



Vitalij Salikov (Autor)

# Charakterisierung der Fluidodynamik und Diskrete-Elemente-Modellierung eines neuartigen Strahlschichtapparates



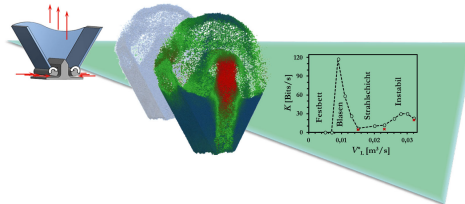
**SPE-Schriftenreihe**

**11**

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Stefan Heinrich

Vitalij Salikov

## Charakterisierung der Fluidodynamik und Diskrete-Elemente-Modellierung eines neuartigen Strahlschichtapparates



Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/7570>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# 1 Einleitung

Feststoffe in Partikelform (verschiedene Pulver, Granulate oder Agglomerate) sind ein wichtiger Bestandteil unseres Alltags. Es existieren zahlreiche technologische Möglichkeiten zur Erzeugung und Behandlung von Partikeln. Bezüglich der Methode des Einbringens der Bewegungsenergie in ein Partikelkollektiv kann zwischen einem rein mechanischen Eintrag (wie z.B. in Mischern oder Granuliertellern) und einer durch die Energie eines Prozessgases induzierten Fluidisation von Partikeln unterschieden werden. Eine Strahlschicht (engl.: spouted bed) wurde bei Mathur und Gishler im Jahre 1954 als eine Technik, bei der ein besonders intensiver Kontakt eines Gases (oder einer Flüssigkeit) mit grobkörnigen Partikeln einer einheitlichen Korngröße realisiert werden kann, eingeführt (Mathur und Gishler 1954). Die Strahlschicht stellte seinerzeit eine neuartige Methode der Gas-Partikel-Kontaktierung dar und war als eine bessere Alternative zur Partikel-fluidisation in konventionellen Wirbelschichten für die Behandlung von grobkörnigen und kohäsiven (befeuchteten) Partikeln gedacht (Mathur und Gishler 1954, 1955a). Die erste erfolgreiche Anwendung der Strahlschichttechnologie war die Trocknung von Weizenkörnern (Mathur und Gishler 1955b).

Eine Strahlschicht unterscheidet sich von einer Wirbelschicht im Wesentlichen in der Methode der Gaseinführung und im Bewegungsmuster der Partikel. In einer Wirbelschicht wird das Gas ins Partikelbett üblicherweise über einen perforierten Verteilerboden mit vielen kleinen Öffnungen eingeführt. Erreicht die Gasgeschwindigkeit in der Anlage die sogenannte minimale Fluidisationsgeschwindigkeit  $u_{mf}$  (engl.: minimum fluidization velocity) entsteht eine komplexe und chaotische Partikelbewegung. Zudem ist ein Blasenverhalten typisch. In einer Strahlschicht wird das Gas in das Partikelbett über eine zentrale Öffnung oder wenige Öffnungen eingebracht. Bei dieser Methode der Gaseinführung kann eine kontinuierliche Zirkulation von Partikeln (sogenannter Strahlschichtzustand) in der Anlage erzielt werden (Abb. 1.1). Diese erwies sich als eine sehr vorteilhafte Art der Partikelströmung für die Durchführung von vielen Prozessen mit Feststoffen und fand eine vielfältige industrielle Anwendung. Die bis dato berichteten Anwendungen umfassen u.a.: die Kühlung und Erwärmung, Mischung, Trocknung, Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, katalytische und elektrochemische Reaktionstechnik, Beschichtung, Sprühgranulation und Agglomeration. Eine Übersicht der Anwendungsmöglichkeiten kann in Epstein und Grace (2011) gefunden werden.

Das Strömungsverhalten von Partikeln in der Strahlschicht ist immer noch Gegenstand intensiver Forschung. Epstein und Grace berichteten bereits im Jahre 2011, dass die Anzahl der wissenschaftlichen Publikation und Patente zum Thema „Strahlschicht“ 1300 überstieg (Epstein und Grace 2011). Aufgrund dessen ist es kaum möglich, alle Aspekte, die Strahlschichten anbelangen, in dieser Einleitung darzustellen. Für einen interessierten Leser wird für weitere Informationen auf die Übersichtbücher von Mathur und Epstein (1974) und von Epstein und Grace (2011), die sich mit dem Thema „Strahlschicht“ sehr eingehend befassen, verwiesen. Im Nachfolgenden

wird auf die Aspekte, die im Rahmen dieser Arbeit von einer besonderen Relevanz sind, näher eingegangen. Dies sind:

