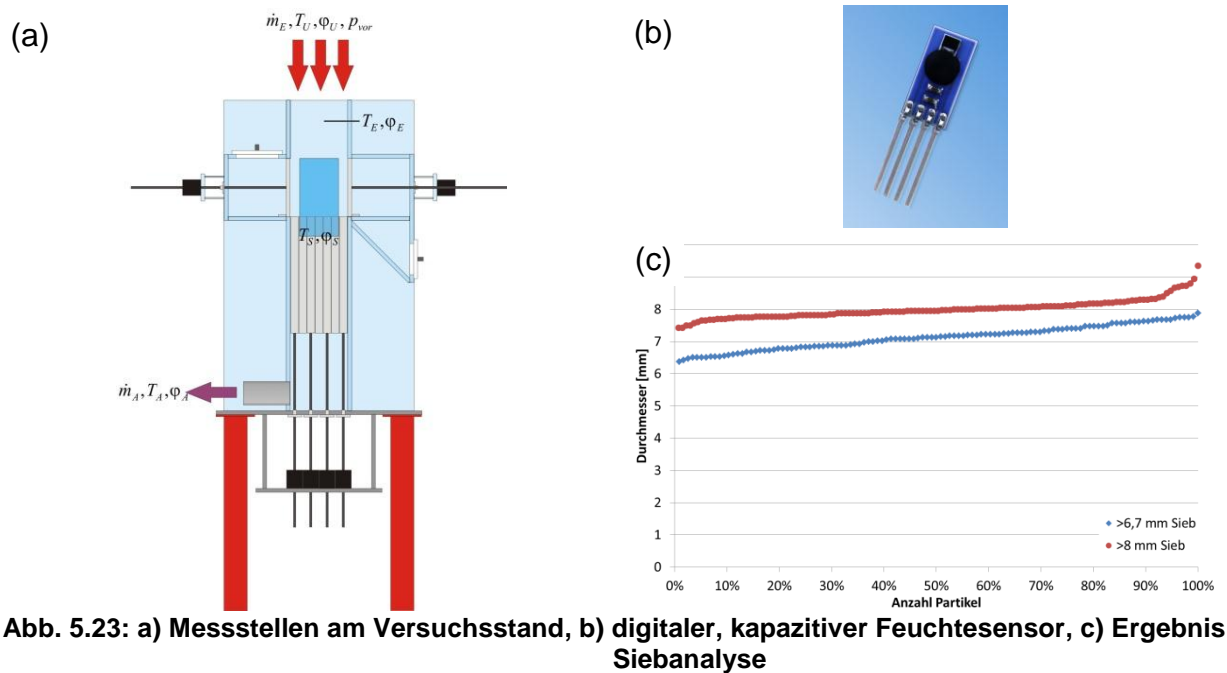


Abb. 5.23: a) Messstellen am Versuchsstand, b) digitaler, kapazitiver Feuchtesensor, c) Ergebnis Siebanalyse

Der Durchmesser des in den Experimenten verwendeten Silicagels war im Gegensatz zu den für die Wärmeübertragung verwendeten POM-Kugeln nicht klar definiert, sondern variierte von 5 – 10 mm. Daher wurden 3 Fraktionen durch Siebe mit 8 mm und mit 6,7 mm Maschenweite getrennt. Für die größte (>8 mm) und die mittlere Fraktion ($>6,7$ mm) wurde im Anschluss ein mittlerer Durchmesser aus einer repräsentativen Probe ermittelt (Abb. 5.23 c). Die kleinste Fraktion ($<6,7$ mm) wurde aufgrund der geringen Partikelzahl nicht weiter verwendet. Somit ergaben sich eine größere Fraktion mit einem mittleren Durchmesser von $8,01 \pm 0,08$ mm und eine kleinere Fraktion mit $7,12 \pm 0,14$ mm.

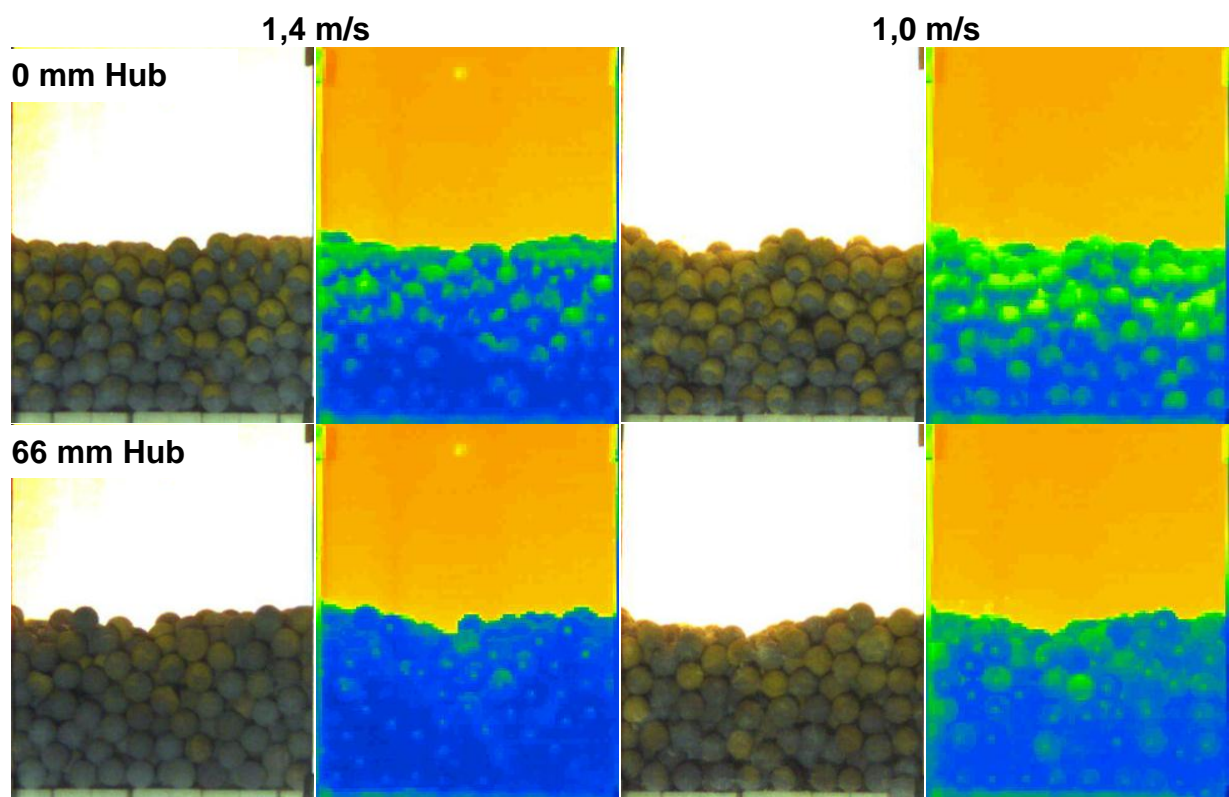
5.4.3 Experimentelle Ergebnisse

In mehreren Versuchsreihen wurde der Einfluss von Mischung unter Veränderung von Betriebs- und Materialparametern untersucht. Es wurde jeweils die Leerrohrgeschwindigkeit bzw. der Massenstrom, die Schütthöhe, die Lufttemperatur oder der Partikeldurchmesser für eine Versuchsreihe geändert. Eine Versuchsreihe bestand aus einem Versuch ohne Stabbewegung d. h. in ruhender Schüttung und Versuchen mit bewegten Stäben. Dabei nahm der Durchmischungsgrad jeweils mit zunehmender Hublänge bzw. Stabgeschwindigkeit zu. In allen Versuchen betrug die Versuchsdauer 160 sec und die Zeit fürs Beladen, Verteilen und Entladen der Schüttung durch die Schieber je 10 sec. Alle Versuche wurden im Gegenhubmodus durchgeführt und

starteten mit einer Wasserbeladung des Silicagels von 0,79 kg(Wasser)/kg(Trockenmasse). Dies entspricht der Maximalbeladung des verwendeten, weitporigen Silicagels bei 100% rel. Luftfeuchtigkeit.

Variation der Leerrohrgeschwindigkeit

Die Versuche wurden bei einem Massenstrom von 0,02 kg/s oder 0,03 kg/s durchgeführt, das entspricht einer Leerrohrgeschwindigkeit von 1,0 bzw. 1,4 m/s über der Schüttung. In Abb. 5.24 sind die thermografischen Aufnahmen zu Versuchsende zweier Versuchsreihen mit 50 mm Schütthöhe, einem durchschnittlichen Kugeldurchmesser von 8 mm und einer Lufttemperatur von 75°C gezeigt.



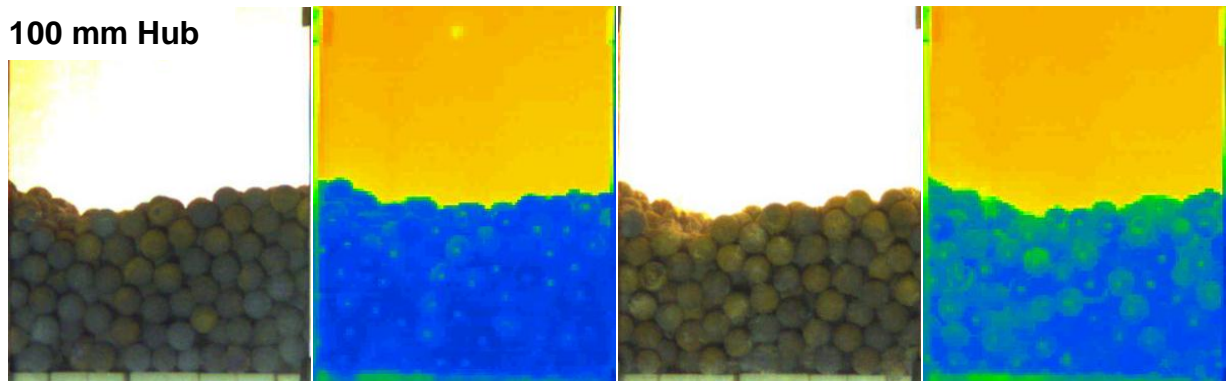


Abb. 5.24: Versuchsende bei einer Leerrohrgeschwindigkeit von 1,0 und 1,4 m/s: Originalbild mit gefärbten Partikeln (1. und 3. Spalte) und Thermografische Aufnahme (2. und 4. Spalte) bei 0 mm Hublänge (1. Reihe), 66 mm Hublänge (2. Reihe) und 100 mm Hublänge (3. Reihe)

Unabhängig von der Leerrohrgeschwindigkeit waren deutliche Unterschiede zwischen den Versuchen in ruhender Schüttung (Abb. 5.24 „0 mm Hub“) und den Versuchen mit bewegter Schüttung (Abb. 5.24 „66 mm Hub“, „100 mm Hub“) zu erkennen. So war zum einen in den thermografischen Aufnahmen bei ruhender Schüttung ein Temperaturprofil über der Schütthöhe in Strömungsrichtung zu sehen, dass bei durchmischter Schüttung nicht sichtbar ist. Zum anderen ließen sich sowohl an den thermografischen Aufnahmen wie auch an der Farbe des Feuchteindikators deutliche Abweichungen zwischen der oberen und unteren Kugelhälfte festmachen. Wurde die Schüttung gemischt, dann traten diese Unterschiede nicht auf. Insgesamt war besonders bei den Experimenten mit 1,0 m/s Leerrohrgeschwindigkeit auch nach ca. 180 s Aufenthaltsdauer im warmen Versuchsstand nur ein geringer Temperaturanstieg in der Schüttung auszumachen. So lange wie die Oberfläche noch mit freiem Wasser befeuchtet war (der Feuchteindikator zeigt keinen Farbumschlag), verblieben die Partikel auf der Kühlgrenztemperatur. Erst wenn das freie Wasser an der Oberfläche verdampft war und sich der Feuchteindikator verfärbt hatte, stieg die Temperatur an der Oberfläche der Partikel langsam, da ein großer Teil der von der Luft übertragenen Energie weiterhin in die Verdampfung ging, an.

Die visuellen Beobachtungen spiegeln sich z. T. in den anhand der Bildanalyse bestimmten Partikeloberflächentemperatur und -feuchten wider (Abb. 5.25). Allerdings bestand bei der Auswertung die Einschränkung, dass nicht zwischen Partikeloberseite und -unterseite unterschieden wird, sondern ein Mittelwert über die gesamte sichtbare Oberfläche der detektierten Partikel gebildet wurde. Die visuell beobachteten Differenzen zwischen oberer und unterer Halbkugel ließen sich somit nicht quantitativ erfassen.

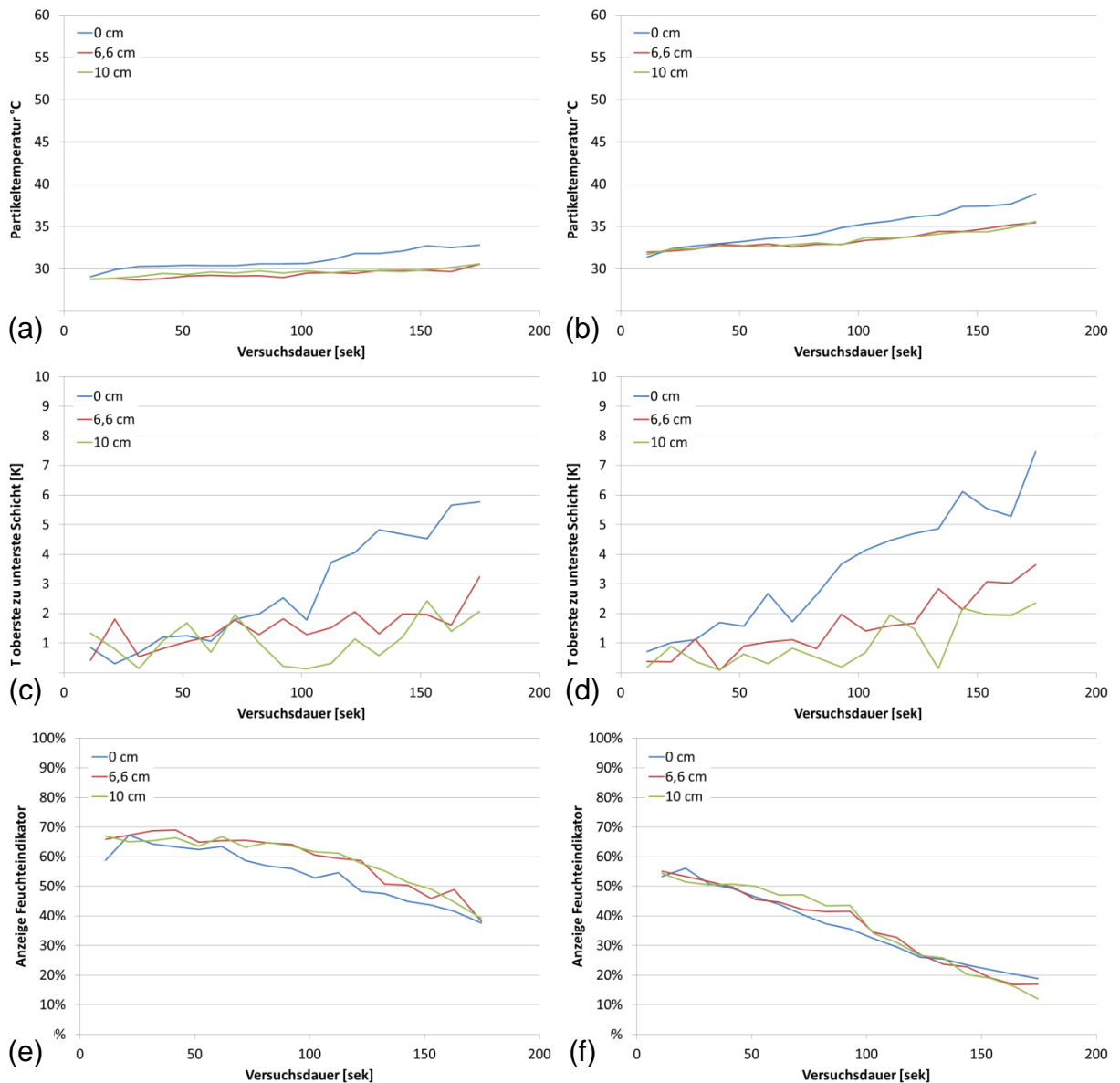


Abb. 5.25: Bildauswertung: Gemittelten Oberflächentemperatur bei a) 1,0 m/s und b) 1,4 m/s; Temperaturunterschied oberste zu unterste Partikelschicht bei c) 1,0 m/s und d) 1,4 m/s; Gemittelten Oberflächenfeuchte bei e) 1,0 m/s und f) 1,4 m/s

Für 1,0 m/s (Abb. 5.25 a) und für 1,4 m/s (Abb. 5.25 b) wurde ein stärkerer Anstieg der mittleren Partikeloberflächentemperatur bei ruhender Schüttung gemessen. Da in ruhender Schüttung die obere Halbkugel der Partikel kontinuierlich stärker getrocknet wurde als die untere, trat der Zeitpunkt früher auf, an dem das an der Oberfläche (zumindest auf der Oberseite) vorliegende, freie Wasser verdunstet und ein Temperaturanstieg zu messen war. Wurde die Schüttung durchmischt, dann rotierten die Partikel und die Oberfläche wurde über den Umfang des Partikels gleichmäßiger getrocknet. Dadurch verlängerte sich die Zeit, bis zur vollständigen Verdunstung des an der Oberfläche verfügbaren, freien Wassers und der Temperaturanstieg setzte

später ein. Das visuell zu beobachtende Temperaturprofil über der Schüttung in Strömungsrichtung wurde durch die Temperaturdifferenz zwischen oberster und unterster Partikelschicht bemessen (Abb. 5.25 c, d). Die Differenz war unabhängig von der Leerrohrgeschwindigkeit bei ruhender Schüttung am höchsten und bei 100 mm Hublänge am niedrigsten. Die über die Verfärbung des Feuchteindikator bemessene mittlere Oberflächenfeuchtigkeit des Silicagel Partikel (Abb. 5.25 e, f) sank bei ruhender Schüttung im ersten Versuchsabschnitt schneller ab als in den Versuchen mit Durchmischung. Auch hier war die Ursache der in ruhender Schüttung beobachtete Unterschied zwischen oberer und unterer Halbkugel. Da die sichtbare Veränderung (Farbe des Indikators) im Gegensatz zur Oberflächentemperatur jedoch nicht stetig war, sondern ein eher sprunghafter Umschlag bei Verdampfung des freien Oberflächenwassers stattfand, näherten sich die Werte für bewegten und unbewegten Versuch bei 1,0 m/s Leerrohrgeschwindigkeit im zweiten Versuchsabschnitt wieder an (Abb. 5.25 e). Bei 1,4 m/s Leerrohrgeschwindigkeit (Abb. 5.25 f) war der für eine gemischte Schüttung gemessene Endwert niedriger, da im unbewegten Fall die untere Halbkugel der Partikel länger befeuchtet blieb, während im gemischten Fall die Mehrzahl der Partikel an der Oberfläche gleichmäßig getrocknet war.

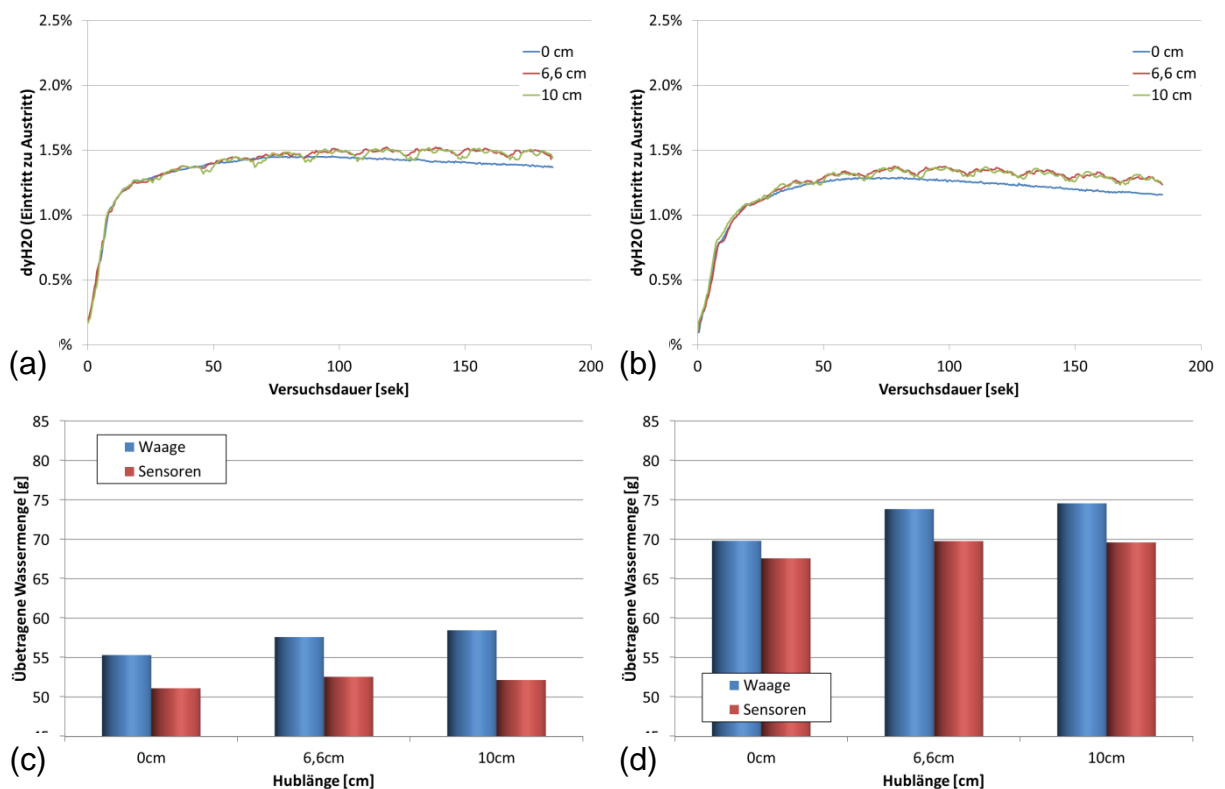


Abb. 5.26: Auswertung übertragene Wassermenge: Konzentrationsdifferenz [g/g] Lufteintritt zu - austritt bei a) 1,0 m/s und b) 1,4 m/s; Vergleich mit Gewichtsverlust c) 1,0 m/s und d) 1,4 m/s

Auch die Auswertung der Feuchtesensormessung über der Schüttung und am Austritt (Abb. 5.26 a, b) zeigte einen deutlichen Einfluss der Mischung auf den Verlauf der Wasserdampfkonzentration der Luft bzw. der Konzentrationsdifferenz zwischen Eintritt und Austritt. Der Verlauf spiegelte dabei qualitativ die Messung der Sensoren am Austritt wider, da die Konzentration am Eintritt über der Versuchsdauer konstant war. Deutlich waren die von Stabbewegung hervorgerufenen Konzentrationsschwankungen bei den bewegten Versuchen zu erkennen. Bei einer Leerrohrgeschwindigkeit von 1,0 m/s (Abb. 5.26 a) war nach der Hälfte der Versuchsdauer ein Maximum erreicht, die Wasserkonzentration am Austritt bei unbewegter Schüttung sank darauf hin. Wurde die Schüttung gemischt, dann blieben die am Austritt gemessenen Werte, abgesehen von den durch die Stabbewegung hervorgerufenen Schwankungen, auf konstantem Niveau. Ähnliches war auch bei einer Leerrohrgeschwindigkeit von 1,4 m/s (Abb. 5.26 b) zu beobachten, mit dem Unterschied, dass die Werte für gemischte und ungemischte Schüttung deutlich früher voneinander abwichen. Die aus der Konzentrationsdifferenz und dem Massenstrom berechnete übertragene Gesamtwassermenge (Abb. 5.26 c, d) war unabhängig von der Leerrohrgeschwindigkeit niedriger, wenn die Schüttung nicht gemischt wurde. Gleiches ergab sich für die gravimetrisch bestimmte übertragene Wassermenge. Dabei war der Unterschied zwischen ruhender und gemischter Schüttung bei 1,4 m/s deutlich größer. Ein Unterschied zwischen gewogenem und über die Messwerterfassung integral bestimmter Wassermenge trat auf, da die während des Be- und Entladevorgangs verdampfte Wassermenge von den Sensoren nicht erfasst wurde.

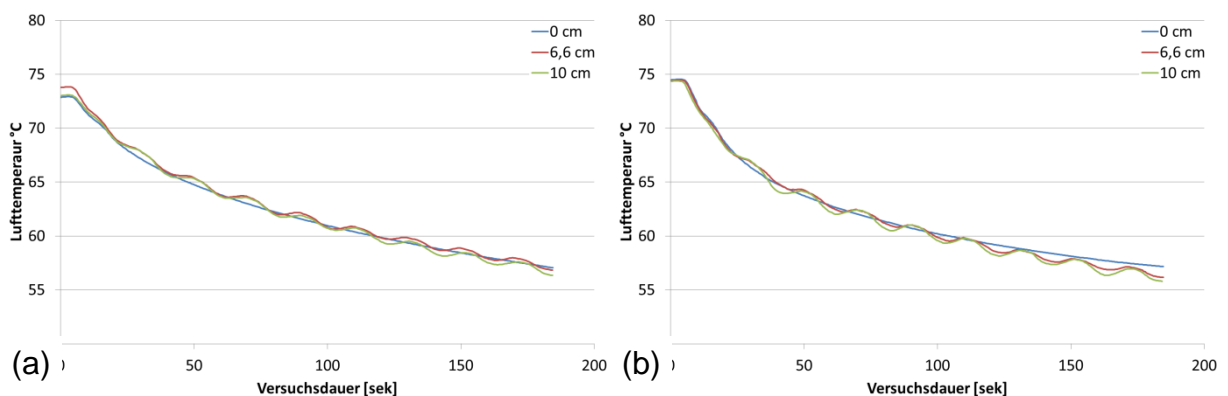


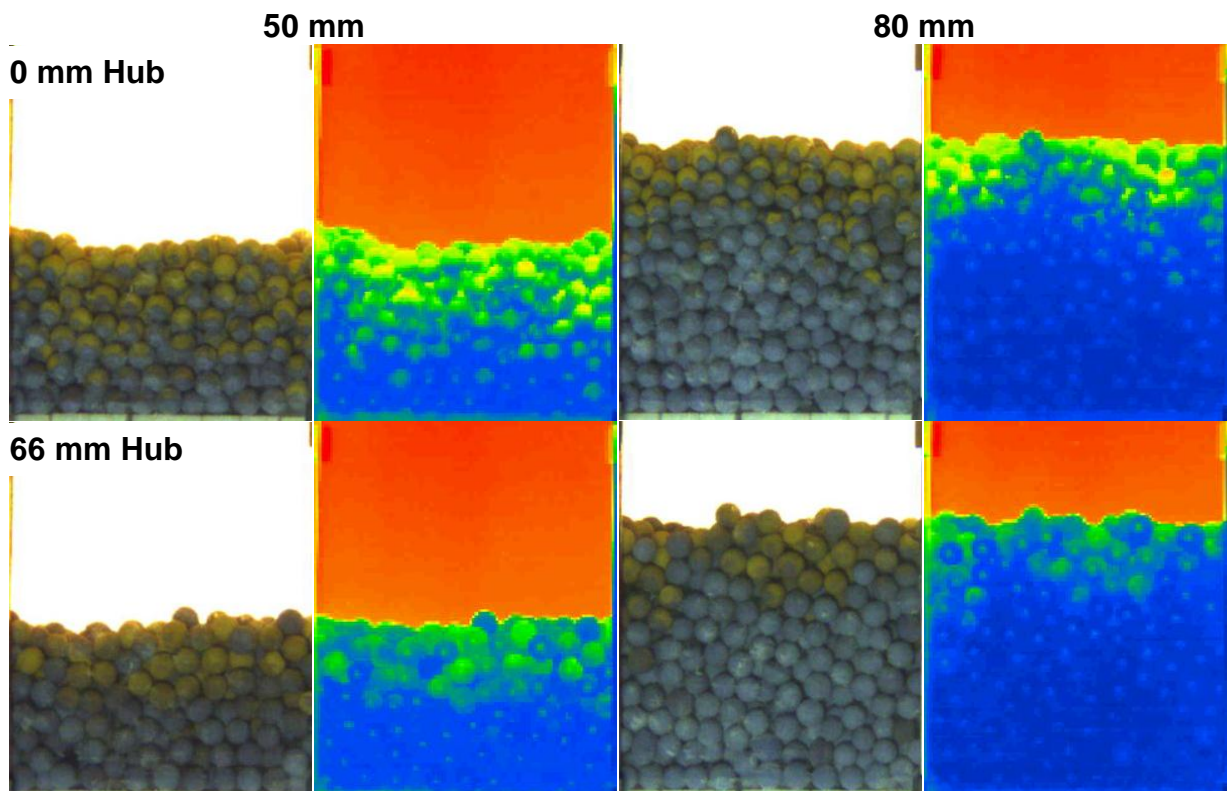
Abb. 5.27: Lufttemperatur in Stabzwischenräumen bei a) 1,0 m/s und b) 1,4 m/s

Auch bei der in den Stabzwischenräumen gemessenen Lufttemperatur (Abb. 5.27) zeigte sich der Einfluss der Mischung. Die periodischen Schwankungen in den Versuchen mit Mischung sind dabei wieder auf die Stabbewegung zurückzuführen. Bei 1,0 m/s Leerrohrgeschwindigkeit (Abb. 5.27 a) sank die unter der Schüttung gemessene Lufttemperatur für gemischten und ungemischten Versuch gleichermaßen ab.

Da die Lufttemperatur über der Schüttung konstant war, ergab sich somit eine vergleichbare Wärmemenge, die von der Luft auf die Partikel übertragen wurde. Wobei die übertragene Energie im unbewegten Versuch anteilig stärker in die Aufheizung der Partikeloberfläche ging (Abb. 5.25 a) und im gemischten Versuch stärker in die Verdampfung des Wassers. Bei 1,4 m/s Leerrohrgeschwindigkeit (Abb. 5.27 b) war der Temperaturabfall unter der Schüttung und damit die übertragene Wärmemenge im ungemischten Experiment geringer. Die Oberflächentemperatur der Partikel der ungemischten Schüttung war insbesondere zu Versuchsende im Durchschnitt deutlich höher als in der gemischten Schüttung (Abb. 5.25 b), dadurch verringerte sich die übertragene Wärmemenge.

Variation der Schütthöhe

Es wurden Versuche bei einer Schütthöhe von 50 mm (750 g Nassgewicht) und 80 mm (1250 g Nassgewicht) durchgeführt. In Abb. 5.28 sind die thermografischen Aufnahmen zu Versuchsende zweier Versuchsreihen mit 1,0 m/s Leerrohrgeschwindigkeit, einem durchschnittlichen Kugeldurchmesser von 7,1 mm und einer Lufttemperatur von 90°C gezeigt.



100 mm Hub

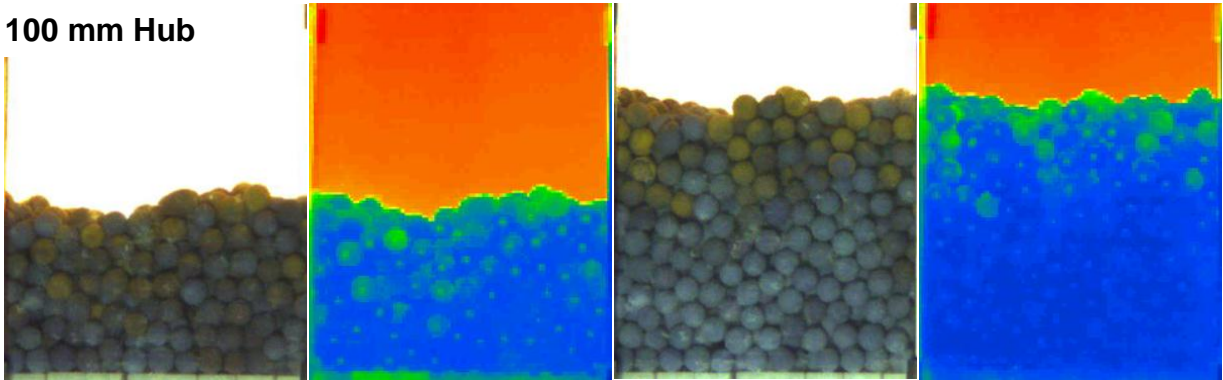
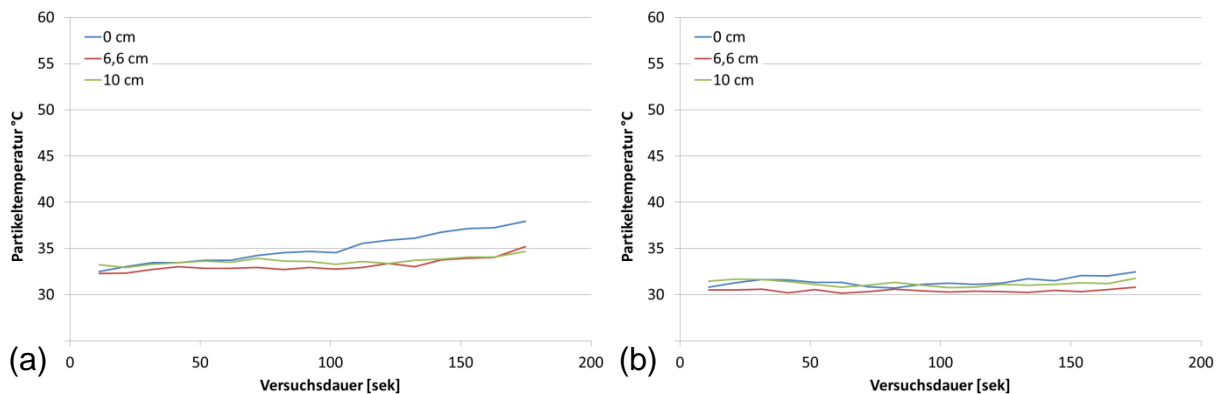


Abb. 5.28: Versuchsende bei einer Schütthöhe von 50 mm und 80 mm: Originalbild mit gefärbten Partikeln (1. Und 3. Spalte) und Thermografische Aufnahme (2. und 4. Spalte) bei 0 mm Hublänge (1. Reihe), 66 mm Hublänge (2. Reihe) und 100 mm Hublänge (3. Reihe)

Bei einer Schütthöhe von 50 mm waren die in den thermografischen Endbildern visualisierten Temperaturen des Versuches in ruhender Schüttung (Abb. 5.28 „0 mm Hub“) deutlich höher als bei gemischter Schüttung (Abb. 5.28 „66 mm Hub“, „100 mm Hub“). Bei einer Schütthöhe von 80 mm waren dagegen nicht so deutliche Unterschiede auszumachen, auch war die Oberflächentemperatur der Partikel in den unteren Schichten niedriger. In den thermografischen Aufnahmen und in der Verfärbung des Feuchteindikators zeigte sich erneut eine deutlicher Unterschied zwischen der oberen und unteren Kugelhälfte, wenn im Versuch nicht gemischt wurde. Bei kontinuierlicher Mischung waren die gemessene Oberflächentemperatur und –feuchte über den Partikelumfang nahezu konstant.



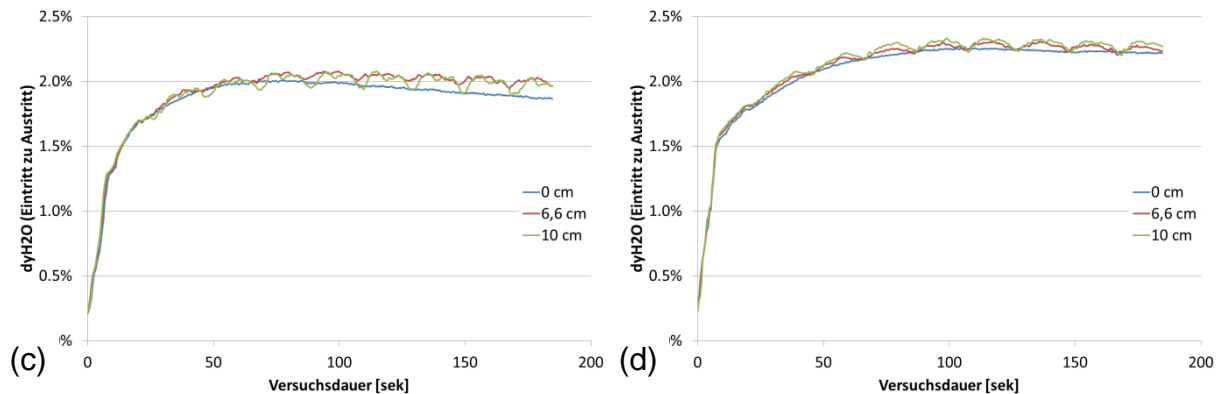


Abb. 5.29: Gemittelten Oberflächentemperatur bei a) 50 mm und b) 80 mm; Auswertung übertragene Wassermenge über Konzentrationsdifferenz [g/g] Lufteintritt zu -austritt bei c) 50 mm und d) 80 mm

Der in den Thermografiebildern zu beobachtende stärkere Temperaturanstieg bei ruhender Schüttung lässt sich anhand der mittleren Oberflächentemperatur quantifizieren (Abb. 5.29 a, b). Bei einer Schütthöhe von 50 mm (Abb. 5.29 a) stieg die mittlere Oberflächentemperatur bei dem ungemischten Versuch über die Versuchsdauer deutlich stärker an. Bei einer Schütthöhe von 80 mm (Abb. 5.29 b) unterschied sich der Temperaturverlauf über die Versuchsdauer nur minimal und das Temperaturniveau war aufgrund der kalten Partikel in den unteren Schichten niedriger als bei 50 mm Schütthöhe. In den Messdaten der Feuchtesensoren am Ein- und Austritt ist der Einfluss der Mischung ebenfalls deutlich zu erkennen (Abb. 5.29 c, d). Bei 50 mm Schütthöhe (Abb. 5.29 c) und unbewegter Schüttung sank die Wasserbeladung der Luft am Austritt bereits nach kurzer Versuchsdauer ab, während sie in den durchmischten Versuchen auf konstantem Niveau verläuft. Bei 80 mm Schütthöhe (Abb. 5.29 d) war der Einfluss von Mischung dagegen geringer, da hier auch bei ruhender Schüttung keine Absinken der Feuchtebeladung am Austritt zu beobachten war.

Variation von Lufttemperatur und Partikeldurchmesser

Die Temperatur der anströmenden Luft betrug in den Versuchsreihen 75°C und 90°C und der mittlere Partikeldurchmesser war, wie in Abschnitt 5.4.2 beschrieben, entweder 7,1 mm oder 8 mm. In Abb. 5.30 sind die thermografischen Aufnahmen zu Versuchsende zweier Versuchsreihen mit 1,0 m/s Leerrohrgeschwindigkeit und einer Schütthöhe von 80 mm gezeigt.

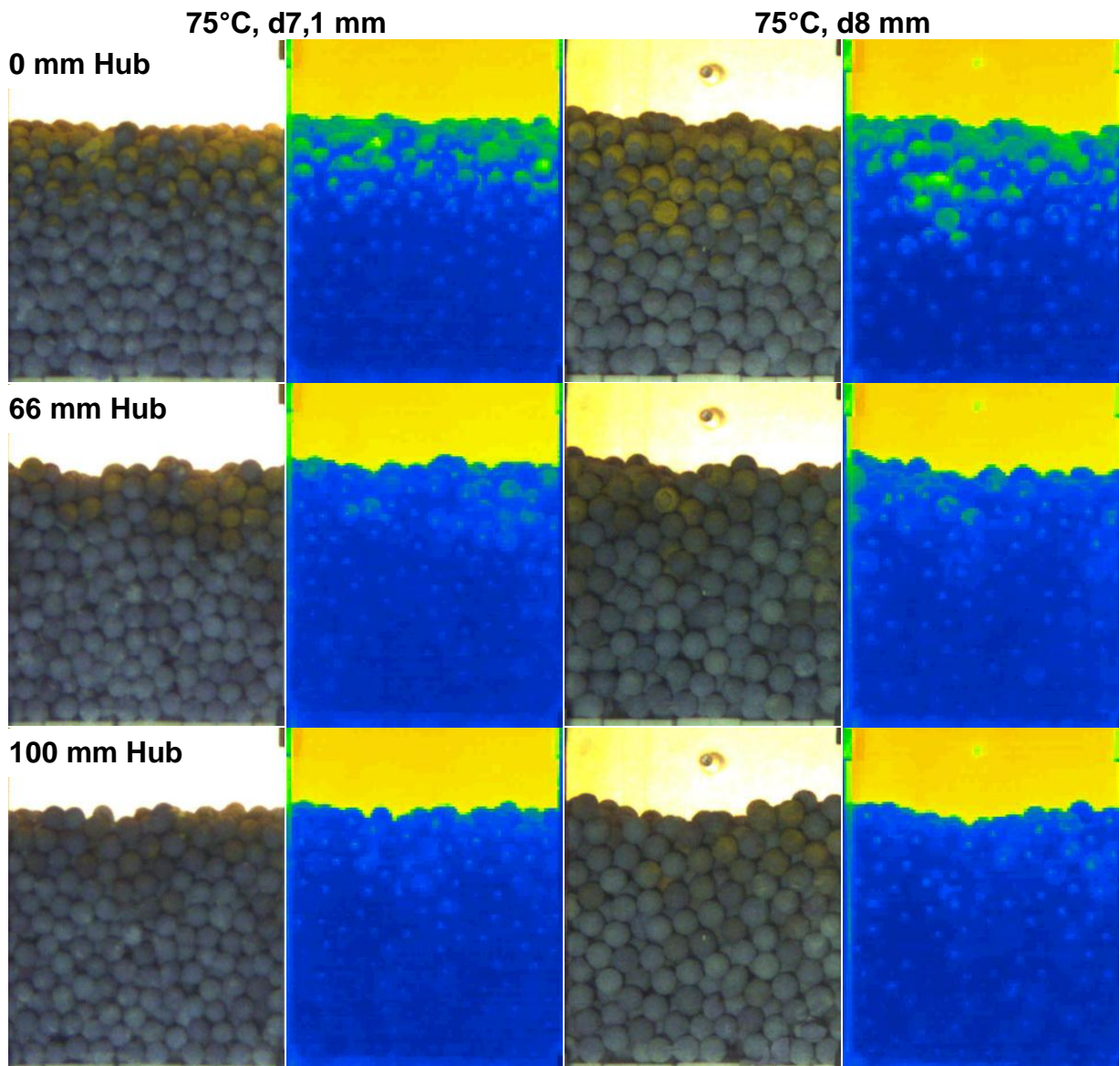


Abb. 5.30: Versuchsende bei einem Partikeldurchmesser von 7,1 mm und 8 mm: Originalbild mit gefärbten Partikeln (1. und 3. Spalte) und Thermografische Aufnahme (2. und 4. Spalte) bei 0 mm Hublänge (1. Reihe), 66 mm Hublänge (2. Reihe) und 100 mm Hublänge (3. Reihe)

Sowohl bei 75°C Lufttemperatur und einem Kugeldurchmesser von 7,1 mm wie auch von 8,0 mm waren in den thermografischen Aufnahmen und in der Verfärbung des Feuchteindikators Unterschiede zwischen der oberen und unteren Kugelhälfte zu erkennen, wenn im Versuch nicht gemischt wurde (Abb. 5.30 „0 mm Hub“). Bei kontinuierlicher Mischung waren die gemessene Oberflächentemperatur und –feuchte über den Partikelumfang nahezu konstant (Abb. 5.30 „66 mm Hub“, „100 mm Hub“). Die visuellen Unterschiede zwischen ungemischtem und gemischtem Versuch waren ähnlich gering wie bei einer Lufttemperatur von 90°C (Abb. 5.28), allerdings zeigten die thermografischen Aufnahmen bei 75°C Lufttemperatur und 80 mm Schütthöhe

he nur einen minimalen Temperaturanstieg. Visuelle Unterschiede zwischen Versuchen mit Silicagel Partikel mit einem Durchmesser von 7,1 mm und 8 mm waren nicht auszumachen.

Dies ergab auch die Auswertung der Messdaten (Abb. 5.31):

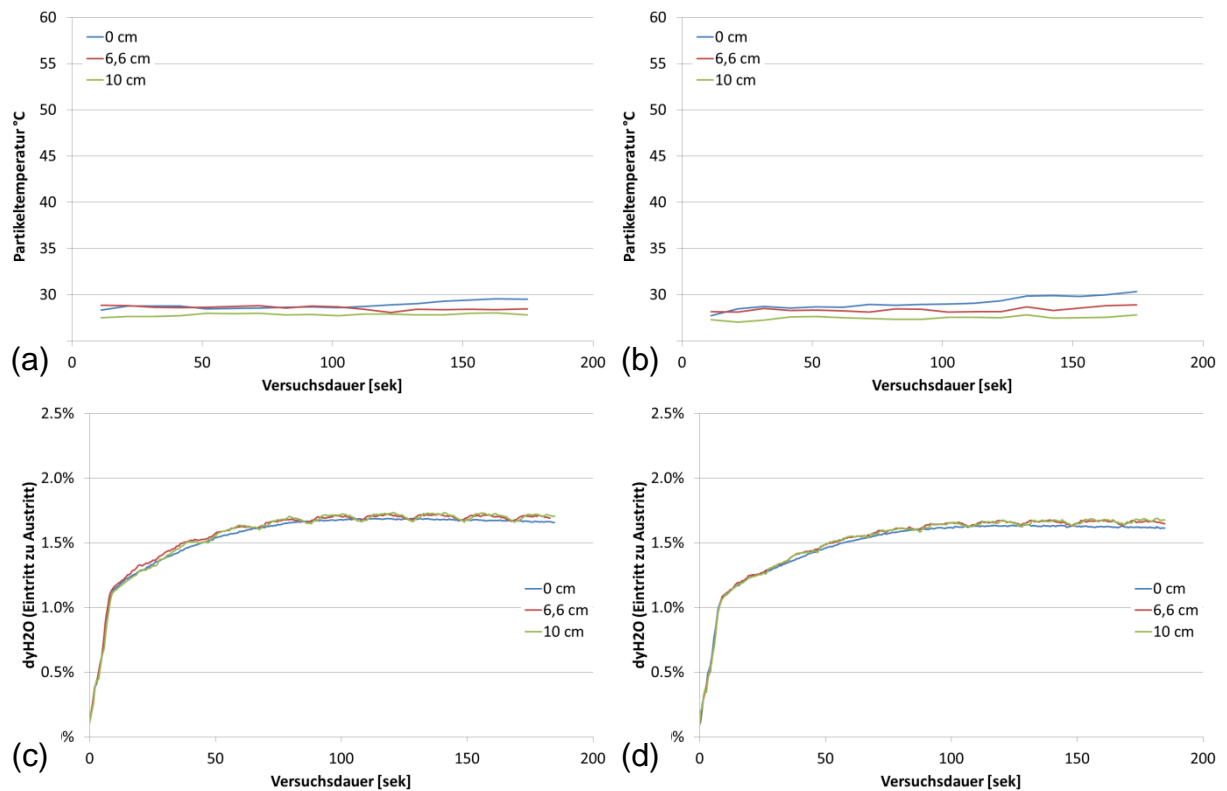


Abb. 5.31: Gemittelten Oberflächentemperatur bei a) 7,1 mm und b) 8 mm Durchmesser; Auswertung übertragene Wassermenge über Konzentrationsdifferenz [g/g] Lufteintritt zu -austritt bei c) 7,1 mm und d) 8 mm Durchmesser

Der Anstieg der mittleren Oberflächentemperatur (Abb. 5.31 a, b) war nahezu identisch für die Schüttung aus 7,1 mm Partikel und 8,0 mm Partikel und ergab leicht höhere Partikeltemperaturen in der ruhenden Schüttung. Das Temperaturniveau lag dabei niedriger als bei einer Lufttemperatur von 90°C (Abb. 5.29 b), da sich dort eine höhere Kühlgrenztemperatur einstellte. Auch der Wasserbeladungsunterschied des Luftstroms am Ein- und Austritt ergab nur einen geringen Einfluss des Partikeldurchmessers (Abb. 5.31 c, d). Bei einem Durchmesser von 8 mm war die übertragene Wassermenge etwas geringer (Abb. 5.31 d). Gegenüber den Versuchen mit 90°C Lufttemperatur (Abb. 5.29 d) wurde dagegen deutlich weniger Wasser übertragen. Der Einfluss von Mischung war etwas stärker bei einem Kugeldurchmesser von 8 mm messbar und, bezogen auf die Lufttemperatur, deutlicher bei 90°C.

5.4.4 DEM-Simulation ausgewählter Experimente

Die Simulation der ausgewählten Trocknungsexperimente sollte, analog zu den Wärmeübertragungsexperimenten (Abschnitt 5.3.3), durch eine instationäre Kopplung des LEAT DEM-Codes mit dem kommerziellen CFD-Code FLUENT erfolgen. Das im DEM-Code bestehende Modell zur Beschreibung der Trocknung am Einzelpartikel musste jedoch zuerst für den Anwendungsfall in mehreren Schritten überprüft und modifiziert werden. Im Folgenden wird zuerst die Überprüfung des DEM-Modells erläutert und danach das modifizierte Trocknungsmodell und dessen Validierung beschrieben. Zum Abschluss werden ausgewählte Experimente mit Simulationen verglichen.

Überprüfung Trocknungsmodell (DEM)

Das im LEAT-DEM Code implementierte Trocknungsmodell ist Bestandteil eines Gesamtmodells zur Berechnung der während der Verbrennung an einem Einzelpartikel ablaufenden thermochemischen Prozesse. Die Beschreibung findet Anwendung für große Partikel, in denen sich über den Radius ein Feuchte- und Temperaturprofil ausbildet. Aufgrund der starken, kontinuierlichen Wärmezufuhr an das Partikel wird angenommen, dass der Trocknungsprozess vorrangig durch die radiale Wärmeleitung im Inneren gehemmt ist und daher allein über den Fortschritt der Siedetemperaturfront (100°C) beschrieben werden kann (Abb. 5.32 a). Das DEM-Verbrennungsmodell ist detaillierter in einer Arbeit von Brosch et al. [2] beschrieben.

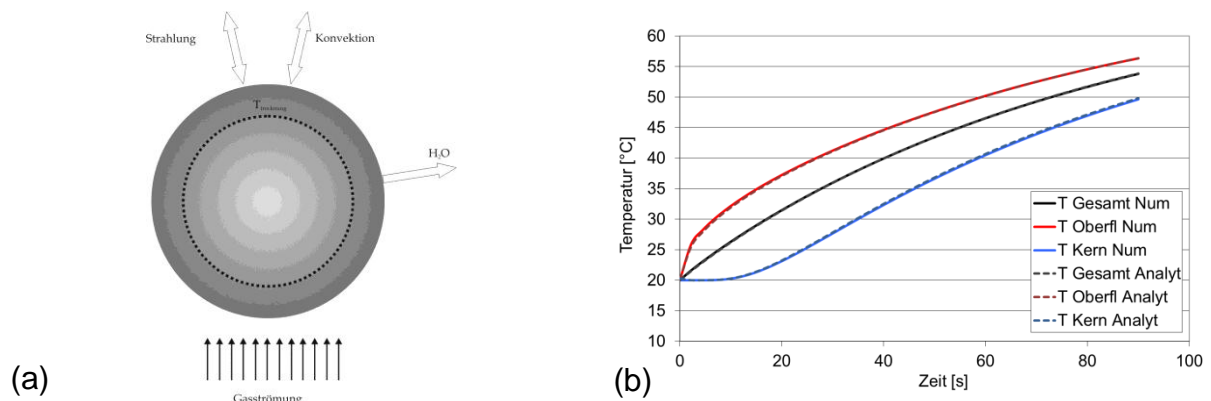


Abb. 5.32: a) Trocknungsfrontmodell, b) Einzelpartikelauflaufzeit: Vergleich analytische und numerische Lösung der radialen Wärmeleitungsgleichung

In der Berechnung der radialen Wärmeleitung im Partikel musste berücksichtigt werden, dass sich mit der lokalen Wasserbeladung auch die Stoffwerte (Dichte, Wärmekapazität, etc.) über den Radius und die Zeit ändern und lokale Wärmesenken auftreten.

ten. Eine analytische Lösung der Gleichung (5.2) zur Beschreibung der radialen Wärmeleitung war somit nicht zulässig. Die Berechnung der radialen Temperaturverteilung musste daher numerisch erfolgen. Die numerische Lösung wurde zuerst für ein konvektiv aufgeheiztes Einzelpartikel mit der analytischen Lösung verglichen (Abb. 5.32 b). Der mit beiden Verfahren berechnete zeitliche Verlauf der Gesamt-, Oberflächen und Kerntemperatur war nahezu identisch. Zusätzlich wurden unter Verwendung des numerischen Lösungsverfahrens einzelne Wärmeübertragungsexperimente simuliert. In Abb. 5.33 sind für vier Versuche die Temperaturverteilung über der Schütthöhe in Strömungsrichtung aufgetragen. Verglichen werden die experimentellen Ergebnisse mit den Simulationsergebnissen bei analytischer und numerischer Lösung der radialen Wärmeleitungsgleichung.