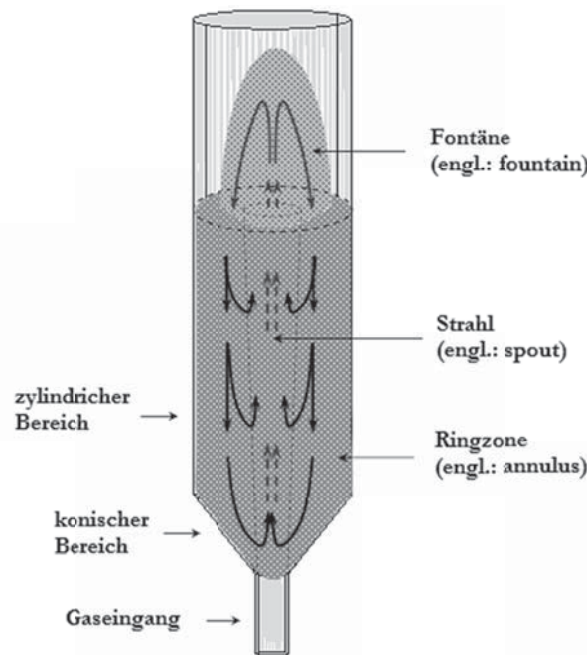
- (i) Die Strömungsart und die -stabilität der Strömung,
- (ii) die Bauarten, mit denen ein stabiler Strahlschichtzustand erreicht werden kann sowie der Einfluss von internen Einbauten,
- (iii) die numerischen Untersuchungen an Strahlschichten,
- (iv) die prismatische Anlagengeometrie.

## 1.1 Partikelströmung in Strahlschichten

In der Abbildung 1.1 wird schematisch das typische zirkulierende Strömungsmuster in einer klassischen konisch-zylindrischen Strahlschicht gezeigt. Das Gas wird in die Anlage durch einen vertikalen Gaseingang eingeführt. Erreicht die Gasgeschwindigkeit einen bestimmten Wert, entsteht zunächst ein Hohlraum über dem Gaseingang. Wird die Gasgeschwindigkeit weiter erhöht und erreicht die partikel- und apparatespezifische Gasgeschwindigkeit  $u_{ms}$  (engl.: minimum spouting velocity), expandiert der Hohlraum über die Höhe der gesamten Partikelschüttung (sogenannte Betthöhe), und es bildet sich ein zentraler Strahl (engl.: spout) mit einer aufwärts gerichteten verdünnten Gas-Partikel-Strömung.

Die Partikel aus der Ringzone, die den Strahl umschließt, werden durch das Gas mitgerissen und aufwärts beschleunigt. Unter der Einwirkung der Schwerkraft werden sie allmählich abgebremst, ändern ihre Bewegungsrichtung im Fontänenbereich und fallen erneut auf das Partikelbett in der Ringzone. In der Ringzone rutschen sie langsam als eine bewegte Schüttung abwärts, um in einem weiteren Zyklus erneut vom Strahl erfasst und aufwärts beschleunigt zu werden.

Dieser Strömungszustand ist stabil, wenn diese drei Strömungsbereiche stabile Formen aufweisen und die Partikel die Bereiche immer wieder durchlaufen. Dadurch besitzen die Partikel ähnliche Trajektorien, translatorische und Rotationsgeschwindigkeiten sowie ähnliche Verweilzeiten in jeweiligen Strömungsbereichen und sind ähnlichen mechanischen Belastungen ausgesetzt. Es ist dann naheliegend, dass ein solcher Strömungszustand zu einer sehr guten Produkthomogenität führen sollte (Rocha und Taranto 2011). Dies kann beispielweise anhand eines Beschichtungsprozess bei Einsprühung eines Beschichtungsmittels (Suspension, Lösung oder Schmelze) durch eine Düse verdeutlicht werden: Erfolgt die Einsprühung von unten (engl.: bottom spray), werden die in der Anlage zirkulierenden Partikel immer wieder im Strahlbereich mit der eingesprühnten Flüssigkeit benetzt, im Fontänenbereich getrocknet und in den Rückflusszonen wieder in den Strahlbereich transportiert, wo im nächsten Zyklus eine weitere Schicht aufgebracht wird.



**Abbildung 1.1:** Schematische Darstellung der Geometrie und Partikelbewegung in der konisch-zylindrischen Strahlschicht nach Mathur und Gishler (1954).