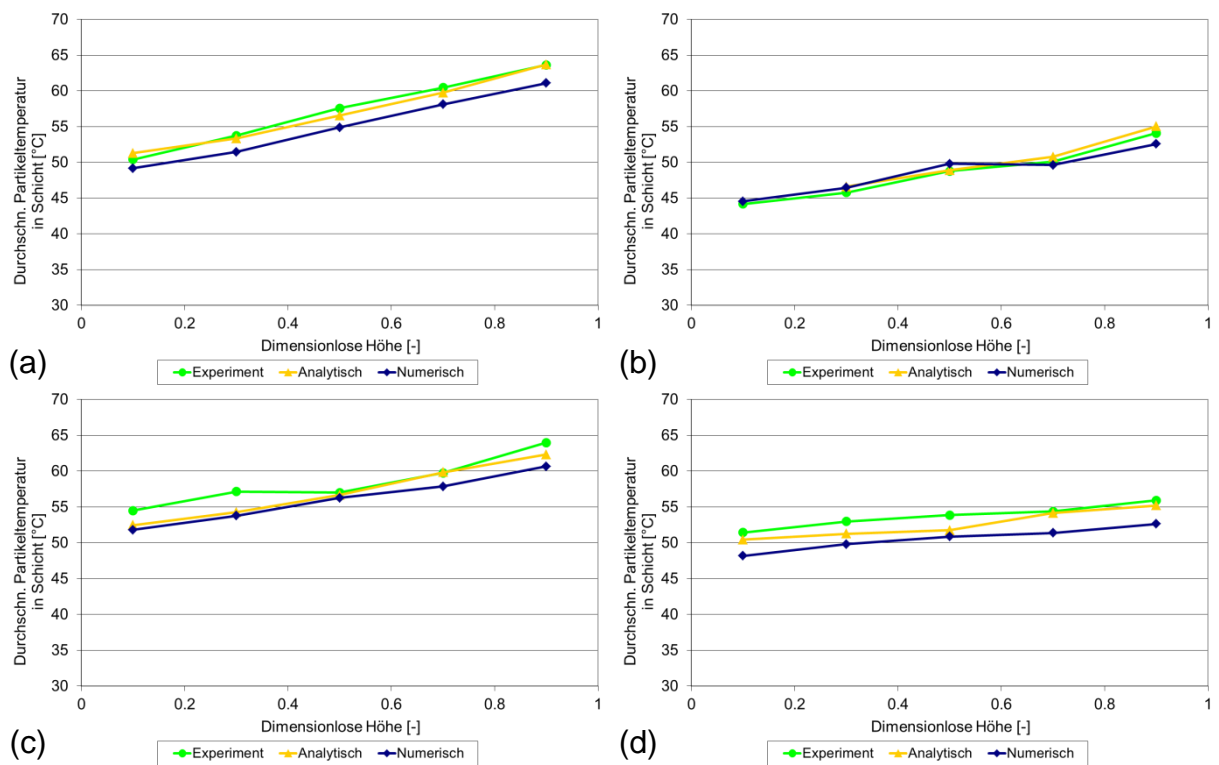


Abb. 5.33: Vergleich Temperaturprofil über der Schütthöhe zum Versuchsende bei 100 mm Schütthöhe in a) ruhender Schüttung und b) Wellenmodus mit 132 mm Hublänge und bei 50 mm Schütthöhe in c) ruhender Schüttung und d) 132 mm Hublänge

Die Simulationsergebnisse und die experimentellen Ergebnisse für das Temperaturprofil zeigten auch bei dem numerischen Lösungsverfahren nur geringe Abweichungen. Insbesondere bei 100 mm Schütthöhe und starker Durchmischung waren die berechneten nahezu identisch zu dem experimentell gemessenen Temperaturprofil (Abb. 5.33 b). Kleine Abweichungen auch zwischen analytischem und numerischem Lösungsverfahren gab es vor allem bei 50 mm Schütthöhe (Abb. 5.33 c, d) und bei ruhender Schüttung (Abb. 5.33 c). Hier ist jedoch zu beachten, dass bei den Simula-

tionen mit analytischen Lösungsverfahren die DEM-CFD-Kopplungsmethodik auf die Experimente optimiert war. Bei den Simulationen mit numerischen Lösungsverfahren wurde eine allgemein gültigere Kopplungsmethodik verwendet. Aufgrund der fast perfekten Übereinstimmung der mit beiden Verfahren für ein Einzelpartikel berechneten, radialen Temperaturverteilung (Abb. 5.32 b) ist somit zu erwarten, dass bei entsprechender Anpassung der Kopplungsmethodik die Abweichungen bei ruhender Schüttung und 50 mm Schütthöhe minimiert werden könnten.

Modifiziertes Trocknungsmodell und Validierung

Für die Anwendung des im LEAT-DEM Code implementierte Trocknungsmodell auf die Experimente ergaben sich nach der Überprüfung des numerischen Lösungsverfahrens für die Berechnung der radialen Temperaturverteilung jedoch weitere Probleme. Bei einer geringen Wärmezufuhr bzw. Lufttemperaturen, die nicht deutlich über der Siedetemperatur sind, wird von dem nassen Partikel bereits viel Wasser an die Luft übertragen bevor die äußere Partikelschale eine Temperatur von 100°C erreicht und die Trocknung über den Fortschritt der Siedetemperaturfront beschrieben werden kann. Wenn die anströmende Luft eine Temperatur unter 100°C aufweist, wie es in den Experimenten der Fall war, dann ist die Trocknung nicht über die Siedetemperaturfront beschreibbar. Zudem sind experimentelle Beobachtungen wie das Verweilen der Silicagel Partikel auf der Kühlgrenztemperatur und ein asymptotisches Abflachen der Trocknungsgeschwindigkeit aufgrund der Diffusionshemmung im Partikel mit dem zuerst implementierten Modell nicht beschreibbar. Zusätzlich wird nur die Wasserabgabe und nicht die Wasseraufnahme aus der Luft berücksichtigt. In den Experimenten konnte dies jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Aus den genannten Gründen musste daher eine Modifikation des Trocknungsmodells erfolgen. Um den konvektiven Stoffübergang des Wassers von Partikeloberfläche an die Luft auch bei Temperaturen unter 100°C zu bestimmen, wurde dieser aufgrund der Wasserkonzentrationsdifferenz zwischen Partikeloberfläche und warmen Luftstrom berechnet:

$$\dot{n}_{H_2O} = \beta_{Konv} \cdot A_S \cdot (c_{H_2O,L} - c_{H_2O,S}) \quad (5.9)$$

Der Stoffübergangskoeffizient wird analog zur konvektiven Wärmeübertragung über die Sherwood- (5.10) und Schmidt-Zahl (5.11) berechnet:

$$Sh = \frac{\beta_{Konv} \cdot l}{D_{H_2O,L}} \quad (5.10)$$

$$Sc = \frac{v}{D_{H_2O,L}} \quad (5.11)$$

Die Sherwood-Zahl wurde dabei wie Nusselt-Zahl für ein umströmtes kugelförmiges Partikel in einer Schüttung bestimmt:

$$Sh_p = 2 + \sqrt{Sh_{lam}^2 + Sh_{turb}^2} \quad (5.12)$$

$$Sh_{lam} = 0.664 \cdot Re^{1/2} \cdot Sc^{1/3} \quad (5.13)$$

$$Sh_{turb} = \frac{0.037 \cdot Re^{0.8} \cdot Sc}{1 + 2.443 \cdot Re^{-0.1} \cdot (Sc^{2/3} - 1)} \quad (5.14)$$

$$Sh = f_\varepsilon \cdot Sh_p \quad (5.15)$$

Die radiale Stoffdiffusion im Partikel wird über das 2. Fick'sche Gesetz als Funktion der Wasserbeladung des trockenen Feststoffs mit einem effektiven Diffusionskoeffizienten beschrieben:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{H_2O,eff} \cdot \left(\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (5.16)$$

Die Lösung der Differentialgleichung erfolgt wie bei der radialen Wärmeleitung numerisch. Weiterhin wurde angenommen, dass sich an der Partikeloberfläche unmittelbar ein Gleichgewicht zwischen Wasserbeladung des Silicagels und Wasserkonzentration der Luft einstellt, dass über eine vereinfachte Sorptionsisotherme beschrieben wird (Abb. 5.34). Vereinfachend wurde angenommen, dass sich ab einer Wasserbeladung von 0,4 an der Partikeloberfläche Sättigungsdampfdruck einstellt.

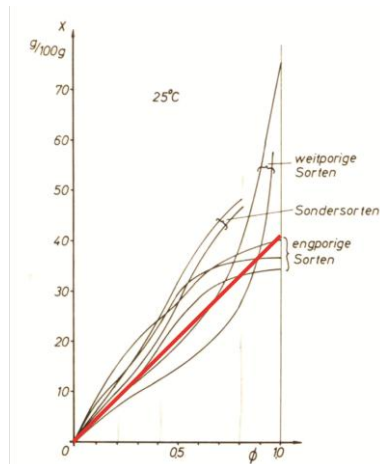


Abb. 5.34: Sorptionsisothermen Silicagel [3]

Vor der Anwendung des modifizierten Trocknungsmodells zur Simulation ausgewählter Experimente, mussten zuerst jedoch für die Trocknung relevante Stoffparameter bestimmt werden und das Modell durch konvektive Trocknungsversuche mit Einzelpartikeln validiert werden.

Da die für Silicagel in der Literatur angegebenen Stoffwerte teilweise stark variierten, bzw. nicht spezifiziert wurde um welchen Silicageltyp es sich handelt, wurden die Mehrheit der Parameter experimentell bestimmt. Die spezifische Wärmekapazität wurde mit getrocknetem Silicagel in einem dynamischen Differenzkalorimeter bestimmt. Der aus mehreren Proben gemittelte Verlauf der Wärmekapazität über die Temperatur ist in Abb. 5.35 a dargestellt. Für den Temperaturbereich, in denen die Trocknungsexperimente stattfanden, betrug die spezifische Wärmekapazität annähernd konstant 740 J/kgK. Zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit wurde die Temperaturleitfähigkeit über Laser Flash Messungen (Abb. 5.35 b) bestimmt. Im Durchschnitt wurde mit einem temperaturunabhängigen Wert von 0,003 cm²/s bzw. einer Wärmeleitfähigkeit von 0,17 W/mK gerechnet.

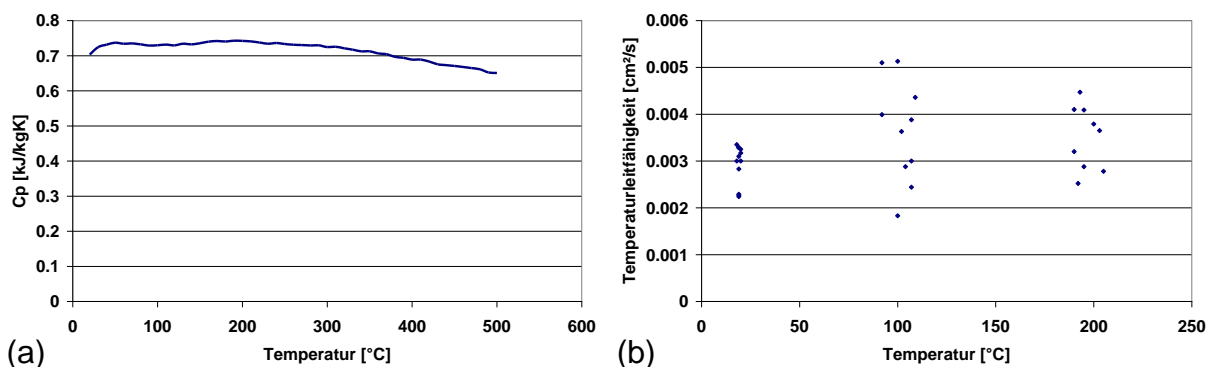


Abb. 5.35: Stoffparameterbestimmung Silicagel: a) Wärmekapazität, b) Temperaturleitfähigkeit

Die Bestimmung des effektiven Diffusionskoeffizienten und die Validierung des modifizierten Trocknungsmodells erfolgten durch Experimente an einer Thermowage. Ein einzelnes Silicagel Partikel wurde vor Versuchsbeginn mit Wasser befeuchtet und auf den Wägeteller gegeben. Die Trocknung erfolgte konvektiv über einen vorgewärmten Luftstrom bei gleichzeitiger kontinuierlicher Messung der Gewichtsabnahme. In Abb. 5.36 sind die dadurch experimentell messbaren Trocknungsgeschwindigkeiten für zwei Lufttemperaturen über die Versuchsdauer dargestellt. Anhand der Trocknungsverläufe wurde der in dem Trocknungsmodell verwendete effektive Diffusionskoeffizient bestimmt und an die experimentellen Ergebnisse angepasst. Er ergab sich zu $2,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Mit dem modifizierten Trocknungsmodell wurden unter Verwendung der angegebenen Stoffparameter der zeitlichen Trocknungsverläufe bei variiertem Lufttemperatur, Leerrohgeschwindigkeit und Partikeldurchmesser berechnet und mit experimentellen Daten verglichen. Es ergab sich eine gute Übereinstimmung zwischen experimentellen und berechneten Trocknungsverläufen (Abb. 5.36).

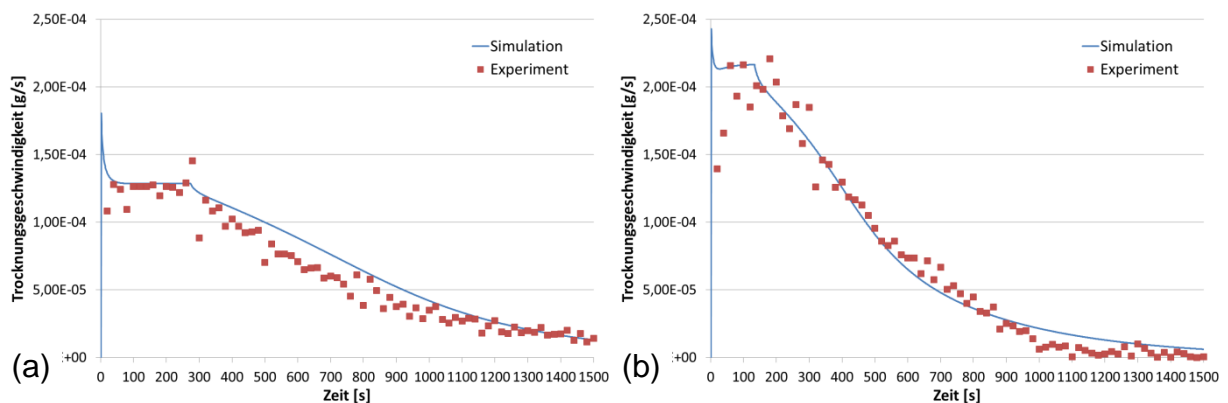


Abb. 5.36: Experimentell bestimmte und berechnete Trocknungsgeschwindigkeit eines einzelnen Silicagel Partikels bei a) 75°C und b) 105°C

Vergleich DEM-Simulationen und Experiment

Ein Vergleich zwischen Simulation und Experiment wurde für mehrere Versuchsreihen durchgeführt. Zum einen erfolgte er visuell über die thermografischen Aufnahmen und die Farbaufnahmen der mit Feuchteindikator versetzten Silicagel Partikel. Weiterhin erfolgte die quantitative Analyse des durch die Saphirglasscheibe gemessenen bzw. simulierten Temperatur- und Feuchteprofils über der Schüttung in Strömungsrichtung. Als integrale Größe für den Vergleich von Experiment und Simulation wurde die übertragene Gesamtwassermenge verwendet.

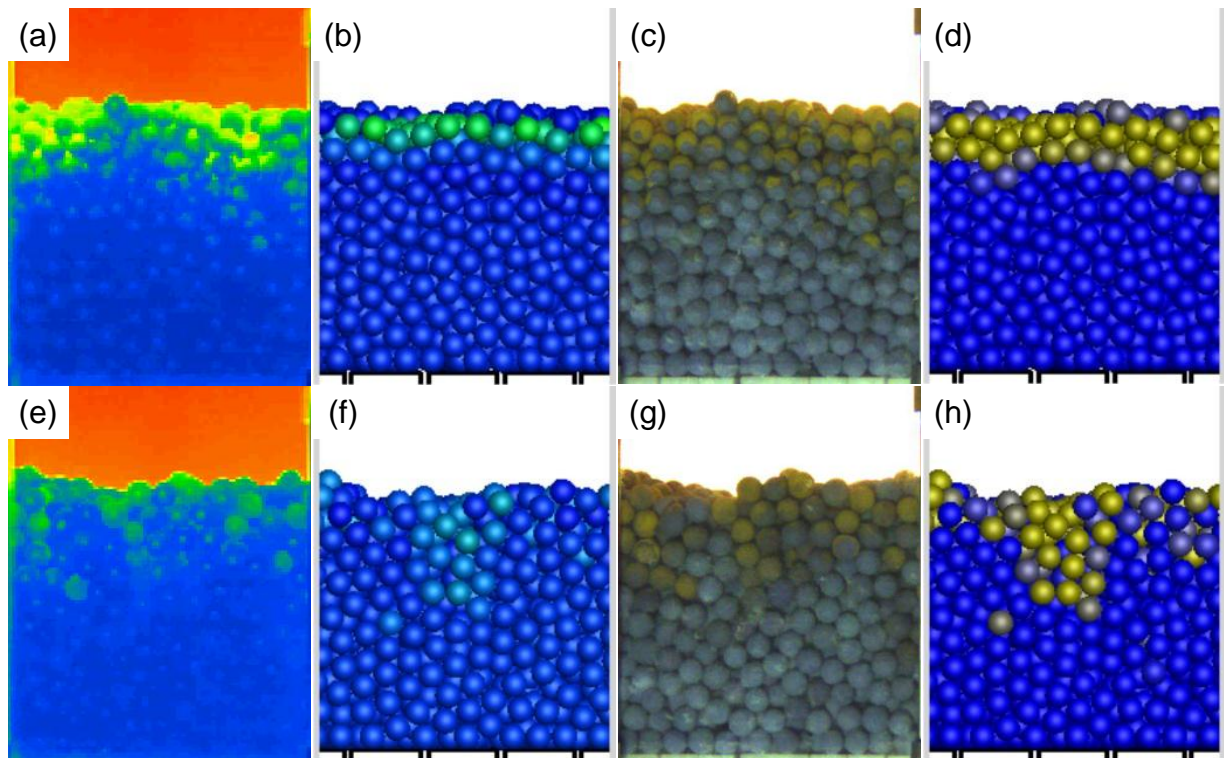


Abb. 5.37: Vergleich Versuche mit 1,0 m/s Leerrohrgeschwindigkeit, 8 mm Schütthöhe, 90°C Lufttemperatur und 7,1 mm Kugeldurchmesser: thermografische Aufnahme von Experiment (a,e) und Simulation (b,f) und Verfärbung Feuchteindikator in Experiment (c,g) und Simulation (d,h) bei 0 mm (a-d) und 100 mm Hublänge (e-h)

In Abb. 5.37 sind thermografische Bilder und Aufnahmen der mit Feuchtigkeitsindikator versetzten Silicagel Partikel vom Versuchsende für Experiment und Simulation gegenübergestellt. Die Versuche mit Mischung (Abb. 5.37 e-h) zeigten dabei eine qualitativ gute Übereinstimmung. Bei den Versuchen mit ruhender Schüttung (Abb. 5.37 a-d) ergab die visuelle Auswertung dagegen etwas stärkere Unterschiede, insbesondere für die oberste Partikelreihe. In den Simulationen ergab sich, bedingt durch den für die Nusselt- bzw. Sherwood-Korrelationen verwendeten Korrekturfaktor (5.7), ein geringerer konvektiver Wärme- und Stoffübergang für die in der obersten Schicht liegenden Partikel. Zudem wurden die experimentell sichtbaren Unterschiede zwischen oberer und unterer Partikelhälfte in den Simulationen nicht aufgelöst. So erfolgte die Trocknung und Aufheizung der Partikeloberfläche zwar über den kompletten Umfang war aber auf weniger Partikel in den obersten Schüttungsschichten begrenzt. Insgesamt waren die visuellen Unterschiede jeweils deutlicher anhand der thermografischen Aufnahmen festzumachen (Abb. 5.37 a, b, e, f).

Da aufgrund der hohen Anfangsfeuchte der Temperaturanstieg der Silicagelschüttung gering war, wird in Abb. 5.38 das durch Bildauswertung bestimmte Temperaturprofil über der Schüttung nur beispielhaft für zwei Versuche mit der größten Tempe-

raturerhöhung gezeigt. Die durchschnittliche Temperatur ist dazu für vier Schichten über die Versuchsdauer aufgetragen, wobei die 1. Schicht das oberste Viertel der Schüttung beinhaltet (zuerst angeströmt) und die 4. Schicht das unterste Viertel. Da in den Experimenten nur die Partikel an der Saphirglasscheibe ausgewertet wurden, beinhaltete Mittelwerte der Simulation auch nur die an der Scheibe anliegenden Partikel.

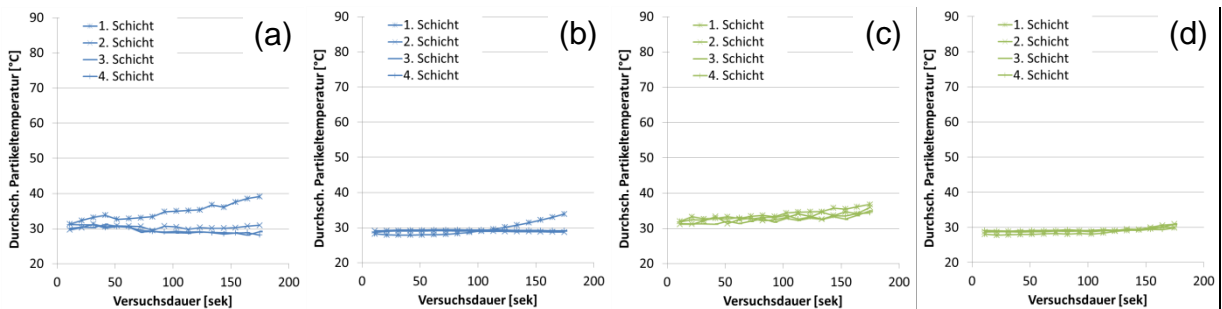


Abb. 5.38: Vergleich Temperaturprofil über der Schütthöhe in Strömungsrichtung, Versuche mit 1,4 m/s Leerrohrgeschwindigkeit, 5 mm Schütthöhe, 75°C Lufttemperatur und 8 mm Kugeldurchmesser: Experiment (a,c,e,g) und Simulation (b,d,f,h) bei 0 mm Hublänge (a,b,e,f) und 10 mm Hublänge (c,d,g,h)

Die gemessene Oberflächentemperatur in den Experimenten (Abb. 5.38 a, c) lag im Durchschnitt etwas über der der Simulation (Abb. 5.38 b, d). Dies lag zum einen daran, dass die Partikel die Wärmestrahlung der heißen Versuchsstandwände in Richtung der Thermokamera reflektierten und so zu einem Messfehler führten. Zusätzlich ergaben sich durch die in der Simulation verwendeten Modellannahmen Unterschiede. So wurde, wie in Abb. 5.34 gezeigt, eine vereinfachte Beziehung zwischen Wasserbeladung der Partikeloberfläche und Dampfgehalt an der Oberfläche angenommen, die dazu führt, dass die Partikeloberfläche länger auf der Kühlgrenztemperatur verweilte. Entscheidend ist aber, dass in den Experimenten bereits nach kurzer Versuchsdauer an einige Partikeln erste trockene Stellen auf der Oberfläche entstanden. Ab diesem Zeitpunkt begann die Oberflächentemperatur lokal begrenzt zu steigen und der Anstieg wurde messtechnisch erfasst. In den Simulationen wird die Wasserbeladung nicht über den Partikelumfang aufgelöst, deswegen lag der Zeitpunkt an dem die (dann komplette) Oberfläche trocken ist und die Temperatur an der Oberfläche ansteigt deutlich weiter hinten. Dieser Effekt ist insbesondere an dem Temperaturverlauf in der obersten Schicht bei unbewegter Schüttung zu sehen (Abb. 5.38 a, b). Ein Temperaturanstieg setzte in Simulationen deutlich später ein. Qualitativ zeigten Simulation und Experiment dagegen eine sehr gute Übereinstimmung. Die Temperaturunterschiede zwischen oberste Schicht und dem Rest der Schüttung, die bei unbewegter Schüttung sowohl in Experiment (Abb. 5.38 a) wie auch in Simulation

(Abb. 5.38 b) gemessen wurden, wurden bei Durchmischung in Experiment (Abb. 5.38 c) und Simulation (Abb. 5.38 d) ausgeglichen.