Diese Art der kontinuierlichen zirkulierenden Partikelströmung entsteht allerdings nur in einem begrenzten Bereich von Betriebsbedingungen, Partikeleigenschaften und geometrischen Verhältnissen der Anlage. Außerhalb dieses Bereichs wird die Stabilität des Strahlschichtzustands beeinträchtigt, d.h. die Zirkulationsbewegung von Partikeln verliert an Kontinuität und Gleichmäßigkeit, oder es treten unterschiedliche Fluidisationszustände von geringerer Qualität auf. Mathur und Epstein (1974) wiesen darauf hin, dass in den konisch-zylindrischen Strahlschichten das Auftreten eines Strahlschichtzustands und die Strömungsstabilität von folgenden Parametern abhängig sind:

(i) *die statische Höhe des Partikelbetts*

Der Strahlschichtzustand tritt nur in einem begrenzten Bereich von Füllhöhen des Bettmaterials in der Anlage auf. Dieser Wert liegt zwischen den maximal und minimal zulässigen statischen Betthöhen (engl.: minimum und maximum spoutable bed heights oder depths),

(ii) *die Gasgeschwindigkeit*

Der Strahlschichtzustand tritt nur in einem begrenzten Bereich zwischen der minimalen Gasgeschwindigkeit für die Initiierung des Strahlschichtzustands und einer maximal zulässigen Gasgeschwindigkeit (engl.: minimum und maximum spouting velocities) auf,

(iii) *der Winkel des konischen Apparateils*

In den konisch-zylindrischen Anlagen kann bei den meisten Feststoffen nur bei Winkeln, die größer als  $40^\circ$  sind, ein stabiler Strahlschichtzustand erreicht werden,

(iv) *das Verhältnis des Durchmessers des zylindrischen Apparateils zum Durchmesser des Gaseingangs  $D/D_{in}$  und das Verhältnis des Durchmessers des Gaseingangs zum Partikeldurchmesser  $D_{in}/d_p$* 

Um einen stabilen Strahlschichtzustand in einer konisch-zylindrischen Strahlschicht zu erreichen, muss die Bedingung  $D/D_{in} \times D_{in}/d_p \leq 300$  erfüllt sein (Grace und Lim 2011). Bei den für die Strahlschicht typischen Partikelgrößen ergibt sich somit ein maximaler Durchmesser des zylindrischen Apparateils von etwa 1 m. Dies schränkt die Skalierbarkeit und somit die industrielle Anwendung der konventionellen konisch-zylindrischen Strahlschicht erheblich ein.

(v) *die Feststoffeigenschaften, wie Partikelgröße, Größenverteilung, Dichte und Oberfläche*

Geldart (1973) klassifizierte das Fluidisationsverhalten von Partikeln in Abhängigkeit der Größe und Dichte und unterteilte die Partikel in die Klassen A, B, C und D. Relativ große und schwere Partikel, mit denen stabile Strahlschichtzustände erzielt werden können, sind der Klasse D zuzuordnen. Epstein und Grace (2011) grenzten die Anwendbarkeit der Strahlschicht auf den Größenbereich von  $0,6 - 6 \text{ mm}^1$  und enge Verteilungen der Partikelgröße ein. Wenn eine Strahlschicht mit kohäsiven oder feuchten Partikeln betrieben wird, ist das Auftreten des stabilen Strahlschichtzustands zusätzlich durch interpartikuläre Kohäsionskräfte limitiert. Schneider und Bidgwater (1993) schränkten den Bereich, in dem ein stabiler Strahlschichtzustand erreicht werden kann, durch einen maximal zulässigen Flüssigkeitsgehalt (engl.: maximum spoutable liquid content) ein.

## 1.2 Bauarten der Strahlschicht

Aufgrund der anwendungstechnisch sehr interessanten Strömungsart in einer Strahlschicht und der begrenzten Skalierbarkeit der klassischen konisch-zylindrischen Anlage wurden in vergangenen Jahrzehnten erhebliche Bemühungen bezüglich der Entwicklung von anderen Geometrien des Apparates, mit denen der stabile Strahlschichtzustand erzielt werden kann, vorgenommen.

Die Partikel- und Gasdynamik in den entwickelten Geometrien unterscheiden sich zum Teil vom Verhalten der konisch-zylindrischen Strahlschicht signifikant, sodass die meisten Erkenntnisse, die an der konisch-zylindrischen Geometrie gewonnen wurden, zumindest quantitativ, selten auf andere Geometrien übertragbar sind. Beispielsweise sind Korrelationen, die für die Mindestgeschwindigkeiten für die Initiierung des Strahlschichtzustands  $u_{ms}$  entwickelt wurden (z.B. in Bi 2011), stets geometrieabhängig, d.h. sie sind nur für die untersuchte Strahlschichtgeometrie gültig.