Ein Vergleich des Feuchteprofils wird in Abb. 5.39 anhand von zwei Versuchsreihen dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass hier nur ein qualitativer Vergleich stattfinden kann, da der Feuchteindikator keine kontinuierliche Farbänderung aufweist, sondern einen eher sprunghaften Umschlag, wenn das in den Kapillaren bzw. Poren frei bewegliche Wasser an der Oberfläche verdampft ist. Eine quantitative Messung der Oberflächenfeuchte ließ sich somit in den Experimenten nicht durchführen.

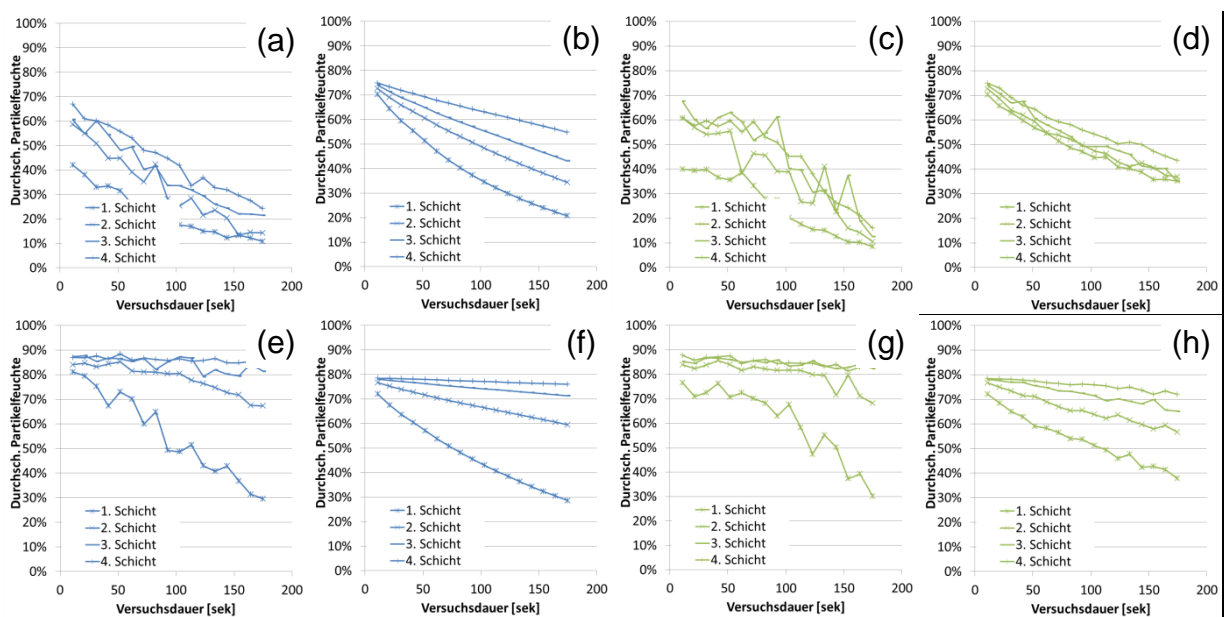


Abb. 5.39: Vergleich Feuchteprofil über der Schütthöhe in Strömungsrichtung, Versuche mit 1,4 m/s Leerrohrgeschwindigkeit, 50 mm Schütthöhe, 75°C Lufttemperatur und 8 mm Kugeldurchmesser (a-d) und Versuche mit 1,0 m/s Leerrohrgeschwindigkeit, 80 mm Schütthöhe, 90°C Lufttemperatur und 7,1 mm Kugeldurchmesser (e-h): Experiment (a,c) und Simulation (b,d) bei 0 mm Hublänge (a,b) und 100 mm Hublänge (c,d)

Der in den Experimenten (Abb. 5.39 a, c, e, g) gemessene Einfluss von Mischung auf die Oberflächenfeuchtigkeit der an der Saphirglasscheibe anliegenden Partikel wurde in den Simulationen (Abb. 5.39 b, d, f, h) qualitativ vergleichbar wiedergegeben. In der Versuchsreihe mit 50 mm Schütthöhe (Abb. 5.39 a-d) unterschied sich der ungemischte und der Versuch mit 100 mm Hublänge in den Simulationen deutlicher als in den Experimenten. Ursache dafür waren die bereits beschriebenen Feuchtigkeits- und Temperaturunterschiede über den Umfang der Partikel bei ruhender Schüttung (vgl. Abb. 5.24). Dadurch setzte bereits nach kurzer Versuchsdauer eine erste Verfärbung der Partikeloberfläche auch in den unteren Schichten ein (Abb. 5.39 a). In der Simulation wurden Feuchteunterschiede über den Partikelumfang nicht aufgelöst.

Die experimentell bestimmten und in Simulationen berechneten Feuchteprofile für die Versuchsreihe mit 80 mm Schütthöhe stimmen dagegen qualitativ sehr gut überein (Abb. 5.39 e-h). Die Unterschiede zwischen den beiden Versuchsreihen bzw. den charakteristischen Verlauf der Oberflächenfeuchtigkeit über die Versuchsdauer, der sich abhängig von den Versuchsparametern in den Experimenten ergab, wurde zudem mit sehr guter Annäherung auch in den Simulationen berechnet.

Neben dem visuellen Vergleich und dem quantitativen Vergleich der gemessenen Oberflächentemperatur und -feuchte bzw. deren Profil über die Schüttung in Strömungsrichtung, wurden die gekoppelten DEM-FLUENT-Simulationen anhand der insgesamt in einem Versuch übertragenen Wassermenge überprüft. Diese integrale Größe würde bei industriellen Anlagen als ein Hauptkriterium zur Prozessbeurteilung dienen. In Abb. 5.40 sind daher die experimentell, gravimetrisch bestimmten (gestrichelte Linie) und in Simulationen berechneten (durchgezogene Linie) übertragenen Wassermengen für 6 Versuchsreihen mit variierten Betriebsparametern in Abhängigkeit von der Hublänge gegenübergestellt.

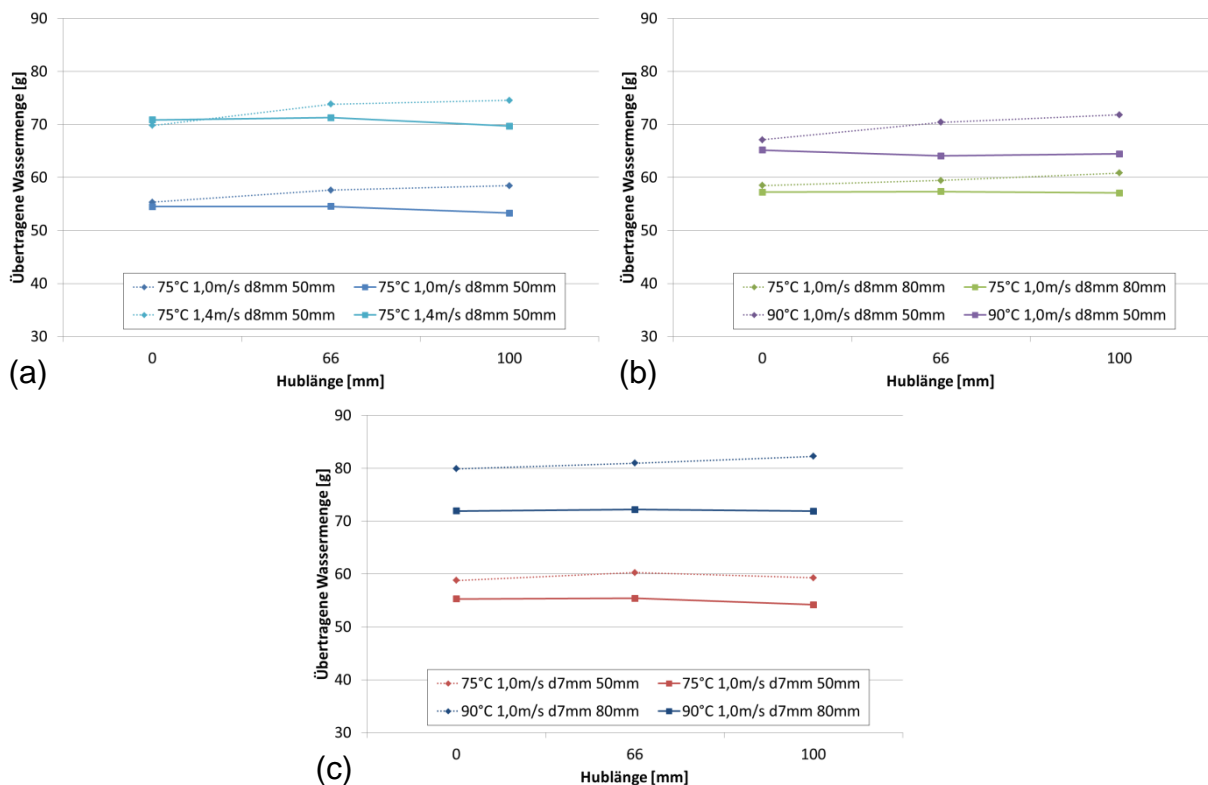


Abb. 5.40: Gemittelten Oberflächentemperatur bei a) 50 mm und b) 80 mm; Auswertung übertragene Wassermenge über Konzentrationsdifferenz [g/g] Lufteintritt zu -austritt bei c) 50 mm und d) 80 mm

Bei einer Schütthöhe von 50 mm und 8 mm Partikeldurchmesser und einer Lufttemperatur von 75°C (Abb. 5.40 a) war die in der Simulationen mit ruhender Schüttung berechnete übertragene Wassermenge nahezu identisch zu den experimentellen Messergebnissen. Die Abweichung zwischen Experiment und Simulation war dagegen größer, wenn die Schüttung gemischt wurde. Der in den Experimenten gemessene Einfluss von Mischung auf die Stoffübertragung, eine Steigerung der übertragenen Wassermenge mit der Hublänge, ergab sich in den Simulationen nicht in diesem Maße. Ein entscheidender Grund dafür ist, wie bereits angeführt, dass in den Simulationen Temperatur und Feuchte nicht über den Partikelumfang aufgelöst werden. Somit wurde in den Simulationen nicht berücksichtigt, dass bei Durchmischung des Silicagels zum Teil Partikel mit trockener oberer und noch feuchter unterer Halbkugel so gedreht wurden, dass die feuchte Seite wieder in Strömungsrichtung lag. Dieser Effekt steigerte in den Experimenten die übertragene Wassermenge bei Durchmischung der Schüttung. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die zur Beschreibung des konvektiven Wärme- und Stoffübergangs verwendeten Korrelationen empirisch anhand von Experimenten in ruhender Schüttung bestimmt wurden und von einer homogenen Oberflächentemperatur bzw. –feuchte ausgehen. Die Gültigkeit bei den experimentell zu beobachteten deutlichen Profilen über den Partikelumfang ist somit nicht überprüft. Der durch die übertragene Wassermenge quantifizierte Einfluss der Leerrohrgeschwindigkeit ergab sich hingegen in den Simulationen so, wie er experimentell ermittelt wurde. Der Unterschied zwischen Versuchen mit 1,0 m/s und 1,4 m/s Leerrohrgeschwindigkeit bei ansonsten gleichen Betriebsparametern war in Experiment und Simulation annähernd gleich. Für die untersuchten Versuchsreihen mit 80 mm Schütthöhe bzw. einer Lufttemperatur von 90°C (Abb. 5.40 b) war ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung von Experiment und Simulation bei ruhender Schüttung zu beobachten. Unterschiede ergaben sich erneut bei den Versuchen mit Mischung. Allerdings wurde auch hier der Einfluss der Betriebsparameter Leerrohrgeschwindigkeit und Lufttemperatur qualitativ und quantitativ korrekt durch die Simulationen wiedergegeben. Größere Abweichungen zwischen Experiment und Simulation, auch in ruhender Schüttung, waren jedoch bei den Versuchsreihen mit einem Partikeldurchmesser von 7,1 mm zu beobachten (Abb. 5.40 c). Ein Grund dafür war die Annahme einer monodispersen Schüttung in den Simulationen. Wie in Abb. 5.23 c zu sehen, war bei der kleineren Siebfraktion die Abweichung vom mittleren Durchmesser (7,1 mm) deutlich höher. Da eine der für den konvektiven Übergang entscheidende Einflussgrößen, die Partikeloberfläche, exponentiell mit dem Durchmesser steigt, führte diese Vereinfachung bei der Versuchsreihe mit der kleineren Siebfraktion zu deutlich größeren Abweichungen zwischen Experiment und Simulation.

Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass der Vergleich ausgewählter Experimente mit gekoppelten DEM-FLUENT Simulationen eine sehr gute Übereinstimmung bei ruhender Schüttung ergab. Auch der Einfluss von Betriebsparametern (Leerrohrgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Schütthöhe) wurde durch die Simulationen korrekt wiedergegeben. Bei der Simulation von Schüttungen mit Mischung ergaben sich größere Abweichungen. Hier wurden die Ursachen erkannt und Ansätze zur Verbesserung identifiziert.

5.4.5 Analyse des Einflusses von Mischung auf die Stoffübertragung in bewegten Schüttungen

Die detaillierte Analyse des Einflusses von Mischung auf die Stoffübertragung in bewegten Schüttungen erfolgte, abweichend zur Analyse des Einflusses von Mischung auf die Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen (Kapitel 5.3.4), ausschließlich anhand experimenteller Daten. Vergleichbare Start- und Randbedingungen waren an dem Trocknungsversuchsstand wesentlich genauer einzustellen als bei den Aufheizversuchen. Zudem konnte als Bilanzgröße die übertragene Wassermenge sowohl gravimetrisch als auch über die Feuchtigkeitssensoren am Ein- und Austritt bestimmt werden. Die übertragene Wärmemenge war bei den Aufheizversuchen dagegen experimentell schwer zu ermitteln und wurde deshalb in den Simulationen berechnet. Aus den genannten Gründen wurde daher keine Parametervariation zum Einfluss der Mischung auf die Stoffübertragung in bewegten Schüttungen mit DEM-FLUENT-Simulation durchgeführt.

Untersucht wurde der Einfluss von Mischung auf die Stoffübertragung in Abhängigkeit von der Leerrohrgeschwindigkeit, der Schütthöhe, der Lufttemperatur und dem Partikeldurchmesser. Dabei ist erneut hervorzuheben, dass im Folgenden nicht der direkte Einfluss von Leerrohrgeschwindigkeit, Schütthöhe, Lufttemperatur und Partikeldurchmesser auf die Stoffübertragung untersucht wird. Dafür ergaben Experimente und Simulationen, dass bei größerer Leerrohrgeschwindigkeit, Schütthöhe, hoher Lufttemperatur und bei kleinerem Partikeldurchmesser mehr Wasser übertragen wird. Stattdessen wird untersucht, wie sich der Einfluss von mechanischer Mischung unter variierten Betriebsparametern ändert, d. h. unter welchen Betriebsbedingungen in dem untersuchten Versuchsstand eine Trocknung in ruhender bzw. wann eine in bewegter Schüttung intensiver ist. In Abb. 5.41 ist dazu die relative Abweichung der gravimetrisch bestimmten übertragenen Wassermenge gegenüber der ruhenden Schüttung bezogen auf die Hublänge aufgetragen. Verglichen werden beispielhaft

jeweils zwei Versuchsreihen zwischen denen ein Betriebsparameter abgeändert wurde.

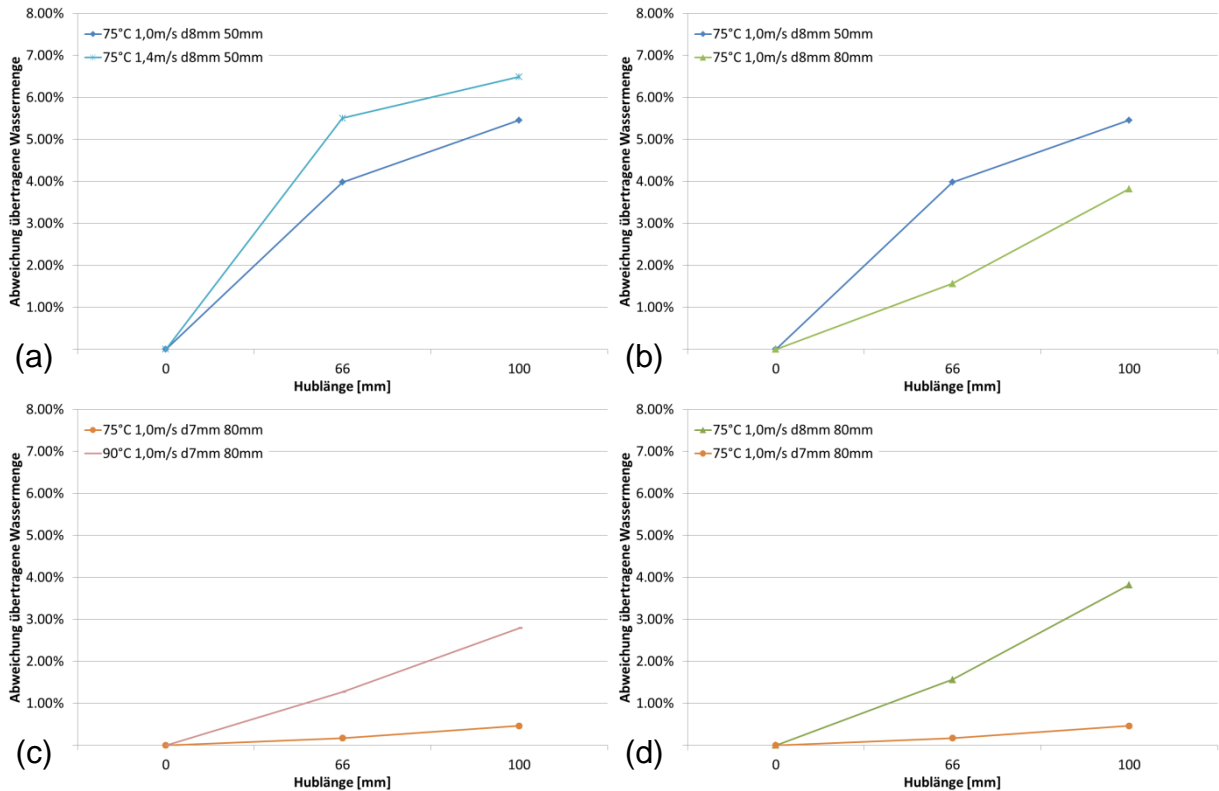


Abb. 5.41: Relative Abweichung (gegenüber ruhender Schüttung) der gravimetrisch bestimmten übertragenen Wassermenge [g]: a) variierte Leerrohrgeschwindigkeit, b) variierte Schütthöhe, c) variierte Lufttemperatur, d) variierte Partikeldurchmesser

In allen Versuchsreihen wurde mehr Wasser von einer durchmischten Schüttung als von einer ruhenden Schüttung an die Luft übertragen. Die Differenz zwischen der bei ruhender Schüttung und der bei 100 mm Hublänge übertragenen Wassermenge war bei 1,4 m/s größer als bei 1,0 m/s Leerrohrgeschwindigkeit (Abb. 5.41 a). Bezogen auf die Schütthöhe waren die Unterschiede zwischen ruhender und bewegter Schüttung bei 50 mm größer als bei 80 mm (Abb. 5.41 b). Der Vergleich zweier Versuchsreihen mit 75°C und 90°C Lufttemperatur bei ansonsten gleichen Betriebsparametern ergab (Abb. 5.41 c), dass der Einfluss von Mischung bei hoher 90°C stärker ist. Für den vierten variierten Parameter, den Partikeldurchmesser, war die Differenz zwischen der bei ruhender und gemischter Schüttung übertragenen Wassermenge bei 8 mm Durchmesser höher als bei 7,1 mm Durchmesser (Abb. 5.41 d).

Insgesamt ergab sich somit, dass insbesondere bei großer Leerrohrgeschwindigkeit kleiner Schütthöhe, hoher Lufttemperatur und großem Partikeldurchmesser die Stoffübertragung in bewegter Schüttung begünstigt wird. Die Beobachtung bezogen auf

die Betriebsparameter Leerrohrgeschwindigkeit und Schütthöhe entspricht dabei phänomenologisch den Ergebnissen der Analyse zur Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen. Hier wurde die Wärmeübertragung in ruhender Schüttung insbesondere bei großer Schütthöhe, niedriger Leerrohrgeschwindigkeit begünstigt. Eine Aussage bezogen auf den Partikeldurchmesser war anhand der Ergebnisse der Simulationen zur Wärmeübertragung allerdings nicht zu treffen. Zudem ergab sich auf Grundlage der Messdaten und Simulationsergebnissen die Fragestellung, warum die konvektive Stoffübertragung durch Mischung offensichtlich begünstigt und die konvektive Wärmeübertragung dagegen gehemmt wurde. Dies wird im folgendem Kapitel 5.5 eingehender analysiert.

5.5 Analyse Einfluss von Mischung auf Wärme- und Stoffübertragung in bewegten Schüttungen

Die experimentelle und numerische Untersuchung des Einflusses von Mischung auf die Wärme- und Stoffübertragung in bewegten Schüttungen hatte ergeben, dass der konvektive Übergang durch Mischung weder grundsätzlich verstärkt noch gehemmt wird. Ob die übertragene Wärme- bzw. Stoffmenge durch Mischung erhöht wurde, hing stark von den Betriebsparametern (Leerrohrgeschwindigkeit, Schütthöhe, Partikeldurchmesser, etc.), aber auch dem untersuchten Prozess (konvektive Wärmeübertragung, Trocknung) ab. Durch Auswertung der experimentellen und Simulationsdaten von beidem, Wärmeübertragungs- und Trocknungsversuchen, konnten fünf Faktoren identifiziert werden, die einerseits den konvektiven Wärme- bzw. Stoffübergang beeinflussen und sich andererseits bei mechanisch geschürter Schüttung veränderten. Zwei der Einflussfaktoren waren versuchsstandspezifisch und können nicht ohne weiteres auf einen anderen Prozess bzw. andere Geometrie übertragen werden:

- Bei Durchmischung wird die Luft durch die Stäbe kanalisiert und die lokale Strömungsgeschwindigkeit und damit der konvektive Wärme- bzw. Stoffübergang gesteigert.
- Bei Durchmischung wirken zu Versuchsbeginn kalte Stäbe als Wärmesenken und vorgeheizte Stäbe als Wärmequellen in der Schüttung.

Drei Einflussfaktoren sind hingegen grundsätzlich bei Prozessen mit gemischten Schüttungen zu erwarten und daher systemübergreifend aufzufinden:

- Bei Durchmischung wird der lokale Lückengrand erhöht und dadurch der konvektive Wärme- bzw. Stoffübergang verringert.
- Bei Durchmischung wird das Temperatur- bzw. Feuchteprofil über der Schüttung in Strömungsrichtung homogenisiert. Eine ungemischte Schüttung entspricht dagegen Gegenstromwärmetauscher (z. B. heiße Partikel bei heißer Luft, kalte Partikel bei kalter Luft) und der konvektive Wärme- bzw. Stoffübergang ist größer.
- Bei Durchmischung rotieren Partikel und Temperatur- bzw. Feuchteprofile über den Partikelumfang werden homogenisiert und damit der konvektive Wärme- bzw. Stoffübergang gesteigert.

Im Folgenden werden zuerst die versuchsstandspezifischen und dann die allgemeinen Einflussfaktoren beschrieben. Die Beschreibung und Quantifizierung der Einflussfaktoren erfolgte vorrangig anhand der numerischen Parameterstudie zur Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen, da nur dort Randbedingungen und Betriebsparameter identisch eingestellt werden konnten und über die Simulationsdaten auch messtechnisch nicht zugängliche Größen bestimmt werden konnten. Komplettiert wird die Analyse durch Messdaten aus den Trocknungsexperimenten, da hier die Messwerterfassung und Einstellungsmöglichkeiten gegenüber den Aufheizversuchen noch erweitert wurden. Zum Abschluss wird anhand der identifizierten Einflussfaktoren analysiert, warum in den Trocknungsversuchen der konvektive Stoffübergang durch Mischung gefördert und in den Aufheizversuchen der konvektive Wärmeübergang durch Mischung gehemmt wird.

5.5.1 Kanalisierung des Luftstroms durch verfahrenende Stäbe

Ein versuchsstandspezifische Einflussfaktor der Stabbewegung war, dass die von unten in die Schüttung einfahrenden Stäbe den freien Querschnitt in Strömungsrichtung verkleinerten und so dazu führten, dass der Luftstrom zwischen zwei bewegten Stäben kanalisiert wurde (Abb. 5.42 a). Dadurch steigerte sich an den Partikeln, die in dem Zwischenraum zwischen den verfahrenen Stäben lagen, die lokale Strömungsgeschwindigkeit und damit der lokale konvektive Wärme- bzw. Stoffübergang zwischen Partikel und Luftstrom. Eine Erhöhung der Hublänge führte somit nicht nur zu einer stärkeren Durchmischung der Schüttung, sondern begünstigte durch die Luftkanalisierung eine konvektive Wärme- bzw. Stoffübertragung in durchmischter Schüttung.

Dieser versuchsstandspezifische Einflussfaktor ließ sich weder in Experimenten noch in Simulationen ausschließen ohne das Mischkonzept des Versuchsstands selbst zu verändern. Allerdings konnte der Effekt in der numerischen Parameterstudie zur Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen genauer quantifiziert werden. In Abb. 5.42 b ist die über die Versuchsdauer gemittelte Strömungsgeschwindigkeit innerhalb der Partikelschüttung abhängig von der Hublänge bei einer Schütthöhe von 50 mm und 100 mm aufgetragen.