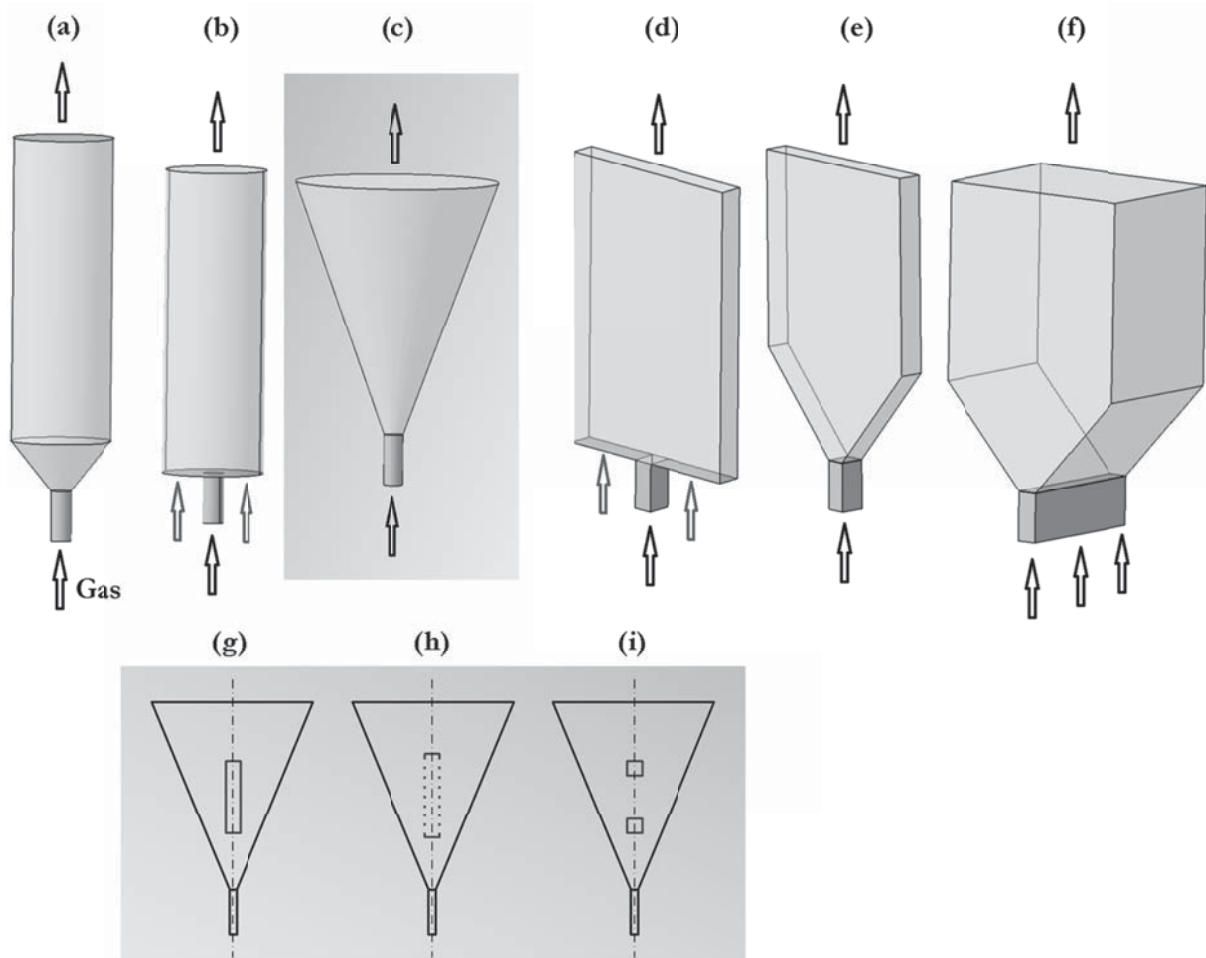
---

<sup>1</sup> Hier ist der stabile Strahlschichtzustand im „dichten“ Strömungsbereich (bei einem substantiell hohen statischen Bett) gemeint. Es liegen einige Berichte für die Anwendung von Strahlschichten im „verdünnten“ Strömungsbereich mit deutlich feineren Partikeln für einige Spezialanwendungen vor. Auf den Strahlschichtzustand im verdünnten Strömungsbereich wird in Kap. 1.3 eingegangen.

Abgesehen vom zirkulierenden Strömungszustand, der logischerweise in jeder Strahlschichtanlage erreichbar sein muss, unterscheiden sich verschiedene Bauarten in den Strömungszuständen, die außerhalb des Existenzbereichs des Strahlschichtzustands auftreten, sowie in der Gasdynamik. Dies begründet unter anderem die hohe Anzahl an Publikationen zum Thema „Strahlschicht“.