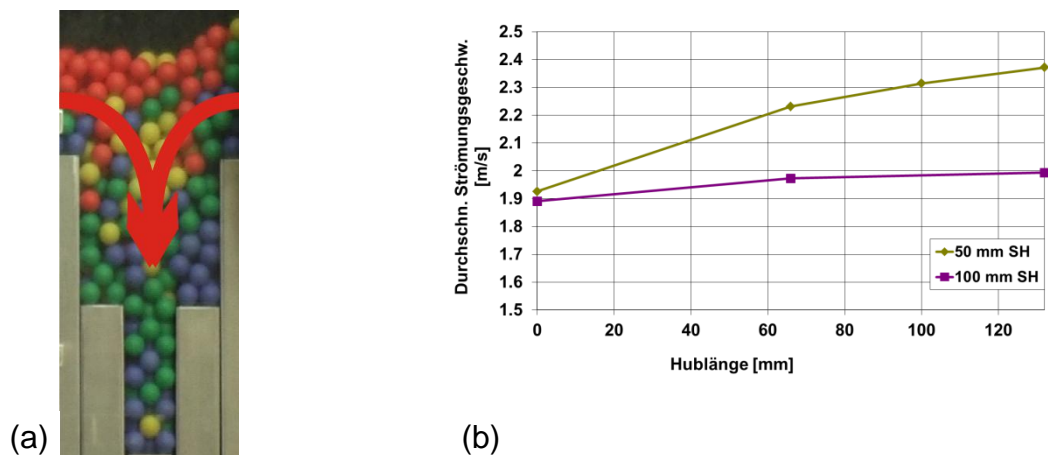


Abb. 5.42: a) Luftkanalisierung bei verfahrenen Stäben, b) Mittlere Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Hublänge

Es war ein deutlicher Anstieg der mittleren Strömungsgeschwindigkeit innerhalb der Schüttung bei 50 mm und 100 mm Schütthöhe zu beobachten. Dabei waren die Unterschiede zwischen gemischter und ungemischter bei 50 mm Schütthöhe deutlich größer, da bei maximal verfahrenen Stäben, sich der Großteil der Schüttung in den Stabzwischenräumen befand. Bei 100 mm Schütthöhe blieb die Strömung im oberen Teil der Schüttung dagegen unbeeinflusst von den Stäben, sodass die Unterschiede im Mittel geringer ausfielen.

5.5.2 Abkühlen oder Aufheizen der Luft und Partikel durch Stäbe

Ein weitere versuchsstandspezifische Einflussfaktor der Stabbewegung war, dass die durchmischte Schüttung durch die einfahrenden Stäbe, abhängig davon ob die Stäbe zu Versuchsbeginn auf Raumtemperatur lagen oder vorgeheizt waren, zusätzlich gekühlt oder erwärmt wurden. Dies geschah zum einen direkt, durch Kontaktwärmeleitung zwischen Partikel und Stab bzw. Erhöhung der Partikelzahl mit Wandkontakt, zum anderen indirekt, durch konvektive Wärmeübertragung zwischen Luft und ausgefahrenen Stäben und der somit verbundenen Temperaturänderung der Luft, bevor

sie den unteren Schüttungsteil durchströmte. Der Anteil der direkten Kontaktwärmeleitung war dabei klein, da die Kontaktfläche zwischen einem kugelförmigen Partikel und den ebenen Wänden minimal ist. Bei zu Versuchsbeginn kalten Stäben wurde die Wärmeübertragung in ruhender Schüttung begünstigt, bei vorgeheizten Stäben wurde die Wärmeübertragung in gemischter Schüttung begünstigt. Durch die stärkere Wärmezufuhr bei Durchmischung wurde in den Trocknungsversuchen zudem der konvektive Stoffübergang erhöht.

Messtechnisch ließ sich der Einflussfaktor Wärmeübertragung zwischen Luft und Stab in den Aufheizversuchen anhand der Stabtemperatur erfassen (Abb. 5.43).

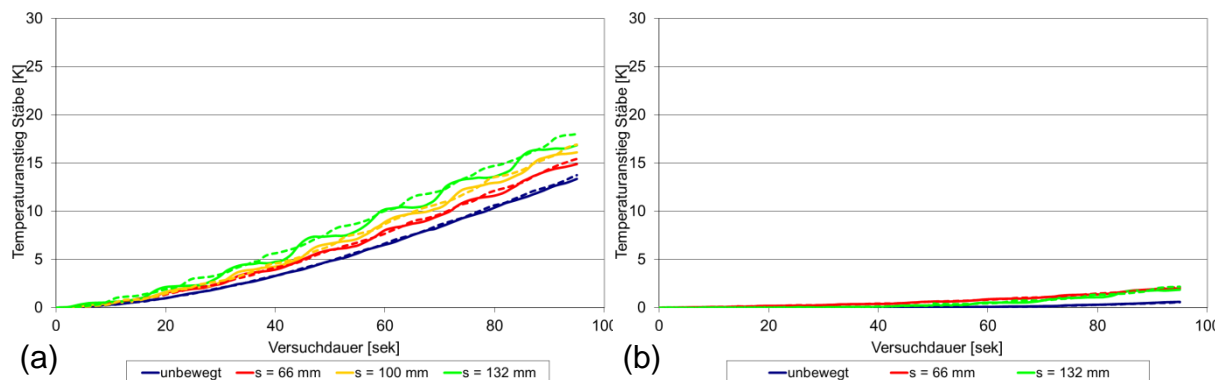


Abb. 5.43: Anstieg der Stabtemperatur abhängig von der Hublänge a) Versuch mit 1,6 m/s Leerrohrgeschwindigkeit und 10 mm Durchmesser Partikel b) Versuch mit 0,8 m/s Leerrohrgeschwindigkeit und 5 mm Durchmesser Partikel

Insbesondere bei hoher Leerrohrgeschwindigkeit und großem Partikeldurchmesser (Abb. 5.43 a) war ein deutlicher Einfluss der Hublänge auf die Stabtemperatur zu messen. Bei niedriger Leerrohrgeschwindigkeit und kleinen Partikeln (Abb. 5.43 b) war dagegen nur eine minimale Erwärmung der Stäbe messbar und damit auch der Einfluss der Hublänge auf die Stabtemperatur sehr gering. Der Einfluss der Stäbe ließ sich in den Experimenten nur schwer begrenzen. In der Parameterstudie zur Analyse der Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen wurden dagegen adiabate Stäbe angenommen, der beschriebene versuchsstandspezifische Faktor beeinflusste die Simulationsergebnissen somit nicht.

Zudem ließen sich an dem Trocknungsversuchsstand zur Kontrolle Aufheizversuche mit POM-Kugeln und vorgeheizten Stäben durchführen. Auch hier bestätigte sich das Ergebnis der Aufheizversuche mit zu Versuchsbeginn kalten Stäben. Die durch die Saphirglasscheibe gemessene durchschnittliche Partikeltemperatur war bei ruhender Schüttung am höchsten (Abb. 5.44 a). Zudem war die im Stabzwischenraum gemessene Temperatur der abströmenden Luft unter den Partikeln höher, wenn die Schüttung durchmischte wurde (Abb. 5.44 b). Daher kann angenommen werden, dass we-

niger Wärme auf die gemischte POM-Schüttung übertragen wurde und der Einfluss der Mischung auf die übertragene Wärmemenge auch an den vermessenen Versuchsständen nur im geringen Maße von der Stabtemperatur abhängt.

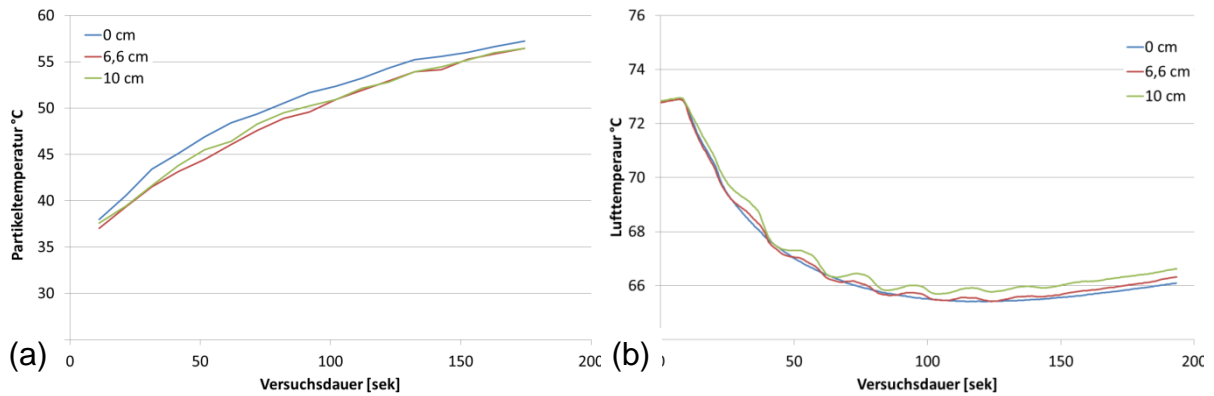


Abb. 5.44: Aufheizversuch mit POM-Kugeln bei 75°C 1,0 m/s Leerrohrgeschwindigkeit:
 a) Gemittelte Oberflächentemperatur b) Lufttemperatur im Stabzwischenraum

5.5.3 Erhöhung des Lückengrands

Sowohl an dem Aufheizversuchstand wie auch am Trocknungsversuchstand wurde die Partikelschüttung von den einfahrenden Stäben gelockert und damit der Lückengrand in der Schüttung lokal und im Mittel gegenüber der ruhenden Schüttung erhöht. Durch die Lückengraderhöhung sanken (ohne die Luftkanalisierung durch die Stäbe zu berücksichtigen) die lokale Strömungsgeschwindigkeit und damit der konvektive Wärmeübergang. Beobachten ließ sich dies zum einen an der Schütthöhe von Versuchen mit und ohne mechanische Mischung (Abb. 5.45 a, b). Aufgrund der Lückengradsteigerung war die Schütthöhe nach Versuchen, die durchmischt wurden (Abb. 5.45 b), deutlich höher als nach Versuchen ohne Mischung (Abb. 5.45 a).

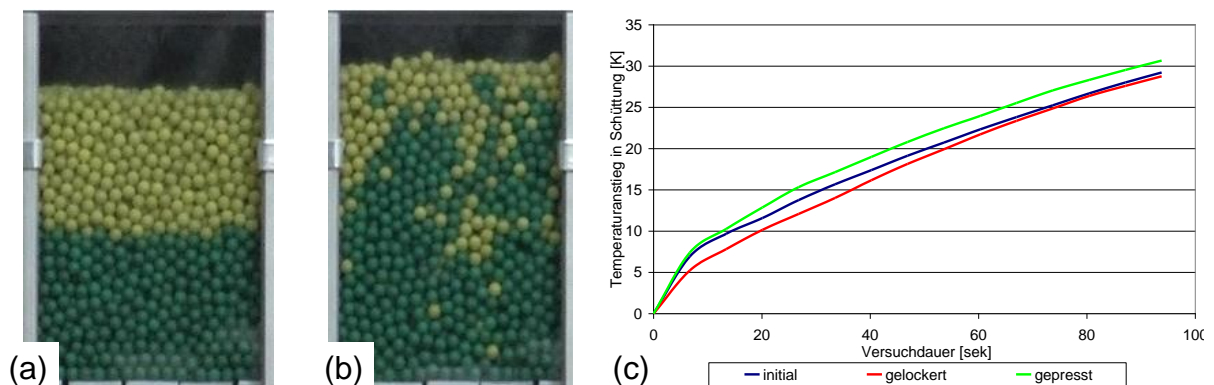


Abb. 5.45: Schütthöhe am Versuchsende bei a) ruhender Schüttung b) 132 mm Hublänge;
 c) Temperaturanstieg von ruhenden Schüttungen mit variiertem Lückengrad

Weiterhin wurden Aufheizversuche mit ruhenden POM-Kugelschüttungen durchgeführt, bei denen der Lückengrad zu Versuchsbeginn variiert wurde (Abb. 5.45 c). Bei einem Versuch wurde die POM-Schüttung wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben in den Versuchsstand gefüllt („initial“), in einem wurde sie mechanisch komprimiert („gepresst“) und in einem Versuch wurde die Schüttung durch Stabbewegung vor Versuchsbeginn gelockert („gelockert“). Der durch die Saphirglasscheibe gemessene Temperaturanstieg der Schüttung war in den Versuchen umso größer, je geringer der Lückengrad war (Abb. 5.45 c).

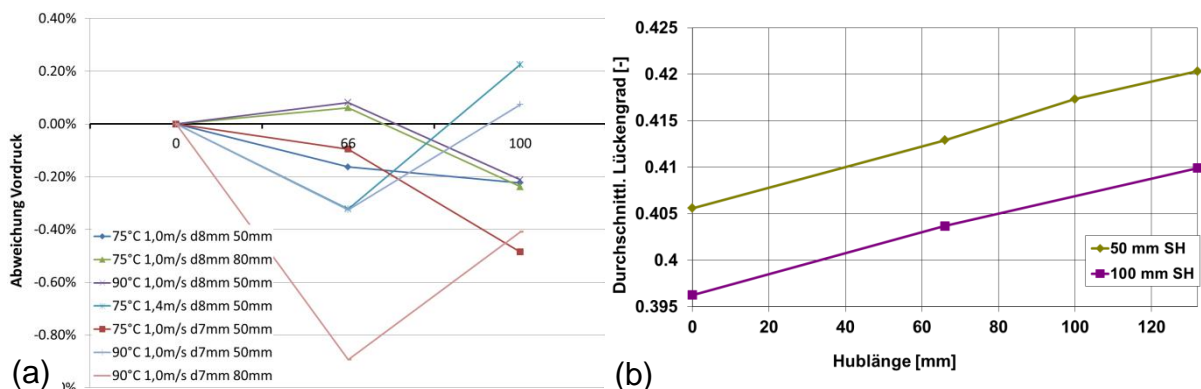


Abb. 5.46: a) Abweichung des Vordrucks gegenüber ruhender Schüttung in Trocknungsexperimenten; b) In Simulationen berechneter Lückengrad abhängig von der Hublänge

In den Trocknungsexperimenten wurde zusätzlich der Vordruck in der Luftzuleitung zum Versuchsstand gemessen. Da eine Erhöhung des Lückengrad zu einem geringeren Druckverlust für die durchströmte Schüttung führt, wurde die Lückengraderhöhung bei Durchmischung über das Absinken des Vordrucks gemessen. Da der Druckverlust von der Schüttung allerdings klein gegenüber dem Gesamtdruckverlust des Versuchsstands und der Luftzufuhr und Luftableitung war, lagen die gemessenen Abweichungen zwischen ruhender und gemischter Schüttung im Bereich der Messungenauigkeit. Jedoch war im Mittel ein mit steigender Hublänge bzw. Mischung sinkender Druckverlust messbar (Abb. 5.46 a). Genauer ließ sich der Einflussfaktor Lückengrad bzw. der Einfluss von Mischung auf den Lückengrad in den gekoppelten DEM-FLUENT-Simulationen quantifizieren, da hier der Lückengrad über die Versuchsdauer kontinuierlich aus den individuellen Partikelpositionen berechnet wurde. Es ergab sich ein nahezu linearer Anstieg des Lückengrads mit steigender Hublänge (Abb. 5.46 b). Der Lückengrad lag bei 100 mm Schütthöhe auf einem niedrigeren Wert als bei 50 mm, da der durch Randeffekte (Wände, Schichtende) beeinflusste Bereich der Schüttung anteilmäßig kleiner war. Die absolute Differenz zwischen ruhender und bei 132 mm Hublänge gemischter Schüttung war aber unabhängig von der Schütthöhe vergleichbar.

Im Gegensatz zu den beiden zuerst beschriebenen, versuchsstandspezifischen Einflussfaktoren (Kapitel 5.5.1, 5.5.2) ist ein mit der Durchmischungsintensität ansteigender Lückengrad und eine dadurch gehemmte konvektive Wärme-, und Stoffübertragung auch bei industriellen Systemen zu erwarten. Dabei ist zu beachten, dass sich die Untersuchungsergebnisse nur auf von Konvektion dominierte Systeme übertragen lassen. Auf anderen Systemen wie z. B. Verbrennungsrosten, beeinflusst der Lückengrad zusätzlich den Strahlungswärmeaustausch und chemischen Reaktionen in der Gasphase. Untersuchungen mit den genannten Schwerpunkten waren allerdings nicht Bestandteil des Projekts.

5.5.4 Homogenisierung des Temperatur- / Feuchteprofils in Strömungsrichtung

Experimente und Simulationen zur Wärme- und Stoffübertragung in bewegten Schüttungen ergaben, dass durch die Mischung das Temperatur- bzw. Feuchteprofil über der Schüttungshöhe in Strömungsrichtung homogenisiert wurde. Dies beeinflusste lokal die Temperatur- bzw. Feuchtedifferenz zwischen Partikeloberfläche und Luftstrom. Bei den Aufheizexperimenten lagen in der ruhenden Schüttung die heißesten Partikel immer an oberster Position der Schüttung, an der der Luftstrom ebenfalls am wärmsten war. Analog war die Luft- und Partikeloberflächentemperatur im unteren Teil der Schüttung am niedrigsten. Die instationären Temperaturprofile der beiden Wärme austauschenden Medien (Luft, Partikel) über der Schütthöhe ähnelten nach einer kürzeren Anlaufphase (Abb. 5.47 a) dem stationären Temperaturprofil eines Gegenstromwärmetauschers (Abb. 5.47 b). Wurde durch die Stabbewegung das Temperaturprofil der Partikelschüttung homogenisiert (Abb. 5.47 c), dann wurde das für die Wärmeübertragung günstigste Prinzip des Gegenstromwärmetauschers gestört und die Luft verließ die Schüttung nach unten mit einer im Durchschnitt höheren Temperatur.

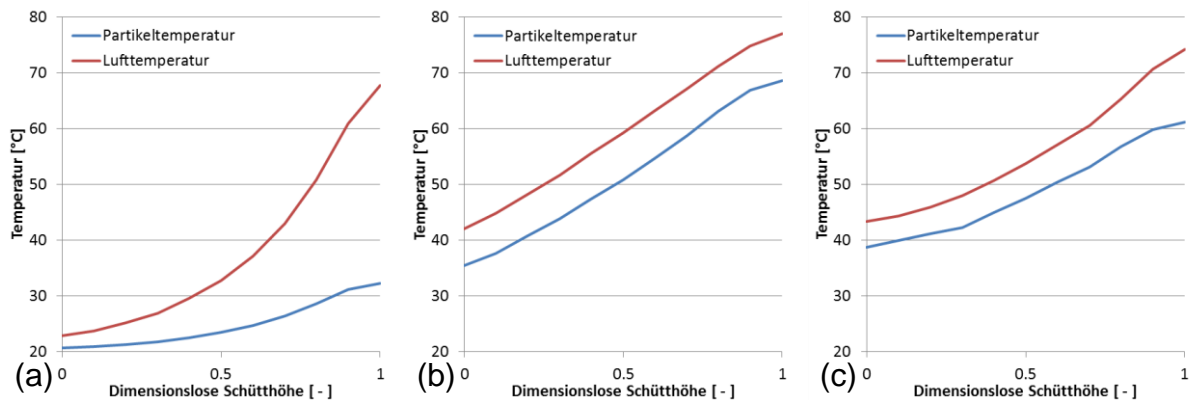


Abb. 5.47: In Simulationen berechnetes Temperaturprofil von Partikeloberfläche und Luftstrom über der Schütthöhe bei a) ruhender Schüttung nach 5 s und b) 80 s und c) 132 mm Hublänge nach 80 s

Dieser Effekt war messtechnisch kaum zu erfassen, allerdings konnten in den thermografischen Videos von Experimenten mit Mischung einzelne Partikel visuell nachverfolgt werden, die oberen Bereich der Schüttung zuerst erhitzt wurden und anschließend in den unteren Bereich transportiert wurden, wo sie wieder abkühlten und ihre Wärme an den Luftstrom abgaben. Eine genauere quantitative Analyse war durch die Auswertung der gekoppelten DEM-FLUENT-Simulationen möglich, da für jedes Partikel kontinuierlich Oberflächentemperatur und Temperatur der umgebenden Luft berechnet wurden. Damit ließ sich für jeden Versuch eine über die Versuchsdauer und die Partikel gemittelte Temperaturdifferenz zwischen Partikeloberfläche und Luftstrom berechnen.

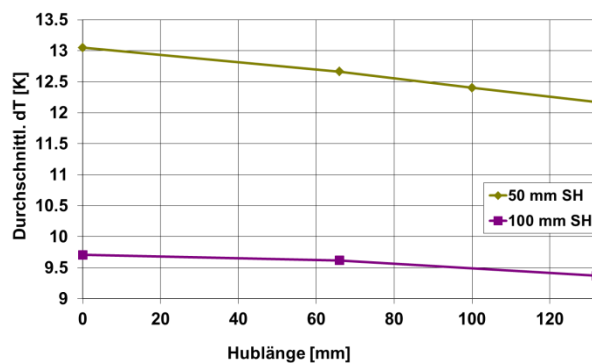


Abb. 5.48: In Simulationen berechneter durchschnittlicher Temperaturdifferenz zwischen Partikeloberfläche und Luftstrom abhängig von der Hublänge

Die durchschnittliche Temperaturdifferenz sank dabei mit zunehmender Hublänge (Abb. 5.48), wobei der Unterschied zwischen ruhender und gemischter Schüttung bei 50 mm Schütthöhe deutlicher war. Es ist zu beachten, dass die in den Simulationen bestimmten mittleren Temperaturdifferenzen stark von der Versuchsdauer abhingen, da sich kein stationäres Temperaturprofil einstellte und Temperaturprofil und über-

tragene Wärmemenge in einer gegenseitigen Wechselwirkung standen. Eine Übertragung der Erkenntnisse ist somit nur auf durch Konvektion dominierte Prozesse und Einschränkungen bezüglich der Versuchsdauer und der Temperaturprofile möglich. Verändert sich (nach sehr langer Versuchsdauer) die Lufttemperatur über der Schütthöhe oder (zu Anfang der Versuchsdauer) die Partikeltemperatur über der Schütthöhe nur minimal, dann ist der Einfluss der Mischung über das Temperaturprofil auf die übertragene Wärmemenge hat auch minimal. Gleiches gilt auch, wenn aus anderen Gründen (chemische Reaktionen, hohe Wärmekapazität) eines der beiden Medien einen nahezu konstanten Temperaturverlauf hat.

5.5.5 Homogenisierung des Temperatur- / Feuchteprofils über den Partikelumfang

Der fünfte Einflussfaktor, der vorrangig in den Trocknungsexperimenten zu beobachten war, ist die Homogenisierung von über den Partikelumfang auftretenden Temperatur- und Feuchteprofilen. Die Stabbewegung verursachte eine Rotation der Partikel die verhinderte, dass Bereiche der Partikeloberfläche (insbesondere die angeströmte Kugelhälfte) dauerhaft einer lokal höheren Strömungsgeschwindigkeit und damit einem lokal höheren konvektiven Übergang ausgesetzt waren. Diese über den Partikelumfang auftretenden Unterschiede des konvektiven Wärme- und Stoffübergangs führten dazu, dass bei ruhender Schüttung die Partikeloberfläche in Teilen schon trocken war und der Stoffübergang lokal sank, während sie an anderer Stelle noch feucht war (Abb. 5.49 a). Bei bewegter Schüttung wurde hingegen die Lage der Partikel in der Strömung verändert, sodass nach einer Lageänderung die noch feuchten Teile der Oberfläche einem höheren konvektiven Wärme- und Stoffübergang ausgesetzt waren (Abb. 5.49 b) und damit die insgesamt übertragene Wärmemenge erhöhte. Die Unterschiede, die sich bei ruhender Schüttung besonders zwischen oberer und unterer Kugelhälfte der Partikel zeigten, waren auch deutlich in den thermografischen Bildern zu sehen, da erst eine Temperaturzunahme an der Oberfläche messbar war, wenn das freie Wasser an der Oberfläche verdampft war (Abb. 5.49 c, d).

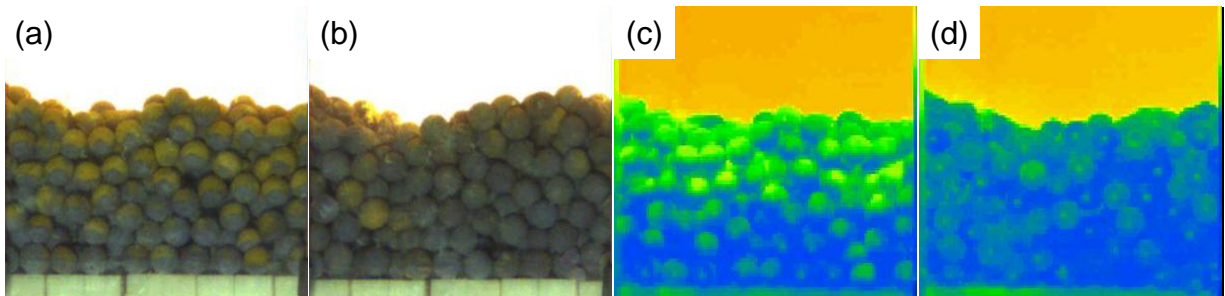


Abb. 5.49: Unterschied durch Indikatorfarbe angezeigtes Feuchteprofil bei a) ruhender Schüttung und b) gemischter Schüttung; Temperaturprofil bei c) ruhender Schüttung und d) gemischter Schüttung

Bei den Aufheizexperimenten hatte die Rotation der Partikel einen wesentlich geringeren Einfluss auf das Temperaturprofil über den Partikelumfang, deutlichere Unterschiede waren nur bei POM-Kugeln mit 20 mm Durchmesser zu erkennen. Entscheidend dafür war, dass durch ungleichen konvektiven Wärmeübergang an der Partikeloberfläche hervorgerufene Temperaturgradienten stärker durch die Wärmeleitung im Partikel ausgeglichen wurden. Bei den Trocknungsversuchen war dagegen der diffusive Stofftransport des Wassers im Partikel deutlich langsamer als der konvektive Stofftransport durch die Grenzschicht, sodass Feuchtegradienten an der Oberfläche deutlich langsamer ausgeglichen wurden. Das Verhältnis von innerem, diffusivem zu äußerem, konvektivem Wärme- bzw. Stofftransport kann mit der Biotzahl charakterisiert werden. Bezogen auf den Wärmetransport lag die Biotzahl für die Aufheizexperimente mit POM-Kugeln und die Trocknungsexperimente abhängig von den Betriebsparametern zwischen 1 und 5. Für die Trocknungsexperimente ergab sich dagegen eine auf den Stofftransport bezogene Biotzahl, die um mehrere Zehnerpotenzen höher lag.