Abbildung 1.2 zeigt eine Übersicht von einigen Geometrien, die bereits eine industrielle Anwendung fanden oder noch Gegenstand der Forschung sind. Die abgebildeten Geometrien können in Strahlschichten mit einem Kreis- (Abb. 1.2 a-c) oder mit einem Rechteckquerschnitt (Abb. 1.2 d-f) unterteilt werden. Weiterhin können bei den Geometrien mit einem Rechteckquerschnitt in Abhängigkeit von der Anlagentiefe pseudo-2D- (Abb. 1.2 d, e) und 3D-Anlagen (Abb. 1.2 f) unterschieden werden. Bei den Geometrien mit einem flachen Boden (Abb. 1.2 b, d) entstehen in bodennahen Bereichen sogenannte Totzonen, in denen keine Partikelzirkulation auftritt. Diese Zonen können am einfachsten durch abgeschrägte Wände im unteren Anlagenteil (Abb. 1.2 a, e und f) eliminiert werden. Eine weitere Möglichkeit zur Vermeidung von Totzonen besteht in einer separaten Gaszufuhr durch zusätzliche Siebböden, wie es in Abb. 1.2 (b) für eine vollzylindrische und in Abb. 1.2 (d) für eine pseudo-2D-Anlage anhand von roten Pfeilen schematisch angedeutet wird. Auf diese Weise werden Partikel in den seitlichen dichten Bereichen zusätzlich fluidisiert. Diese Anlagenkonfigurationen werden als Strahl-Wirbelschichten (engl.: spout-fluidized oder spout-fluid beds) bezeichnet (Sutkar 2013a).

Eine weitere Modifizierung der Strahlschichtgeometrie, die sich vorteilhaft auf die Partikelströmung auswirken kann, stellt das Einbringen von internen Einbauten in die Anlage dar. Die am meisten untersuchten Konfigurationen der Einbauten sind verschiedene Steigrohre und -platten. Die Installation von Steigrohren verändert die Strahlschichtdynamik merklich. Das Strömungsmuster, die minimale Gasgeschwindigkeit für die Initiierung des Strahlschichtzustands  $u_{ms}$ , der Betriebsdruckverlust sowie die Verweilzeiten der Partikel und die Verteilung der Gasphase in den verschiedenen Apparatezonen werden beeinflusst (Altzibar u. a. 2013). Das Einbringen von Steigrohren in eine Strahlschicht mit einem Kreisquerschnitt verbessert die Stabilität der Strömung von feinen Partikeln (Hattori und Takeda 1978) und erhöht die maximal zulässige statische Betthöhe (Altzibar u. a. 2013). Die meisten Untersuchungen zum Einfluss von Einbauten wurden bisher an der vollkonischen Anlagenkonfiguration (grau hervorgehoben in Abb. 1.2 c) durchgeführt. In einer vollkonischen Strahlschicht liegt die statische Betthöhe im Gegensatz zu einer klassischen konisch-zylindrischen Strahlschicht stets innerhalb des konischen Anlagenteils. Verschiedene Einbauten, wie Vollmaterial-, poröse und sogenannte offenseitige Steigrohre wurden angewendet (Altzibar u. a. 2008, 2009, 2013, Abb. 1.2 g-i). Ein offenseitiges Steigrohr (engl: open sided draft tube) besteht aus mehreren Ringen, die vertikal übereinander angeordnet sind (Abb. 1.2 i). Eine konische Strahlschicht, die mit einem offenseitigen Steigrohr nachgerüstet wird, eignet sich im Vergleich zu Anlagen mit den anderen Steigrohrkonfigurationen besonders gut für eine intensive Kontaktierung zwischen der Partikel- und der Gasphase.



**Abbildung 1.2:** Bauarten von Strahlschichten: (a) konisch-zylindrisch, (b) vollzylindrisch und (c) vollkonisch; (d) pseudo-2D-Anlage, (e) pseudo-2D-Anlage mit prismatischer Prozesskammer und (f) die 3D-Konfiguration mit einer prismatischen Prozesskammer und einem vertikalen spaltförmigen Gaseingang (engl.: slot-rectangular). Steigrohre in vollkonischen Strahlschichten: (g) Vollmaterialrohr, (h) poröses und (i) offenseitiges Rohr (engl.: open sided draft tube).

Für diese Anordnung wurde z.B. im Vergleich zu der Konfiguration mit einem Vollmaterialrohr eine deutlich verbesserte Trocknungsleistung festgestellt (Altzibar u. a. 2008). Der Grund ist die verbesserte Querströmung der Partikel aus der Ringzone in den Strahlbereich und der Gasphase vom Strahl in die Ringzone. Dies führt zu höheren Feststoffzirkulationsraten und zur besseren Verteilung der Gasphase im Bett.

Das Einsetzen der internen Einbauten in Form von Steigplatten in pseudo-2D und 3D-Betten mit einem Rechteckquerschnitt und einem vertikalen Gaseingang (engl.: slot rectangular) wurde von Kalwar u. a. (189, 1992 und 1993) und Luo u. a. (2004) untersucht. Luo u. a. (2004) berichteten Probleme bezüglich der Strömungsstabilität in dieser Anlagenkonfiguration, betonten aber, dass die Strahlschicht mit einem Rechteckquerschnitt und Steigplatten eine vielversprechende

Konfiguration darstellt. Eine detailliertere Übersicht über die weiteren Untersuchungen zum Einfluss von Steigrohren und -platten kann in Grbavcic u. a. (2011) gefunden werden.

Die prismatische Geometrie, die in dieser Arbeit untersucht wurde, kann der Familie der 3D-Anlagen mit einem Rechteckquerschnitt (engl.: slot-rectangular spouted beds, Abb. 1.2f) zugeordnet werden. In Nachfolgendem wird das Strömungsverhalten dieser Strahlschichtform kurz erläutert.

Wie bereits in Kap. 1.1 erwähnt, müssen für das Erreichen eines stabilen Strahlschichtzustands in der konventionellen konisch-zylindrischen Strahlschicht mehrere Bedingungen erfüllt werden (Grace und Lim 2011), die die Skalierbarkeit und somit die industrielle Anwendung der Strahlschicht erheblich einschränken. Um eine verbesserte Skalierbarkeit der Strahlschicht zu erreichen, schlug Mujumdar (1984) vor, die Anlage nicht mit einem achsensymmetrischen sondern mit einem Rechteckquerschnitt auszuführen. Die Skalierung sollte dann nicht wie bei den Anlagen mit einem Kreisquerschnitt durch eine Vergrößerung des Anlagendurchmessers, sondern durch eine Erhöhung der Apparattiefe bei sonst unveränderten Anlagendimensionen (vergl. Abb. 1.2 e und f) erreicht werden (Mujumdar 1984, Passos u. a. 1993, Kalwar u. a. 1993). Solch eine simple Skalierung dieses Anlagentyps kann allerdings nur dann erreicht werden, wenn sich das Strömungsverhalten der Partikel bei der Vergrößerung der Apparattiefe von einer Anlage kleiner Tiefe (wie eine pseudo-2D-Geometrie in Abb. 1.2e) zu einer Anlage mit einer „substantiellen“ Tiefe nicht signifikant verändert. Dies ist allerdings laut Grace und Lim (2011) nicht immer der Fall. Die Veränderungen im Strömungsverhalten bei einer Erhöhung der Anlagentiefe wurden bei Freitas u. a. (2000) nachgewiesen. Sie untersuchten das Strömungsverhalten in Anlagen mit dem Rechteckquerschnitt und einem vertikalen Gaseingang bei der Erhöhung der Apparattiefe von einem pseudo-2D-Fall bis zu einer Tiefe von 0,1 m. Signifikante Veränderungen im Strömungsverhalten wurden festgestellt: bei der Vergrößerung der Apparattiefe nahm die Mindestgeschwindigkeit für die Initiierung des Strahlschichtzustands  $u_{ms}$  mit der Anlagentiefe im untersuchten Tiefenbereich ab und es traten neue Strömungszustände, die in einer pseudo-2D-Anlage nicht beobachtet wurden, auf.

Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit der Einfluss der Apparattiefe auf das Strömungsverhalten der Partikel in einer prismatischen Strahlschicht, die zwar auch einen Rechteckquerschnitt aber ein unterschiedliches Design des Gaseingangs aufweist, ebenfalls untersucht. Der pseudo-2D-Fall mit einer sehr kleinen Tiefe wurde nicht betrachtet; es wurden Geometrien mit den Tiefen von 0,1 m und 0,2 m miteinander verglichen.

### 1.3 Verdünnte Strahlschicht

Der oben beschriebene Strahlschichtzustand ist ein stabiler Strömungszustand im „dichten“ Strömungsbereich. Das bedeutet, dass bei dieser Strömungsart ausgedehnte Bereiche der Partikelströmung vorliegen, in denen die Volumenfraktion der Gasphase kleiner als ca. 75-80 % ist. In der Abbildung 1.1 fällt eindeutig der Bereich der Ringzone (annulus), wo sich auch im zeitlichen



Mittel die meisten Partikel im Bett aufhalten, in diese Kategorie. Der „dichte“ Strahlschichtzustand ist allerdings nicht der einzige stabile zirkulierende Strömungszustand, der zumindest in einigen der Anlagengeometrien aus Abb. 1.2 nachgewiesen werden konnte.