Numerisch konnte der Einfluss des Rotationseffektes nicht untersucht bzw. quantifiziert werden. Zum einen wird mit den verwendeten Korrelationen (Gleichungen (5.3)-(5.7), (5.10)-(5.15)) der konvektive Wärme- und Stofftransport nicht über den Umfang aufgelöst. Zum anderen werden Temperatur- und Feuchtebeladungsprofile im Partikel nur über den Radius berechnet. Stattdessen wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, in der die Silicagel-Partikel über einen Großteil der Versuchsdauer nicht bewegt wurden. Lediglich nach der Hälfte der Zeit wurde ein Doppelhub bei zwei verschiedenen Hublängen (66 mm, 100 mm) zur Mischung und Drehung der Partikel ausgeführt. Der Einfluss der Stabbewegung auf die Luftströmung und Lufttemperatur und auf den Lückengrad der Schüttung war somit minimal. In Abb. 5.50 ist Verlauf des im Austrittluftstrom gemessenen Wasserdampfgehalts über der Versuchsdauer dargestellt. Der Versuch in ruhender Schüttung und mit 100 mm Hublänge wurde zweimal durchgeführt.

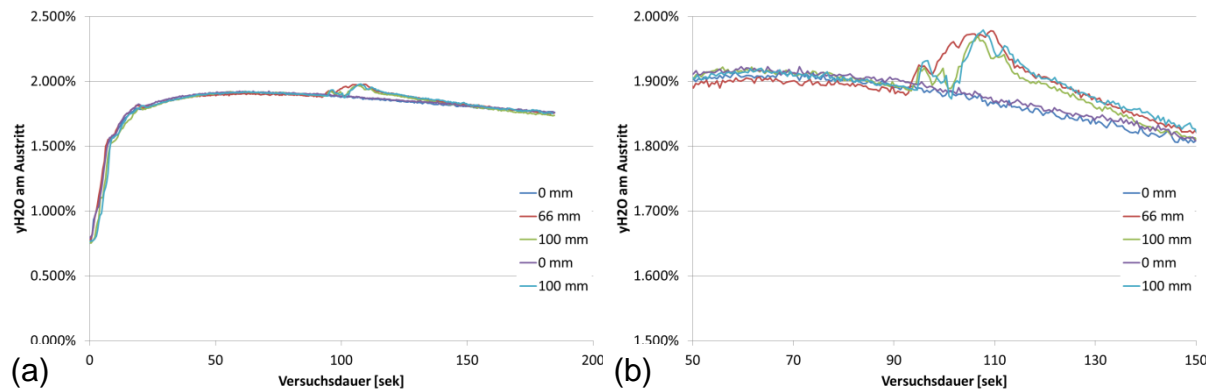


Abb. 5.50: a) Wasserdampfgehalt im Austrittluftstrom, b) Zeitraum um den Doppelhub

Der am Austritt gemessene Wasserdampfgehalt verlief bis zum Zeitpunkt des Doppelhubs (92 s) annähernd gleich (Abb. 5.50 a). Nach der Dauer des Doppelhubs (10 s) ergaben sich jedoch deutliche Unterschiede zwischen den Versuchen mit und ohne Mischung. Der unter der gemischten Schüttung am Austritt gemessene Wasserdampfgehalt war höher, das heißt es wurde auch über die Zeit des Doppelhubs hinaus mehr Wasser übertragen. Erst nach ca. 150 s lag der Dampfgehalt am Austritt wieder auf gleichem Niveau. Dabei fällt auf, dass die Hublänge keinen Einfluss auf die bleibende Abweichung hat (Abb. 5.50 b). Die größere übertragene Wassermenge lässt sich somit auf die Änderung der Lage der Partikel in der Strömung zurückführen, und nicht oder nur minimal auf die Änderung des Feuchteprofils über der Schüttung in Strömungsrichtung (vgl. Kapitel 5.5.4). Dessen Einfluss stieg zum einen mit der Hublänge, zum anderen war zum Zeitpunkt des Doppelhubs die mittlere Oberflächenfeuchtigkeit und Oberflächentemperatur der Partikel über der Schütthöhe nahezu konstant.

Übertragbar sind die Erkenntnisse zum Einflussfaktor Homogenisierung des Temperatur- bzw. Feuchteprofils über den Partikelumfang dabei auch auf andere technische Systeme oder Prozesse. Wenn deutliche Temperaturprofile über den Partikelumfang zu erwarten sind, z. B. bei Strahlungswärmeaustausch, dann werden diese bei Mischung bzw. mechanischer Bewegung der Partikel homogenisiert und damit auch integrale Größen (übertragene Wärme- bzw. Stoffmenge etc.) deutlich beeinflusst. Bei durch Konvektion dominierten thermo-chemischen Prozessen muss zur Beurteilung, ob Temperaturprofil über den Partikelumfang zu erwarten ist, u. U. auch der Stofftransport betrachtet werden (Verhältnis Diffusion im Partikel zu konvektiven Stofftransport durch die Grenzschicht).

5.5.6 Beurteilung der Einflussfaktoren am Versuchsstand

Anhand der identifizierten Einflussfaktoren ließ sich erklären, warum an zwei ähnlichen Versuchseinrichtungen Mischung einen scheinbar unterschiedlichen Einfluss auf phänomenologisch gleiche Prozesse (konvektive Aufheizung, konvektive Trocknung) hatte. Bei der Aufheizung wurde die übertragene Wärmemenge durch Mischung verringert, bei der Trocknung die übertragene Wassermenge durch Mischung erhöht.

Kanalisation des Luftstroms durch verfahrenende Stäbe

In beiden Fällen hatte die durch die Stabbewegung hervorgerufene Kanalisation des Luftstroms einen steigernden Einfluss auf die übertragene Energie bzw. Wassermenge. Da die Geometrie des Versuchsraums und der Stäbe ähnlich und Betriebsparameter vergleichbar waren, ist davon auszugehen, dass bei beiden Prozessen die übertragene Wärme- bzw. Stoffmenge auch quantitativ im gleichen Maß gesteigert wurde.

Abkühlen oder Aufheizen der Luft und Partikel durch Stäbe

In den Aufheizversuchen waren die Stäbe zu Versuchsbeginn kalt, hier wurde aus diesem Grund die auf die Schüttung übertragene Wärmemenge bei Mischung reduziert. Bei den Trocknungsversuchen waren die Stäbe zu Versuchsbeginn heiß und die auf die Schüttung übertragene Wärmemenge und die von der Schüttung an die Luft übertragene Wassermenge wurde erhöht. Die Auswertung der Aufheizexperimente mit heißen Stäben und die numerische Parameterstudie zur Wärmeübertragung in bewegten Schüttungen ergaben jedoch, dass die Temperatur der Stäbe nicht der maßgebliche Einflussfaktor auf die übertragene Wärme- und Stoffmenge sind.

Erhöhung des Lückengrads

In beiden Fällen wurde der Lückengrad bei Mischung durch die Stabbewegung und damit Lockerung der Schüttung erhöht. Dadurch wurde in beiden Fällen der konvektive Wärme- und Stoffübergang bei Mischung verringert. Da konvektive Wärme- und Stoffübertragung nach den gleichen Gesetzmäßigkeiten ablaufen, ist der Einfluss des gesteigerten Lückengrads bei beiden Prozessen auch quantitativ vergleichbar.

Homogenisierung des Temperatur- / Feuchteprofils in Strömungsrichtung

Bei den Aufheizversuchen war das Temperaturprofil der Schüttung und des Luftstroms über der Schütthöhe nach einer kurzen Einlaufphase vergleichbar zu dem zweier Medien im Gegenstromwärmetauscher. Wurde die Schüttung gemischt, dann wirkte dies dem Prinzip eines Gegenstromwärmetauschers entgegen und die durch-

schnittliche Temperaturdifferenz zwischen Partikeloberfläche und Luft sank. Die konvektive Wärmeübertragung wurde dadurch bei Mischung verringert. Bei den Trocknungsversuchen veränderte sich bei Mischung das Profil der Partikeltemperatur und Partikelfeuchte über der Schüttung kaum. Die Auswirkung auf die übertragene Wärme- und Stoffmenge war bei den Trocknungsexperimenten daher gering.

Homogenisierung des Temperatur- / Feuchteprofils über den Partikelumfang

In den Aufheizversuchen waren nur bei Partikeln mit 20 mm Durchmesser merkliche Temperaturunterschiede zwischen unterer und oberer Kugelhälfte zu erkennen, bzw. sichtbar, dass die Temperaturunterschiede bei Mischung homogenisiert wurden. Der Mischungseffekt hatte daher eher eine geringe Auswirkung auf die insgesamt übertragene Wärmemenge. Bei den Trocknungsversuchen ohne Mischung traten hingegen auch bei kleineren Partikeln starke Unterschiede zwischen der Kugelhälfte in Anströmrichtung und Abströmrichtung auf. Bei Durchmischung wurden die Partikel dagegen über den Umfang gleichmäßig getrocknet, sodass ein Absinken der Trocknungsgeschwindigkeit erst später zu beobachten war. Der konvektive Stoffübergang wurde somit gefördert.

In Tab. 5.3 ist die Analyse der Einflussfaktoren zusammenfassend dargestellt

Tab. 5.3: Analyse der Einflussfaktoren und ihre Auswirkung auf den konvektiven Wärme- und Stoffübergang bei Aufheiz- und Trocknungsexperimenten

Einflussfaktor	Mischungseffekt auf Prozess	
	Aufheizexperiment	Trocknungsexperiment
Kanalisation des Luftstroms durch verfahrenende Stäbe	Steigerung der Übertragenen Wärmemenge	Steigerung der übertragenen Stoff- und Wärmemenge
Abkühlen oder Aufheizen der Luft und Partikel durch Stäbe	Senkung der Übertragenen Wärmemenge bzw. Adiabate Bedingung an Stäben	Steigerung der übertragenen Stoff- und Wärmemenge
Erhöhung des Lückengrands	Senkung der Übertragenen Wärmemenge	Senkung der übertragenen Stoff- und Wärmemenge
Homogenisierung des Temperatur- / Feuchteprofils in Strömungsrichtung	Senkung der Übertragenen Wärmemenge	Minimale Senkung der übertragenen Stoff- und Wärmemenge
Homogenisierung des Temperatur- / Feuchteprofils über den Partikelumfang	Minimale Steigerung der Übertragenen Wärmemenge	Steigerung der übertragenen Stoff- und Wärmemenge

Gesamtbeobachtung	Senkung der Übertragenen Wärmemenge	Steigerung der übertragenen Stoff- und Wärmemenge
-------------------	-------------------------------------	---

Insgesamt zeigte sich, dass die Gesamtbeobachtung zum Einfluss von Mischung auf die Wärme- und Stoffübertragung in bewegten Schüttungen von der Gewichtung der einzelnen Einflussfaktoren abhängt und eine Aussage nur prozessabhängig durch Bewertung der einzelnen Faktoren getroffen werden kann. Dafür hat sich die Kombination aus DEM-FLUENT-Simulation und gut vermessenen Experimenten als unerlässlich herausgestellt, da nur anhand von experimentell überprüften Simulationsdaten die einzelnen Einflussfaktoren getrennt betrachtet und quantifiziert werden können. Die DEM-FLUENT-Simulationsmethodik muss daher in Zukunft für Prozesse, in denen die thermo-chemischen Randbedingungen um den Partikelumfang stark variieren (wie bei der Trocknung großer Partikel), angepasst werden.

5.6 Feuerungssimulationen

Im Projekt wurde mit dem LEAT-DEM Code zwei Feuerungen simuliert. Zum einen eine ungeschürte Kleinf Feuerung, zu der Messdaten von Versuchsreihen mit unterschiedlichen Brennstoffen aus Biomasse veröffentlicht sind [4]. Zum anderen der Modellvorschubrost MARS der Universität Duisburg-Essen. Dabei wurde die Geometrie des Rosts und des Feuerungsraums Literaturquellen entnommen [5] und eine numerische Parameterstudie mit variiertem Roststabbewegung durchgeführt. Im Folgenden werden zuerst die der Simulationen zugrundeliegenden Verbrennungsmodelle beschrieben und anschließend die Ergebnisse von der Biomassenkleinf Feuerung und der Parametervariation an dem Modellvorschubrost vorgestellt.

5.6.1 DEM-Simulationsmodell

Das im LEAT-DEM Code implementierte Verbrennungsmodell wird zur Simulationen des Abbrandes von großen Brennstoffpartikeln, an denen die thermochemischen Prozesse Trocknung, Pyrolyse und Koksausbrand zeitgleich ablaufen können, verwendet. Unter der Annahme, dass der Trocknungs- und Pyrolyseprozess durch die Wärmeleitung in das Partikelinnere dominiert ist, wird die Menge des freigesetzten Wassers und der Pyrolysegase über den Fortschritt je einer vorgegebenen Temperaturfront berechnet (Abb. 5.51). Die in den Flüchtigen vorhandenen Spezies, deren

Massenanteile und eine ggf. auftretende Umwandlungswärme des Pyrolyse-/Verdampfungsschritts (endothermer bzw. exothermer Ablauf der Pyrolyse) werden im Modell so bestimmt, dass in jedem Fall die Energie-Gesamtbilanz erfüllt ist. Die Berechnung der radialen Wärmeleitung und des konvektiven Wärmeübergangs erfolgt dabei analog zum Trocknungsmodell. Zusätzlich wird der Strahlungswärmeaustausch zwischen den Partikeln durch ein partikelbasiertes Modell unter Bestimmung von Sichtfaktoren benachbarter Partikel modelliert. Der Strahlungswärmeaustausch zwischen der Oberfläche des Brennstoffbetts und dem Feuerraum erfolgt bei Ankopplung an FLUENT (bei den Rostsimulationen) durch das dort implementierte Standardmodell (P1).

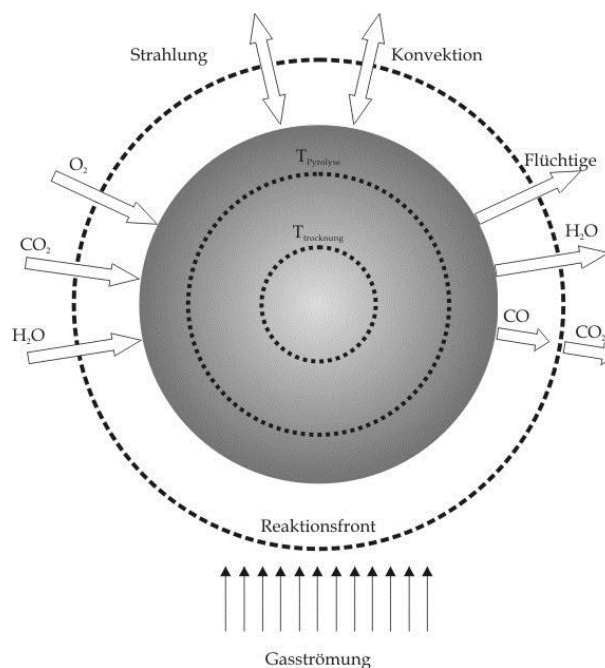


Abb. 5.51: Verbrennungsmodell am Einzelpartikel

Im Gegensatz zu Trocknung und Pyrolyse ist der Prozess des Koksabbrandes kinetisch betrachtet langsam. Außerdem ist die Konzentration des Oxidators an der Partikeloberfläche entscheidend für die Geschwindigkeit des Koksumsatzes. Aus diesem Grund wird der Koksabbrand nicht über den Fortschritt einer Temperaturfront beschrieben werden, sondern über die chemische Kinetik der ablaufenden Oxidations-schritte und das Oxidatorangebot an der Oberfläche berechnet. Die Modellierung der heterogenen Restkoksverbrennung erfolgt daher unter Berücksichtigung dreier parallel ablaufenden Reaktionen (Kinetische Daten aus der Literatur [6]) und der zugehörigen Gasphasenreaktionen:



Für jede der drei genannten Reaktionen wird eine effektive Umwandlungsrate aus dem Transport des Oxidators (O_2 , CO_2 oder H_2O) aus dem umgebenden Gas durch die Grenzschicht an die Partikeloberfläche k_{diff} und den chemischen Reaktionsgeschwindigkeiten k_{chem} gebildet:

$$k_{eff} = \left(\frac{1}{k_{diff}} + \frac{1}{k_{chem}} \right)^{-1}
 \tag{5.18}$$

Die Gasphasenreaktion wird mit Hilfe eines kombinierten „Eddy Dissipation“ und „Finite Rate Chemistry“ Modells simuliert.

Mit dem beschriebenen Modell erfolgten die ersten Simulationen der Biomassenfeuerung. Aufgrund der Erkenntnisse aus den Experimenten und Simulationen zur Wärme- und Stoffübertragung in bewegten Schüttungen wurden jedoch Teilmodelle während des Projekts angepasst und zur zweiten Simulationsreihe für die Biomassenkleinfeuerung und zur Simulation der Rostfeuerung verwendet. Zum einen wurde der Einfluss des Diffusionswiderstands im Partikel bei der Beschreibung der Trocknung und Pyrolyse überprüft. Für die Trocknung war die Beschreibung durch den Fortschritt der Siedetemperaturfront ausreichend. Das Pyrolyse-Modell wurde dagegen angepasst und der Fortschritt der Pyrolysefront aus dem geschwindigkeitsbestimmenden Faktor (Wärmeleitung oder Diffusion der Pyrolysegase) berechnet. Aufgrund der in den Trocknungsexperimenten zu beobachtenden deutlichen Unterschiede zwischen Partikeloberseite und Partikelunterseite wurde in der zweiten Simulationsreihe zur Biomassenkleinfeuerung eine Unterteilung der Brennstoffpartikel in zwei Halbschalenmodelle, die separat berechnet werden, erprobt. Außerdem wurde für die Rostsimulation und die zweite Simulationsreihe zur Biomassenkleinfeuerung das Modell für den Koksausbrands verbessert, sodass Koks kinetik und Grenzschichtdiffusion der Oxidanten die Reaktion von CO und O_2 in der Grenzschicht berücksichtigen.

5.6.2 Ergebnisse Kleinf Feuerung

Bei der simulierten Biomassenkleinf Feuerung handelte es sich um einen ungeschürten, zylinderförmigen Festbettbrenner, der an der Universität von Vigo (Spanien) betrieben wird. Die geometrischen Daten des zylindrischen Brenners (0,13 m Durchmesser, 1,05 m hoch) und die Betriebsparameter sowie Messerdaten einer umfangreichen Messreihe zum Zündfrontfortschritt von verschiedenen Brennstoffen wurden einer Veröffentlichung von Porteiro et al. [4] entnommen. Die Zündung der Brennstoffschüttung erfolgte dabei von oben und die Luftzufuhr entgegen der Richtung der Zündfront von unten im Gegenstrom. In den Experimenten stellte sich nach der nicht genauer spezifizierten Zündphase eine annähernd stationäre Zündfrontgeschwindigkeit ein, die als verbrannte Brennstoffmasse pro Zeiteinheit bezogen auf den Querschnitt des Brenners [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$] angegeben wurde. Um den Simulationsaufwand sinnvoll zu verringern (bis zum Erreichen einer stationären Abbrandgeschwindigkeit) wurde die in der Literatur angegebene Höhe der Brennstoffschüttung (1.05 m) reduziert.

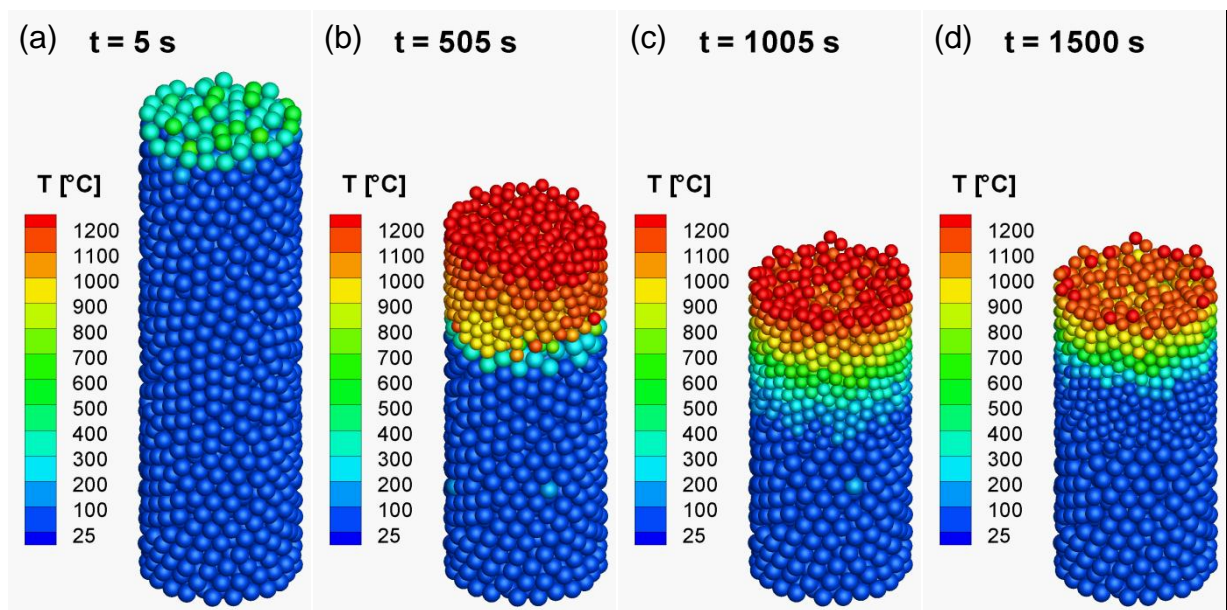
Da die Brennstoffpartikel durch Kugeln approximiert wurden, erfolgten die Simulationen zum einen für eine Schüttung aus Olivenkernen (Form ähnlich zur Kugel), zum anderen für eine Schüttung aus RDF Pellets, da diese der größte untersuchte Brennstoff waren und damit die Rechenzeit am geringsten war. Der Luftmassenstrom in den Simulationen der RDF Pellets betrug 2,34 g/s und bei den Olivenkernen 4,00 g/s. Die geometrischen Daten der Brennstoffpartikel (äquivalenter Kugeldurchmesser, Dichte), der Heizwert und die Brennstoffzusammensetzung waren in der Literatur gegeben, allerdings waren wichtige, für das DEM-Modell benötigte Brennstoffparameter wie die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit nicht angegeben. Diese sollten durch Variation bestimmt und die berechnete Abbrandgeschwindigkeit mit den experimentellen Ergebnissen verglichen werden. Außerdem wurde die für das Verbrennungsmodell vorgegebene Temperatur der Pyrolysefront variiert. Der Luftmassenstrom und die Brennstoffparameter der Simulationen sind in Tab. 5.4 zusammenfassend dargestellt.

Tab. 5.4: Luftmassenstrom und Brennstoffparameter in den Simulationen

Parameter	Brennstoff	
	RDF Pellets	Olivenkerne
Luftmassenstrom	2,34 g/s	4,00 g/s
Partikeldurchmesser	7,4 mm	4,2 mm

Partikeldichte	340 kg/m ³	620 kg/m ³
Heizwert	14,6 MJ/kg	15,3 MJ/kg
Brennstoffzusammensetzung	17,9% Wasser, 61,8% Flüchtige, 6,9% Koks, 13,4% Asche	13,0% Wasser, 61,3% Flüchtige, 25,1% Koks, 0,6% Asche
Spez. Wärmekapazität	1500 – 4000 J/kgK	2200 J/kgK
Wärmeleitfähigkeit	0,1 – 0,4 W/mK	0,2 W/mK
Pyrolysetemperatur	520 – 655°C	600 – 650°C

In Abb. 5.52 sind die Ergebnisse für den zeitlichen Verlauf der Oberflächentemperatur zweier Simulationen mit RDF Pellets und Olivenkernen visualisiert.



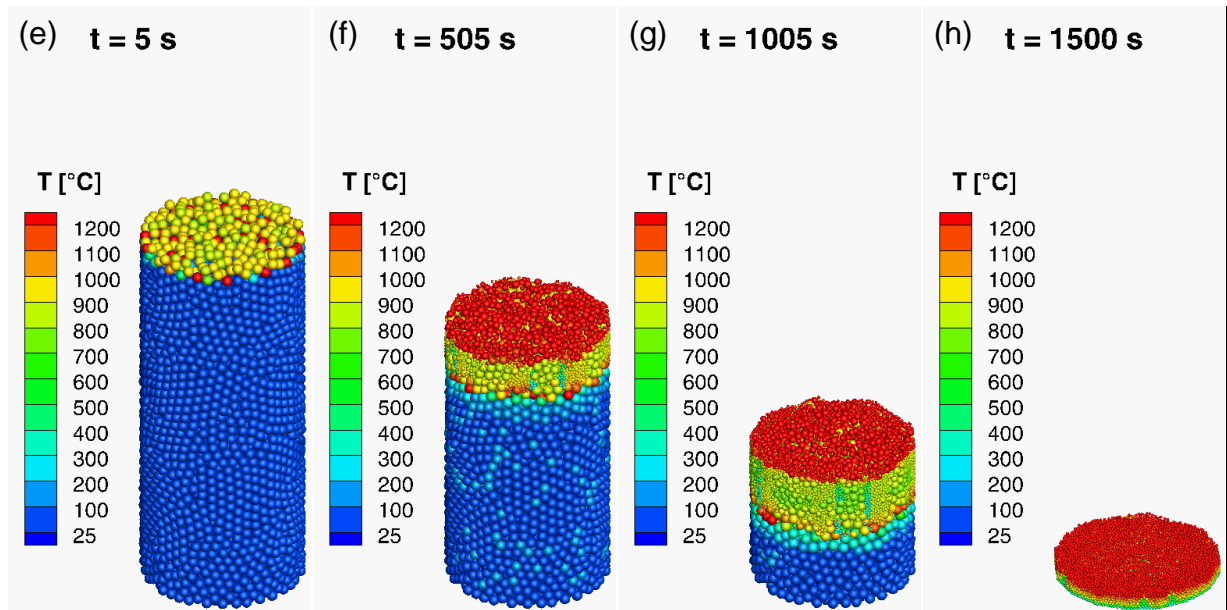


Abb. 5.52: Berechnete Oberflächentemperatur (altes Verbrennungsmodell) nach (a,e) 5 s, (b,f) 505 s, (c,g) 1005 s und (d,h) 1500 s für RDF Pellets (a-d) und Olivenkerne (e-h)

An den Simulationsbildern ist die Problematik zu erkennen, die in sämtlichen zuerst durchgeführten Simulationen auftrat. So war zum einen die Abbrandgeschwindigkeit, wie am Beispiel der Olivenkernschüttung dargestellt (Abb. 5.52 e-h), in vielen Simulationen deutlich größer als die jeweils experimentell gemessene. Lief die Zündfront dagegen aufgrund veränderter Brennstoffparameter etwas langsamer (jedoch noch immer schneller als in den Experimenten) durch die Schüttung, dann stoppte die Verbrennung wie am Beispiel der RDF Pellets dargestellt (Abb. 5.52 a-d). Die Schüttung brannte somit nur bei einer deutlich zu hohen (100 – 150%) Mindestabbrandgeschwindigkeit stabil von oben nach unten ab.

Eine zweite Simulationsreihe wurde daher mit den im Kapitel 5.6.1 beschriebenen Verbesserungen des DEM-Verbrennungsmodells durchgeführt. Entscheidend war dabei, dass das Temperaturprofil nicht nur radial aufgelöst wurde, sondern auch eine Diskretisierung über den Partikelumfang durch zwei Halbschalen erprobt wurde, um insbesondere die stark abweichenden Wärmestrahlung, die sich auf der Partikelunterseite und Partikeloberseite ergibt, zu berücksichtigen. In Abb. 5.53 ist der zeitliche Verlauf der Oberflächentemperatur von RDF Pellets aus einer Simulation mit dem verbesserten Verbrennungsmodell gezeigt, bei der die Randbedingungen und Eingabeparameter identisch zur in Abb. 5.52 a-d gezeigten Simulation waren.

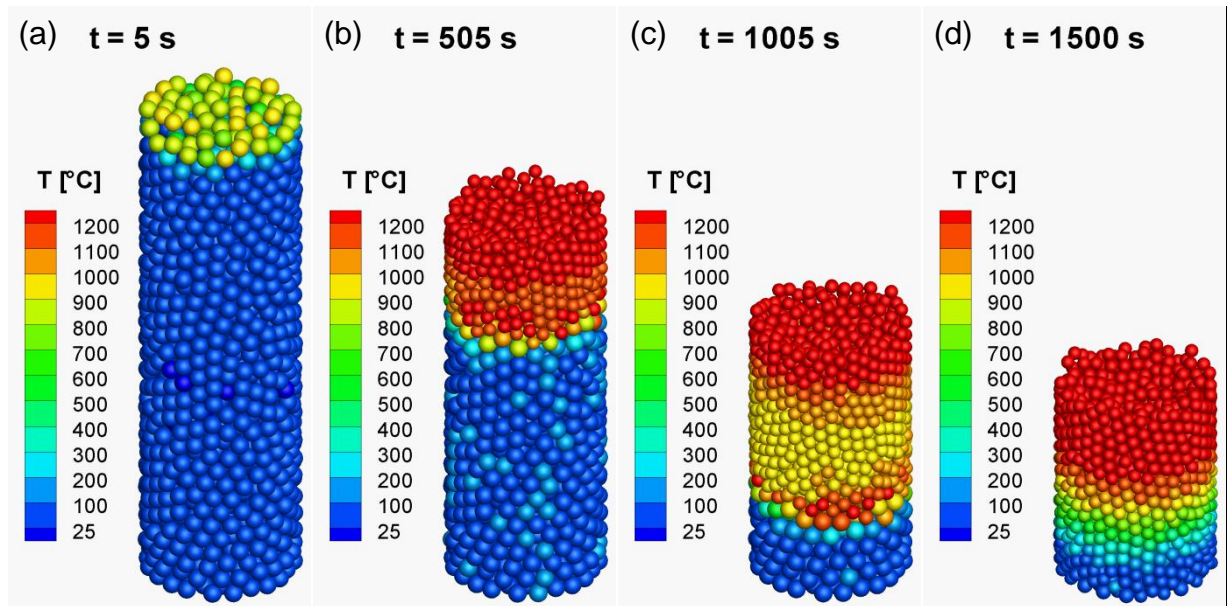


Abb. 5.53: Berechnete Oberflächentemperatur für RDF Pellets (neues Verbrennungsmodell) nach a) 5 s, b) 505 s, c) 1005 s und d) 1500 s

Es zeigte sich, dass durch die Verbesserungen im Modell (Diffusionswiderstand bei Pyrolyse, Kokskinetik) die Abbrandgeschwindigkeit bei gleichen Randbedingungen mit dem neuen Modell etwas langsamer war, als mit dem ursprünglichen. Entscheidend an der Verbesserung war jedoch, dass durch die separate Berechnung partikelinterner Prozesse für Ober- und Unterseite in Halbschalenmodellen, die Zündfront deutlich stabiler durch die Brennstoffschüttung lief und auch bei niedrigen Abbrandgeschwindigkeiten (niedriger als sie in den Experimenten gemessen wurden) nicht stoppte. Ein Problem war jedoch weiterhin, dass für eine umfassende Überprüfung des DEM-Verbrennungsmodells viele wichtige Modellparameter unbekannt bzw. nicht konstant einstellbar waren. So war neben den nicht vollständig angegebenen Stoffwerten auch die auf die oberste Brennstoffschicht eingestrahlte Wärmemenge und die Wärmeverluste durch die Seitenwände der Literaturquelle nicht eindeutig zu entnehmen. Eine umfassende Überprüfung des Verbrennungsmodells konnte daher anhand der Literaturdaten nicht erfolgen.

5.6.3 Ergebnisse Rostfeuerung

Zur Demonstration der Anwendung von gekoppelten DEM-FLUENT-Simulationen zur Untersuchung des Mischungseinflusses bzw. des Einflusses der Stabbewegung in Rostfeuerung wurde Modellrostfeuerungsanlage MARS, die an der Universität Duisburg-Essen betrieben wird, simuliert. Die geometrischen Abmaße des Rostes und

Kessels wurden anhand von Literaturdaten [5] bestimmt. Der Vorschubrost ist 4,3 m lang und hat eine Neigung von 10°, die Rostbreite beträgt 1,25 m. Die Einteilung der Primärluftzonen und die Position der Sekundärluftdüsen wird in Abb. 5.54 gezeigt.

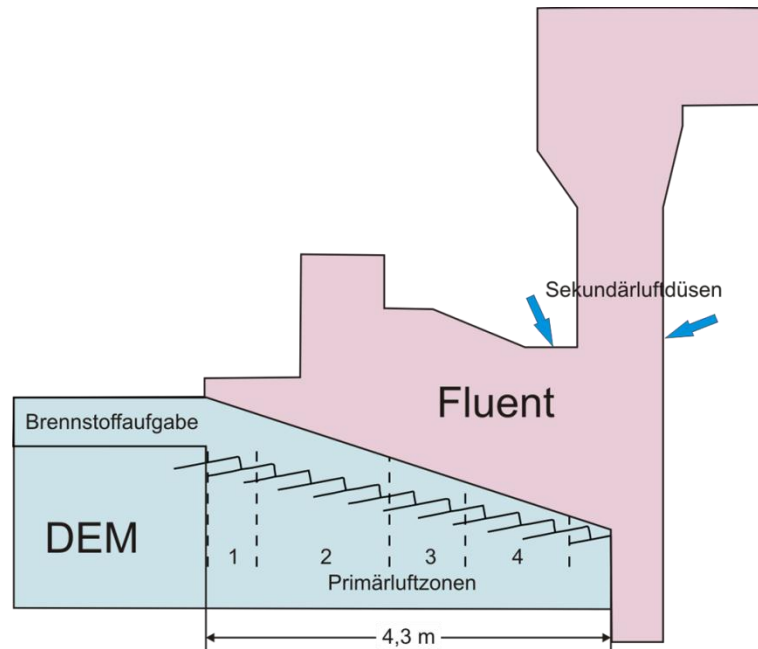


Abb. 5.54: Rostmodell und Kopplungsgebiete

Die Simulation des Brennstoffbetts, der bewegten Roststäbe und der Primärluftzugabe bzw. der Luftströmung in der Brennstoffschüttung erfolgte im DEM-Modell. Zur Simulation der Rauchgasströmung und homogenen Verbrennungsreaktion im Kessel wurde der kommerzielle CFD-Code FLUENT verwendet. Die Kopplung zwischen dem DEM-Modell und der CFD-Rechnung erfolgt durch eine bidirektionale Übergabe der jeweiligen Randbedingungen (Strahlungswärmeaustausch zwischen Brennstoffbett und Kesselwänden, Gasstrom und Turbulenzgrad, freigesetzte Spezies) an der Grenzfläche zwischen dem DEM-Rostmodell und dem CFD-Feuerraummodell.

Die Simulationen wurden mit variiertem Roststabbewegung und ansonsten gleichen Betriebsparametern durchgeführt. Als Modellbrennstoff wurden Holzhackschnitzel bei einer Gesamtluftzahl von 1,88 gefeuert. Der Sekundärluftanteil betrug 42%. Die in den Simulationen gleich vorgegebenen Betriebsparameter sind in Tab. 5.5 gegeben. Die Aufteilung der Primärluft ist in Tab. 5.6 beschrieben.

Tab. 5.5: Betriebsparameter

Heizwert Brennstoff [kJ/kg]	Elementaranalyse (C/H/O/N/S)	Brennstoffmassenstrom [kg/h]	Globalluftzahl [-]	Sekundärluftanteil
15701	43,58/5,37/39,8/0,13/0,02	217,82	1,88	42%

Es wurden zwei Simulationsreihen durchgeführt, bei der ersten war die Roststabgeschwindigkeit in allen Primärluftzonen identisch, bei der zweiten bewegten sich die Stäbe in den ersten beiden Primärluftzonen langsamer als in den letzten beiden Primärluftzonen. In jeder Simulationsreihe wurden vier Simulationen mit unterschiedlicher Roststabgeschwindigkeit durchgeführt, dabei entsprach die mittlere Roststabgeschwindigkeit der zweiten Versuchsreihe der jeweiligen Geschwindigkeitsstufe der ersten Versuchsreihe. Die auf die Primärluftzonen verteilten Stabgeschwindigkeiten sind in Tab. 5.6 gegeben. Die Gesamtlänge eines Hubs betrug dabei immer 0,3 m.

Tab. 5.6: Unterscheidung Primärluftzonen in den Simulationen

Parameter	PL Zone 1	PL Zone 2	PL Zone 3	PL Zone 4
Primärluftvertrimmung	5,8%	53,8%	29,2%	11,2%
Stabgeschwindigkeit gleich (Doppelhöhe/h)	1)3,38; 2)6,76; 3)10,14; 4)27,04	1)3,38; 2)6,76; 3)10,14; 4)27,04	1)3,38; 2)6,76; 3)10,14; 4)27,04	1)3,38; 2)6,76; 3)10,14; 4)27,04
Stabgeschw. ungleich (Doppelhöhe/h)	1)2,70; 2)5,41; 3)8,11; 4)21,63	1)2,70; 2)5,41; 3)8,11; 4)21,63	1)4,06; 2)8,11; 3)12,17; 4)32,45	1)4,06; 2)8,11; 3)12,17; 4)32,45

In Abb. 5.55 sind (von links nach rechts) rel. Wasser-, Flüchtigen-, Koksmaße und Temperatur der Brennstoffpartikel für die Simulationen mit gleichschnellen Roststäben visualisiert.

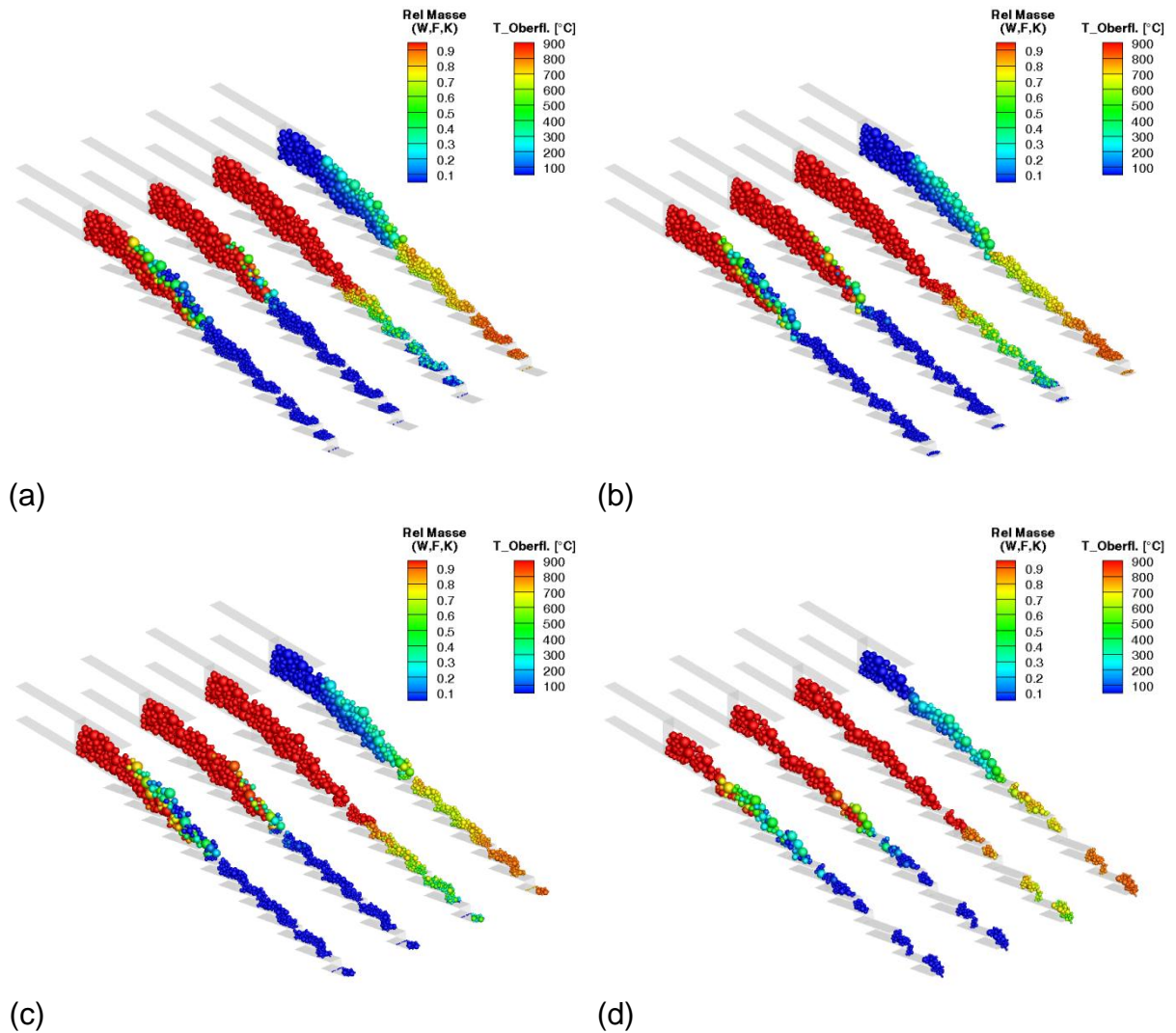


Abb. 5.55: Wasser, Flüchtige, Koks, Temperatur im Brennstoffbett bei gleicher Roststabgeschwindigkeit für alle Roststäbe mit a) 3,38 Doppelhüben, b) 6,76 Doppelhüben, c) 10,14 Doppelhüben und d) 27,04 Doppelhüben

In den Simulationen nahm die Schichthöhe des Brennstoffbetts mit steigender Roststabgeschwindigkeit ab (Abb. 5.55). Dies führte dazu, dass insbesondere bei einer Geschwindigkeit von 27,04 Doppelhüben pro Stunde (Abb. 5.55 d) das Brennstoffbett nicht mehr geschlossen war und die Roststäbe frei lagen. Zudem verschob sich das Ende der Zone des Koksausbrands bei steigender Geschwindigkeit weiter nach hinten auf den Rost bzw. stieg die Menge an unverbranntem Brennstoff, die in den Austrag gefördert wurde. Die Lage der Trocknungszone und Pyrolysezone auf dem Rost war dagegen nahezu unabhängig von der Roststabgeschwindigkeit.

Die Auswertung der Simulationsdaten bestätigt den visuellen Eindruck. In Abb. 5.56 sind die über die Zeit gemittelte Temperatur, der freigesetzte Massenstrom an Was-

ser, Flüchtige und die Koksumsatzrate des Brennstoffs über die rel. Position (bezogen auf die Rostlänge in Förderrichtung) auf dem Rost aufgetragen.

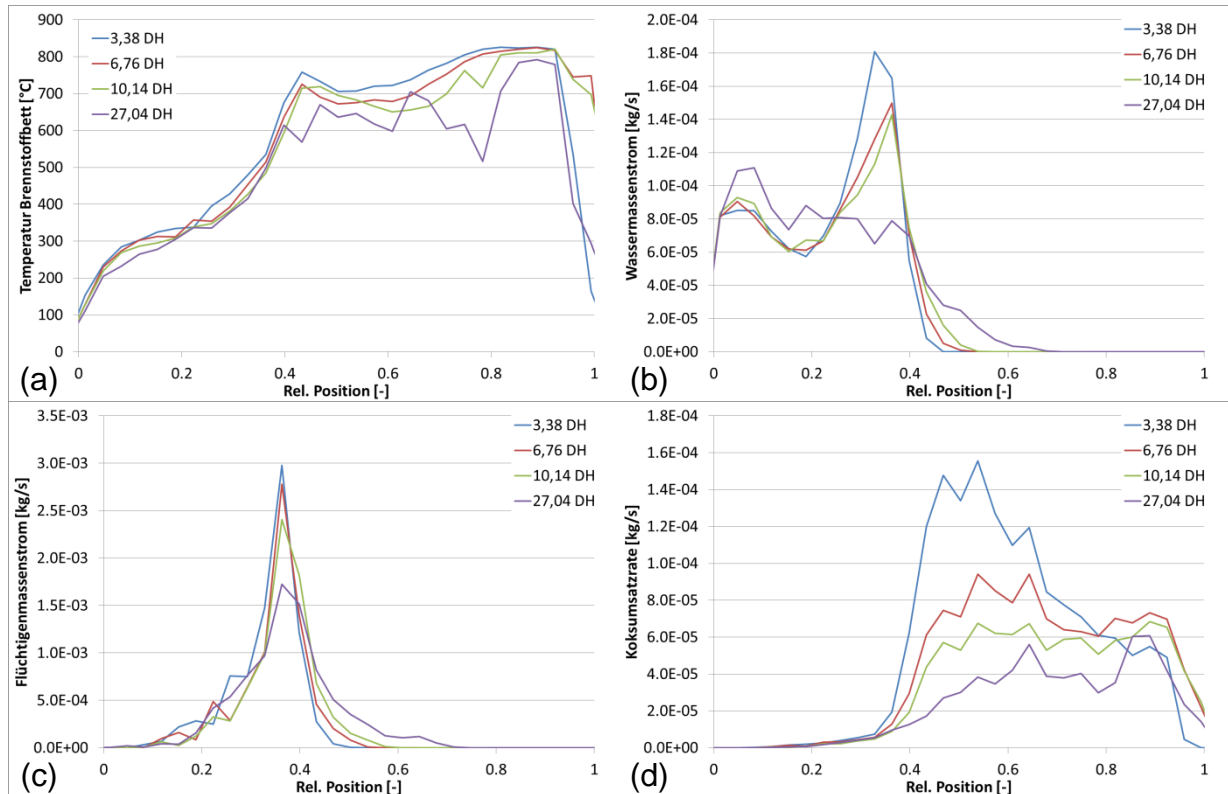


Abb. 5.56: Simulationen mit gleicher Roststabgeschwindigkeit für alle Roststäbe:

a) Brennstofftemperatur, b) Massenstrom Wasser, c) Massenstrom Flüchtige, d) Koksumsatzrate über der Rostlänge

Der Verlauf der Brennstofftemperatur im ersten Abschnitt des Rosts war nahezu unabhängig von der Roststabgeschwindigkeit (Abb. 5.56 a), erst die einsetzender Koksumsatzung führte zu Temperaturunterschieden im hinteren Abschnitt. Grund dafür war, dass bei niedriger Stabgeschwindigkeit aufgrund der längeren Verweilzeit deutlich mehr Koks umgesetzt wird (Abb. 5.56 d) und so auch die Brennstofftemperatur im hinteren Rostabschnitt zunimmt. Die über die Rostlänge freigesetzte Wassermenge war bei 3,38, 6,76 und 10,14 DH/h nahezu identisch (Abb. 5.56 b). Direkt nach der Brennstoffaufgabe stieg der freigesetzte Massenstrom aufgrund der Strahlungswärme aus dem Kessel an. Eine weitere Erhöhung der verdampften Wassermenge konnte durch das Einsetzen der Pyrolyse verzeichnet werden. Bei einer Roststabgeschwindigkeit von 27,04 DH/h war ein deutlicher Anstieg der Verdampfungsrates direkt nach der Aufgabe zu verzeichnen, da die Höhe Brennstoffschicht deutlich geringer war und die Strahlungswärme bis in den unteren Schichtbereich vordrang. Die Lage der maximalen Flüchtigenfreisetzung war weitgehend unabhän-

gig von der Roststabgeschwindigkeit (Abb. 5.56 c), allerdings erfolgt die Freisetzung bei maximaler Stabgeschwindigkeit über einen größeren Rostbereich verteilt.

In Abb. 5.57 ist die Gastemperatur im Kessel für die Simulationen mit über die Primärluftzonen gleicher Roststabtemperatur visualisiert.

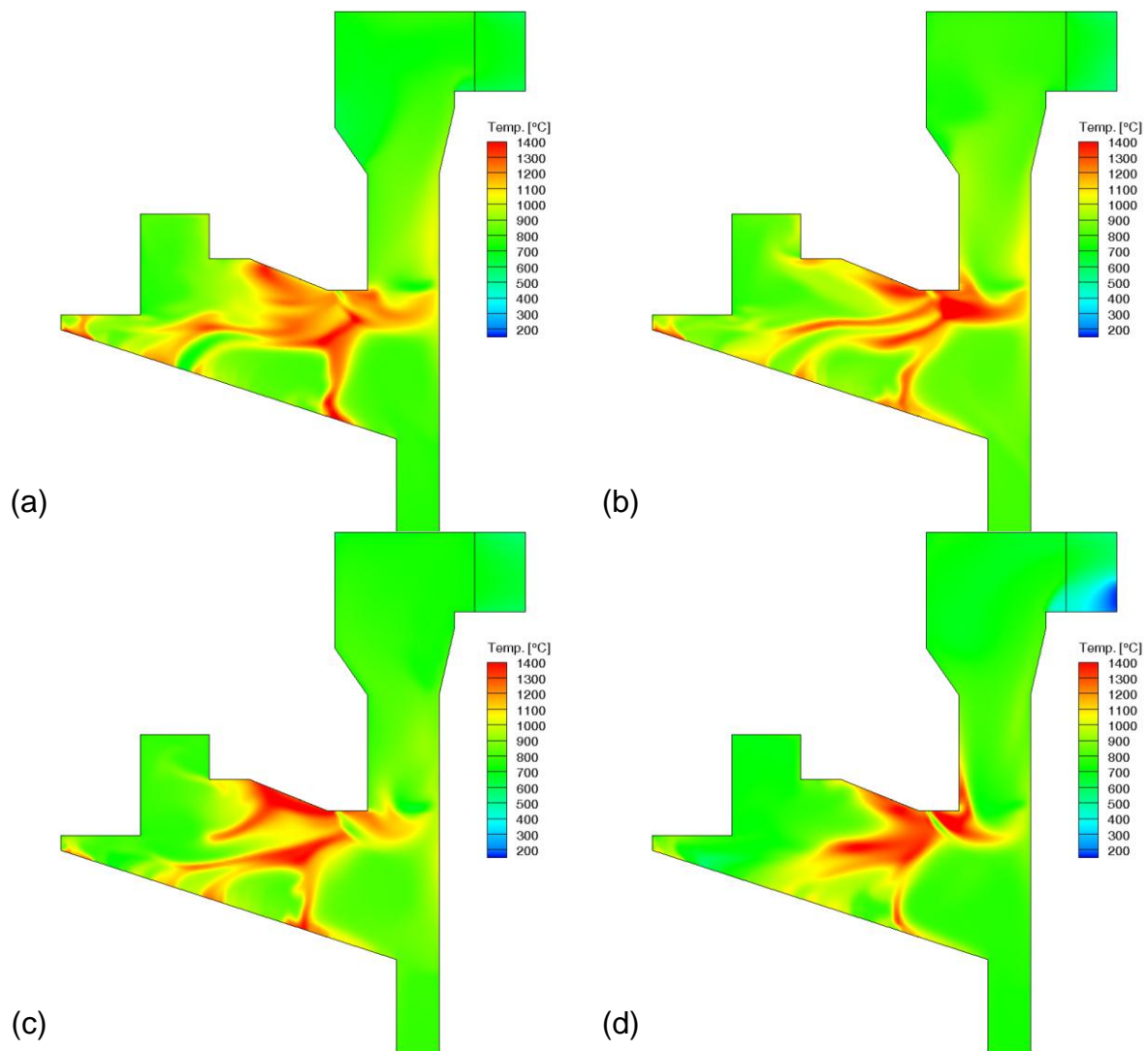


Abb. 5.57: Gastemperatur im Kessel bei gleicher Roststabgeschwindigkeit für alle Roststäbe mit a) 3,38 Doppelhüben, b) 6,76 Doppelhüben, c) 10,14 Doppelhüben und d) 27,04 Doppelhüben

Die Roststabgeschwindigkeit hatte einen geringen Einfluss auf die Temperaturverteilung im Kessel (Abb. 5.57). Die höchsten Temperaturen waren jeweils kurz vor bzw. hinter der Pyrolysezone, über dem Bereich des Koksausbrands und um die Sekundärluftdüsen messbar. Zwischen den lokalen Temperaturmaxima vor unter hinter der Pyrolysezone ist bei 3,38, 6,76 und 10,14 DH/h deutlich die aus der Pyrolyse resultierende CO-Strähne zu erkennen (Abb. 5.57 a-c). Bei 27,04 DH/h ist die CO-Strähne

dagegen nicht deutlich zu erkennen, da die Flüchtigensfreisetzung über einen größeren Rostbereich erfolgte. Die maximale Kesseltemperatur stieg bei sinkender Roststabgeschwindigkeit an. Bei 3,38 DH/h betrug sie 1846°C bei 27,04 DH/h dagegen nur 1744°C.