Diese zweite stabile Strömungsart in einer Strahlschichtanlage unterscheidet sich signifikant vom Zustand, der im Kap. 1.1 erläutert wurde, und kann als eine Strahlschicht im verdünnten Strömungsbereich oder als eine „verdünnte“ Strahlschicht (engl.: dilute spouted bed) bezeichnet werden. Markowski und Kaminski (1983) entdeckten diesen Strömungszustand in einer achsensymmetrischen Anlage und bezeichneten diese Strömungsart als „jet-spouting“. Wie auch im Strahlschichtzustand im dichten Strömungsbereich erfolgt die Partikelbewegung im Zustand der verdünnten Strahlschicht als eine kontinuierliche und gleichmäßige Partikelzirkulation. Die Voraussetzungen zum Entstehen dieser Strömungsart sind kleine Partikelinventare in der Anlage (engl.: shallow beds) und sehr hohe Gasgeschwindigkeiten (höher als  $1,7 u_{ms}$ ). Die verdünnte Strahlschicht weist im Vergleich zum Strahlschichtzustand im dichten Bereich unterschiedliche hydrodynamische Charakteristiken auf (Markowski und Kaminski 1983): Es sind vor allem eine intensivere Partikelbewegung und kurze Zirkulationszyklen von Partikeln in der Anlage (ca. 0,5 s/Zyklus statt ca. 100 s/Zyklus in einem „klassischen“ Strahlschichtzustand) sowie eine sehr hohe Bettexpansion. Die Volumenfraktion der Gasphase ist hoch ( $> 0,85$  nach Markowski und Kaminski 1983 und  $> 0,75$  nach Olazar u. a. 2011). Die einzelnen Strömungsbereiche einer Strahlschicht (spout, fountain und annulus) sind bei einer verdünnten Strahlschicht nicht klar voneinander zu unterscheiden, da alle drei Strömungsbereiche ähnliche Gasvolumenfraktionen aufweisen. Das Auftreten dieses Strömungszustands in einem Apparat mit Rechteckquerschnitt wurde von Dogan u. a. (2000) für eine pseudo-2D-Anlage berichtet. Die Voraussetzungen waren ebenfalls kleine Partikelinventare und Gasgeschwindigkeiten höher als etwa  $2 u_{ms}$ .

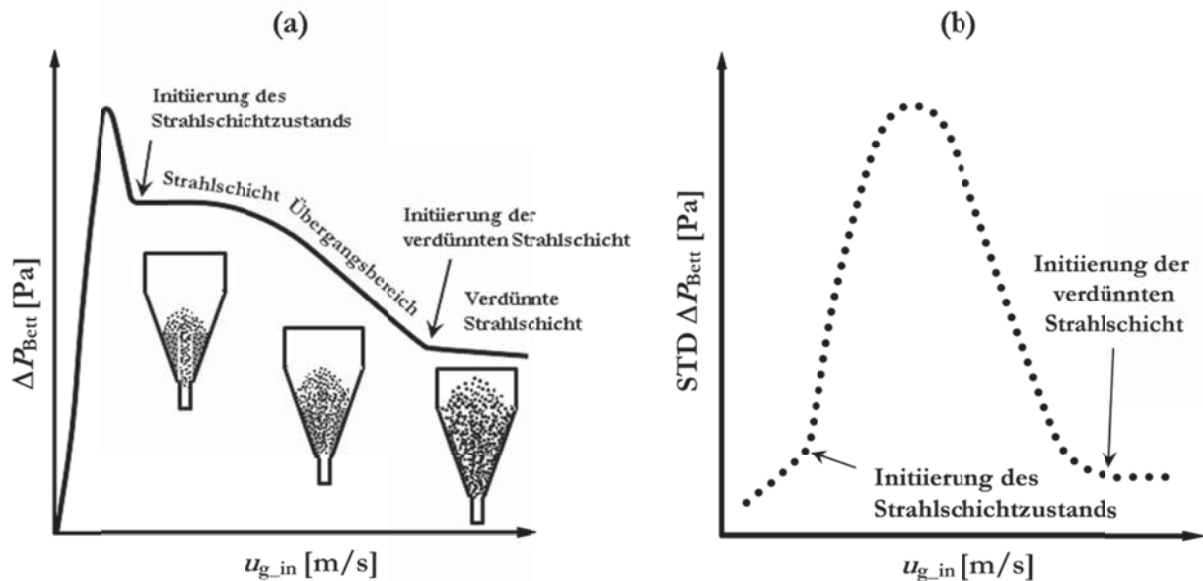
Die verdünnte Strahlschicht eignet sich ebenfalls für die Behandlung von leichten und feinen Partikeln, wenn die Anlage entsprechend konstruiert wird. Alnaif u. a. (2012), Brandt u. a. (2013) und Wolff u. a. (2014) berichten über die Verwendung einer Strahlschicht zur Beschichtung und Granulation von sehr leichten Aerogel-Partikeln sowie von vollkeramischen und vorstrukturierten Keramik-Polymer-Partikeln mit den Korngrößen im  $\mu\text{m}$ -Bereich für pharmazeutische und materialwissenschaftliche Anwendungen. Die dabei verwendeten Strömungszustände können wegen der zirkulierenden Partikelbewegung bei einer sehr hohen Bettausdehnung und hohen Gasvolumenfraktionen der verdünnten Strahlschicht zugeordnet werden.