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse verglichen, bei denen die Roststabgeschwindigkeit in den ersten beiden Primärluftzonen ungleich der Geschwindigkeit in den letzten beiden Primärluftzonen war. Zum Vergleich wird allerdings weiterhin die mittlere Roststabgeschwindigkeit angegeben, die tatsächlichen Geschwindigkeiten sind Tab. 5.6 zu entnehmen.

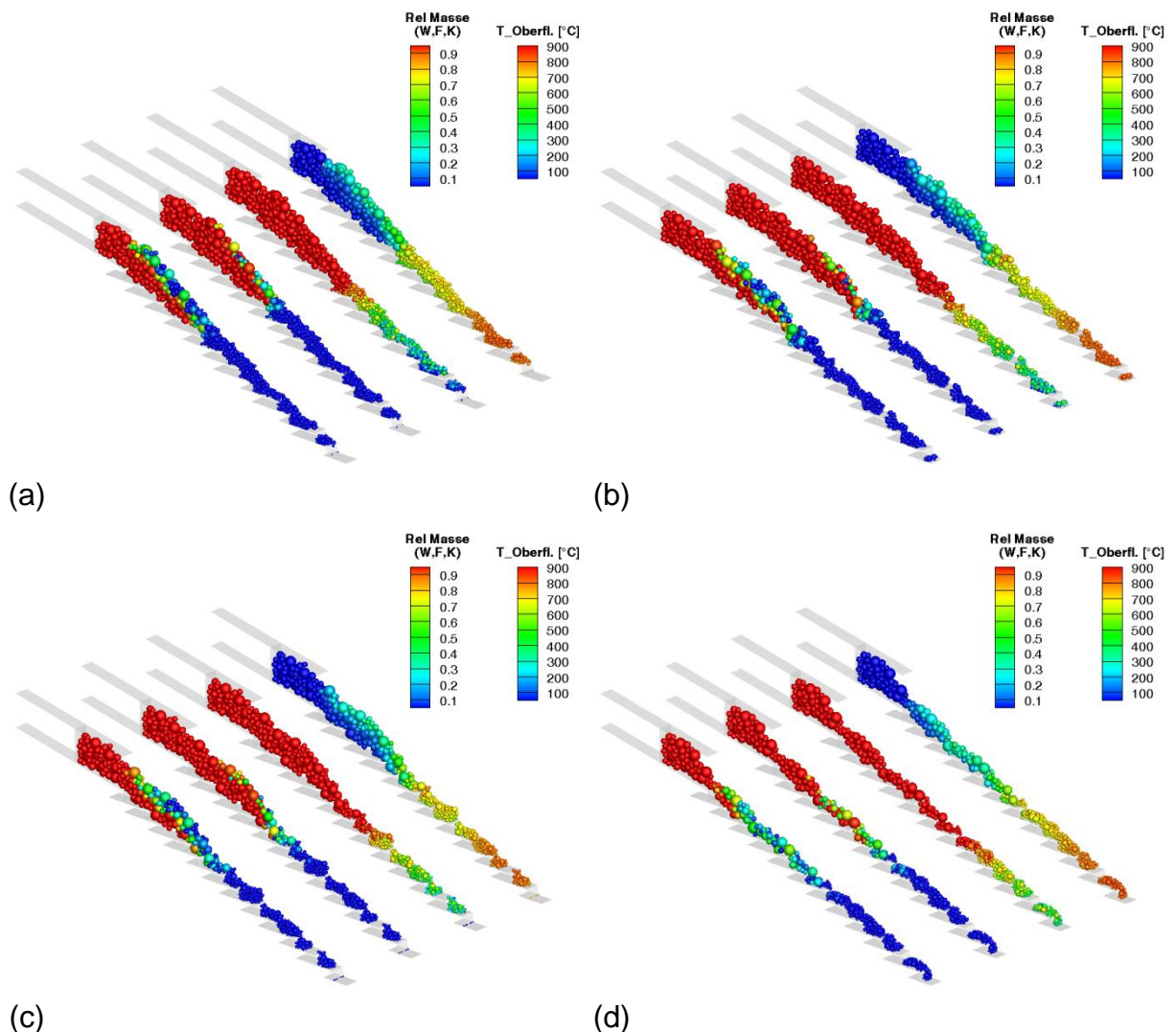


Abb. 5.58: Wasser, Flüchtige, Koks, Temperatur im Brennstoffbett bei ungleicher Roststabgeschwindigkeit mit im Schnitt a) 3,38 Doppelhüben, b) 6,76 Doppelhüben, c) 10,14 Doppelhüben und d) 27,04 Doppelhüben

Die Schichthöhe des Brennstoffbetts war auch bei ungleicher Stabgeschwindigkeit stark abhängig von der Roststabgeschwindigkeit (Abb. 5.58). Zudem stieg die Menge des in den Austrag geförderten unverbrannten Brennstoffs an. Bei maximaler Roststabgeschwindigkeit erschien das Brennstoffbett im Gegensatz zu den Simulationen mit gleichverteilter Geschwindigkeit geschlossener.

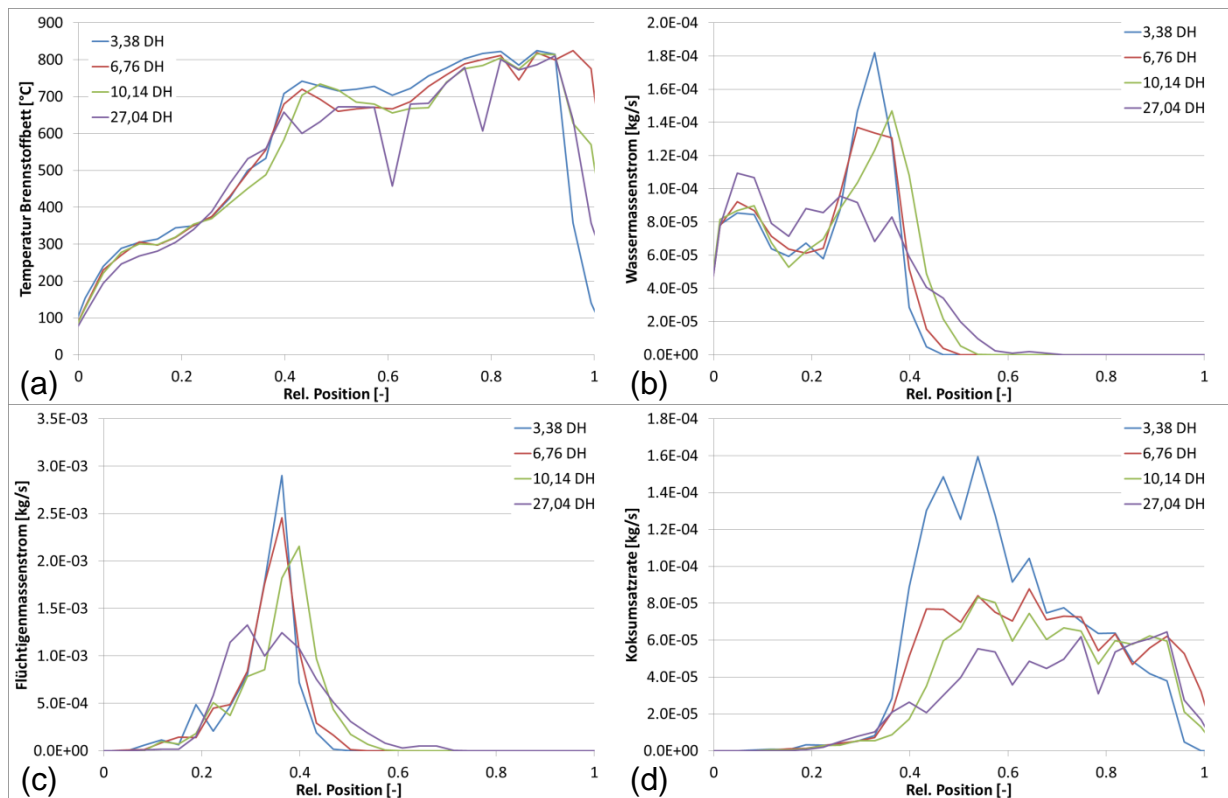


Abb. 5.59: Simulationen mit ungleicher Roststabgeschwindigkeit: a) Brennstofftemperatur, b) Massenstrom Wasser, c) Massenstrom Flüchtige, d) Koksumsatzrate über der Rostlänge

Auch die quantitative Auswertung der Simulationsdaten ergab nur geringe Unterschiede zwischen den Simulationen mit gleichverteilter und ungleichverteilter Roststabgeschwindigkeit (Abb. 5.59). Die bei geringer Roststabgeschwindigkeit erhöhte Koksumsatzrate im hinteren Rostabschnitt (Abb. 5.59 d) führte dort zu im Mittel höheren Brennstofftemperaturen (Abb. 5.59 a). Allerdings hatte die Roststabgeschwindigkeit einen stärkeren Einfluss auf die Lage der Trocknungs- (Abb. 5.59 b) und Pyrolysezone (Abb. 5.59 c), wenn die Roststäbe in Primärluftzone 3 und 4 schneller führen als in 1 und 2. In beiden Fällen erfolgte die Freisetzung bei höherer Geschwindigkeit über einen breiteren Bereich. Dies galt insbesondere für die Flüchtigenfreisetzung bei maximaler Roststabgeschwindigkeit (Abb. 5.59 c), die deutlich homogener über die Rostlänge verteilt verlief.

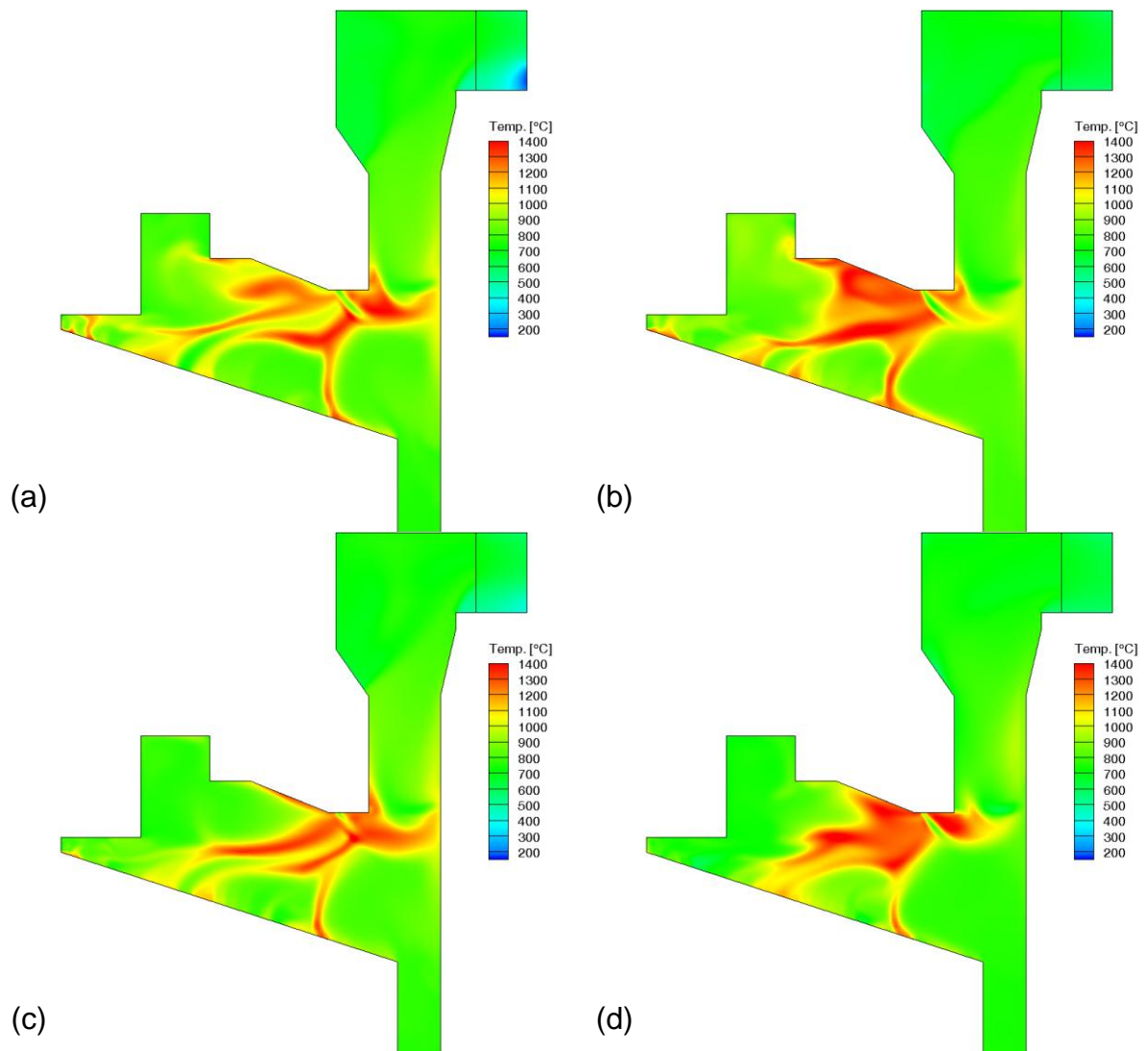


Abb. 5.60: Gastemperatur im Kessel bei ungleicher Roststabgeschwindigkeit mit im Schnitt a) 3,38 Doppelhüben, b) 6,76 Doppelhüben, c) 10,14 Doppelhüben und d) 27,04 Doppelhüben

Die Temperaturverteilung im Kessel war nur im geringen Maße von der Roststabgeschwindigkeit und von der Unterteilung der Roststabgeschwindigkeiten nach Primärluftzonen abhängig (Abb. 5.60). Die Lage der Temperaturmaxima war vergleichbar, allerdings war erneut bei maximaler Roststabgeschwindigkeit (im Schnitt 27,04 DH/h) die bei der Pyrolyse freigesetzte CO-Strähne anhand der visualisierten Gastemperaturen nicht deutlich wahrnehmbar. Der Einfluss der Roststabgeschwindigkeit auf die maximale Kesseltemperatur war bei Unterteilung der Roststabgeschwindigkeiten nach Primärluftzonen dagegen deutlicher als bei gleichverteilter Geschwindigkeit. So lag die maximale Kesseltemperatur bei 3,38 DH/h mit 1875 C deutlich höher als in der ersten Simulationsreihe und bei 27,04 DH/h mit 1724°C deutlich niedriger.

Insgesamt zeigte sich bei den Simulationen trotz gleicher Betriebsparameter ein z. T. deutlicher Einfluss der Roststabgeschwindigkeit auf den Feuerungsprozess. Zusätzlich war, obwohl die Verteilung der Roststabgeschwindigkeit auf die Primärluftzonen nur um einen kleineren Faktor ($\pm 20\%$) verändert wurde, der Einfluss des Bewegungsmusters auf die Feuerung zu erkennen. Eine experimentelle Messreihe bezüglich des Einflusses der Roststabbewegung bzw. des Roststabbewegungsmusters unter vergleichbaren Betriebsparametern und unter Verwendung eines Modellbrennstoffs zur Überprüfung der Ergebnisse ist allerdings nicht dokumentiert.

6 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU

Die qualitative und quantitativen Ergebnisse und Erkenntnisse zu den Detailvorgängen in reagierenden, mechanisch bewegten Schüttungen am Beispiel von Rostsystemen ist von generellem Nutzen für alle Bereiche der Energieverfahrens- und Energieprozesstechnik, in denen stückige Feststoffe transportiert, gemischt, mechanisch bzw. thermisch behandelt oder umgewandelt werden.

Vor allem bei kleinen und mittleren Unternehmen wird der Spielraum für empirische Entwicklungsarbeiten an laufenden oder in der Inbetriebnahme beim Kunden befindlicher Systeme immer kleiner. Gleichzeitig sind nur selten die finanziellen und vor allem personellen Ressourcen für den Einsatz aufwendiger numerischer Verfahren vorhanden. Hier kann, gerade auch wegen Komplexität der Vorgänge und der Vielzahl der zu variierender Größen, durch die Übernahme der Projektergebnisse die Zahl notwendiger empirischer Untersuchungen verringert werden, was die Entwicklungskosten und das Entwicklungsrisiko vermindert und gleichzeitig die Chancen für einen wirtschaftlichen Erfolg neuer Konzepte verbessert. Die Ergebnisse der Analyse zum Einfluss von Mischung auf Wärme- und Stoffübertragung in bewegten Schüttungen können dabei zur Auslegung von konvektiven Wärmeübertragungs- und Trocknungsprozessen in bewegten granularen Medien direkt eingesetzt werden. Anhand der identifizierten allgemeinen Einflussfaktoren bezüglich konvektiver Transportprozesse ist eine Systembeurteilung auch bei industriellen Anlagen im Voraus realisierbar.

Weiterhin wird den Unternehmen mit dem vorliegenden DEM-Code ein mit den experimentellen Ergebnissen dieses Vorhabens validiertes, innovatives und partikelbasiertes Simulationswerkzeug zur Verfügung gestellt, das es erlaubt, auch messtechnisch nicht erschließbare Detailvorgänge und Abhängigkeiten zu untersuchen und neue Feuerungsanlagen anhand der Ergebnisse zu optimieren. Auch eröffnet die generelle Weiterentwicklung des Wissens durch den Einsatz numerischer Methoden in diesem bisher hauptsächlich empirisch bearbeiteten Bereich wichtige Optionen zur Entwicklung neuer Lösungsansätze mit den daraus resultierenden wirtschaftlichen Erfolgsaussichten.

Aber nicht nur für diesen Anwenderkreis wird ein Werkzeug für die Anlagenauslegung bereitgestellt. Das LEAT-DEM-Tool ist auch direkt oder mit minimalen Anpassungen (z. B. Trocknungsanlagen, Trommelröstanlagen in der Nahrungsmittelindustrie) auf andere industrielle Prozesse anwendbar. So wird bereits für ein kleines Un-

ternehmen eine numerische Detailuntersuchung zum Abkühlprozess in einer spezifischen Feststoffschüttung mit dem überprüften Simulationstool durchgeführt.

Letztendlich dokumentiert auch das große Interesse eines breiten Spektrums von Unternehmen am projektbegleitenden Ausschuss die Erwartung der Unternehmen, mittelfristig ihre Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit durch die vorwettbewerbliche Forschung zu verbessern.

7 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Übersicht Ergebnistransfer in die Wirtschaft			
	Zeitraum	Maßnahme	Erfüllungsstatus
Maßnahme während der Laufzeit	Fortlaufend	Betreuung studentischer Arbeiten zur Thematik und Einbeziehung studentischer Hilfskräfte	Eine Diplomarbeit wurde 2009 zu der Thematik verfasst. 2010 wurden 2 Studienarbeiten, 2 Projektarbeiten und eine Diplomarbeit zu der Thematik verfasst. 2011 wurden 2 Bachelorarbeiten, 2 Studienarbeiten und eine Projektarbeit zu der Thematik verfasst.
	Halbjährlich	Berichterstattung an den Projektbegleitenden Ausschuss	Treffen des Projektbegleitenden Ausschuss am 18.09.2009, am 16.04.2010, am 29.10.2010, am 19.09.2011 und am 15.06.2012 statt.
	Halbjährlich	Bereitstellung eines Protokolls und der gezeigten Präsentation der PA-Sitzungen	Im Anschluss an das Treffen des Projektbegleitenden Ausschuss
	Jährlich	Bereitstellung des Zwischenberichts	Zwischenbericht 2009, 2010 und 2011 eingereicht
	2009	Detaillierte Vorstellung der DEM und des Vorgängerprojektes 15061 N für die im PA vertretenden Unternehmen aus Zement- und Nahrungsmittelindustrie	Erfolgte im Zuge des ersten Treffens des Projektbegleitenden Ausschuss am 18.09.2009
	2009	Querinformation über die Plattform der VGB-Forschungsstiftung (Homepage)	Vorstellung des Projektes auf der VGB-Homepage auf deutsch und englisch: http://www.vgb.org/fue_projekt328-path-1.html
	2010,2011	Veröffentlichung in Fachzeitschrift, Fokus Grundlagenforschung (Powder Technology, Chemical Engineering Science, ...)	2 Veröffentlichungen in der „Powder Technology“, online unter: http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2010.12.008 und eine zweite unter: http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2011.12.05

			1
	2012	Bereitstellung von detaillierten Versuchsergebnissen und Simulationsdatensätzen im PA	Im Rahmen des Abschlussberichts und die kompletten Datensätze auf Anfrage
Maßnahme nach Abschluss	2012	Abschlussbericht	
	2012	Veröffentlichung in Fachzeitschrift, Fokus industrielle Anwendung (VGB-Powertech)	Artikel eingereicht am (N.N.)
	Ab 2012	Übernahme und Darstellung von Ergebnissen in der akademischen Lehre	
	2013	Vortrag auf Konferenz (PARTEC 2013 in Nürnberg)	Abstract eingereicht am 15.06.2012
	2013/2014	Dissertation	

8 Umsetzung des Transferkonzepts

Über die üblichen Wege der Verbreitung von Forschungsergebnissen in Veröffentlichungen und Berichten der Forschungseinrichtung hinaus, ist durch die sehr enge Zusammenarbeit mit den im projektbegleitenden Ausschuss vertretenen Unternehmen, ein schneller Transfer der Ergebnisse in die industrielle Praxis erfolgt. Dafür wurden und werden die Ergebnisse allen Interessenten jederzeit auf Anfrage in aufbereiteter Form zur Verfügung gestellt.

In den stattgefundenen Treffen des projektbegleitenden Ausschusses wurde der Projektfortschritt informativ dokumentiert, die geplante Weiterarbeit diskutiert und korrigiert, sowie die Erfahrung der Beteiligten mit den verschiedenen Aspekten der Zielsetzung kommuniziert.

Die Querinformation in die Energiebranche und zu anderen Industrieverbänden der Chemie- und Verfahrenstechnik wird durch die Einbindung des VGB, speziell des ETC "Use of Renewables and Distributed Generation" mit dem EWG "Biomass" sichergestellt. Hier werden auch sämtliche Zwischenberichte und der Abschlussbericht interessierten Unternehmen zugänglich gemacht. Die Erstveröffentlichung der Projektergebnisse erfolgt in der VGB PowerTech, einer Fachzeitschrift mit Fokus auf industrielle Anwendungen. Zusätzlich sind Untersuchungsergebnisse für die Veröffentlichung auf einer internationalen Konferenz (PARTEC 2013) eingereicht.

Die validierten Modellansätze werden oder wurden bereits veröffentlicht und stehen damit für den Einsatz in kommerziellen DEM-Paketen zur Verfügung. Außerdem werden die komplette Datensätze der DEM-Rechnungen (lokale Mischungsraten, Verweilzeiten, lokale Wärmeströme, Temperatur- und Feuchtefelder) der untersuchten Trocknungssysteme auf Anfrage zur Verfügung gestellt.

Durch die Einbindung der Nahrungsmittelindustrie (Probat) und der Zementindustrie (CemProTec, Polysius) in den projektbegleitenden Ausschuss wurde das Auslegungswerkzeug DEM-Simulation auch in diesen Industriezweigen bekannt gemacht. Ein erstes Unternehmen bedient sich des Werkzeugs bereits.

Durch entsprechende Übernahme und Darstellung der Ergebnisse in der akademischen Lehre wird eine weitere Verbreitung der Informationen gewährleistet und über den Personaltransfer in die Industrie getragen.

9 Literaturverzeichnis

1. Rickelt, S., Kruggel-Emden, H., Wirtz, S., Scherer, V.: Simulation of Heat Transfer in Moving Granular Material by the Discrete Element Method With Special Emphasis on Inner Particle Heat Transfer. Volume 2: Theory and Fundamental Research; Aerospace Heat Transfer; Gas Turbine Heat Transfer; Computational Heat Transfer. pp. 961-971. ASME, San Francisco (2009).
2. Brosch, B., Simsek, E., Wirtz, S., Scherer, V., Waldner, M.H.: Gekoppelte DEM / CFD Simulation einer Hausmüllverbrennungsanlage. Flammentag (2011).
3. Kast, W.: Adsorption aus der Gasphase. VCH, Weinheim [u.a.] (1988).
4. Porteiro, J., Patiño, D., Collazo, J., Granada, E., Moran, J., Miguez, J.L.: Experimental analysis of the ignition front propagation of several biomass fuels in a fixed-bed combustor. Fuel. 89, 26-35 (2010).
5. Goerner, K., Keldenich, K., Klasen, T., Gillmann, P.: Design and Operation of a Modular Plant for Biomass Usage and Thermal Treatment of Wastes. Power-Gen Europe. pp. 1-19. , Barcelona (2004).
6. Bruch, C.: Beitrag zur Modellierung der Festbettverbrennung in automatischen Holzfeuerungen, (2001).