## 1.4 Fluidodynamik von Strahlschichten

Abbildung 1.3 (a) zeigt schematisch den typischen Verlauf des Druckverlusts der Gasphase in einer vollkonischen Strahlschicht in Abhängigkeit von der Gasgeschwindigkeit nach Olazar u. a. (1992, 2011). Bei kleinen Gasgeschwindigkeiten liegt das Partikelbett im statischen Zustand (Festbett) vor, und der Druckverlust steigt mit der Gasgeschwindigkeit steil an. Bei der Erhöhung der Geschwindigkeiten bildet sich zunächst ein Hohlraum über dem Gaseingang mit einer internen Partikelzirkulation. Wird die Gasgeschwindigkeit weiter erhöht, nimmt der Druckverlust

weiter zu, bis der Hohlraum sich über die ganze Partikelbetthöhe ausdehnt und als ein Gas-Partikel-Strahl das Bett „durchbricht“. Unmittelbar nach diesem Durchbruch nimmt der Druckverlust stark ab, und der Strahlschichtzustand wird initiiert. Auf diese Weise entsteht im Verlauf des Druckverlusts ein hoher Initiierungsspeak, der für alle Strahlschichten typisch ist. Der initiierte Strahlschichtzustand mit seiner typischen kontinuierlichen und gleichmäßigen Partikelzirkulation bleibt allerdings nur in einem begrenzten Bereich der Gasgeschwindigkeit konsistent. Anschließend erfolgt eine Destabilisierung der Partikelströmung; die Partikelströmung verhält sich im Strahlbereich und der Ringzone nach Olazar u. a. (1992) „verworren“ (engl.: confused). Es ist nicht ganz klar, was damit gemeint ist; es kann vermutlich als ein Verlust an Formkonstanz der Strömungsbereiche interpretiert werden. Nach dem Passieren dieses instabilen Übergangsbereichs, wo das Partikelbett sich signifikant ausdehnt und der Druckverlust weiter sinkt, wird der stabile Strömungszustand der verdünnten Strahlschicht erreicht, wo erneut eine gleichmäßige und kontinuierliche Partikelzirkulation erfolgt. Entsprechend der Abbildung 1.3 (a) kann das Partikelbett in einer vollkonischen Strahlschichtanlage in fünf Strömungszuständen vorliegen: das Festbett, der interne Hohlraum, die Strahlschicht, der instabile Übergangszustand sowie die verdünnte Strahlschicht.

Der Verlauf des Druckverlusts in Abhängigkeit von der Gasgeschwindigkeit ist nur eine der typischen Charakteristiken des Drucksignals in Strahlschichten. Die Partikelströmung in Strahl- und Wirbelschichten wird oft durch Fluktuationen des Gasdrucks bzw. der Gasgeschwindigkeit begleitet. Das Drucksignal enthält dadurch viel mehr Informationen über den Strömungszustand, die allerdings entschlüsselt und mit dem vorliegenden Strömungszustand von Partikeln korreliert werden müssen. Das fluktuierende Verhalten der Gasdynamik ist sehr stark im dichten Strömungsbereich ausgeprägt und kann, wenn die für einen Strömungszustand typische Dynamik der Gasphase bekannt ist, oft für eine Identifizierung des vorliegenden Strömungszustands verwendet werden. Als nutzbare Attribute können dabei die Frequenz und die Amplitude der Fluktuationen sowie die Form des Messsignals dienen. Eine potentielle Anwendung dieser Informationen wäre damit das nicht-visuelle Online-Monitoring sowie die Prozesssteuerung und -regelung. Dies wäre insbesondere bei solchen Prozessen von Vorteil, bei denen sich die Eigenschaften von Partikeln, wie z.B. die Größe und die Dichte, während des Prozesses ändern und sich somit, ohne eine entsprechende Anpassung von Prozessparametern, der Strömungszustand von Partikeln mit der Zeit verändern würde. Dies tritt bei einer Vielzahl von Anwendungen, wie z.B. die Beschichtung oder Agglomeration. In der wissenschaftlichen Literatur werden sehr oft Ergebnisse dargestellt, die auf einer visuellen Beobachtung durch transparente Wände eines experimentellen Aufbaus basieren, wobei eine Identifizierung der einzelnen Strömungszustände und eine Abgrenzung der Zustände voneinander deshalb eher subjektiv sind (Freitas u. a. 2004). Außerdem sind die meisten industriellen Anlagen nicht transparent.



**Abbildung 1.3:** Verhalten des Gasdrucks in einer konischen Strahlschicht. (a) Verlauf des Druckverlusts in einer vollkonischen Strahlschicht in Abhängigkeit von Gasgeschwindigkeit und Strömungszustände von Partikeln nach Olazar u. a. (2011); (b) Abhängigkeit der Amplitude der Druckfluktuationen (aufgefasst als Standardabweichung des Drucksignals) und Strömungszustände von Partikeln nach Leu und Pan (2004).

Aus den oben genannten Gründen ist das Verhalten der Druckfluktuationen ein wichtiger Aspekt der Forschung an Strahl- und Wirbelschichten. Einige Abhängigkeiten wurden bereits erkannt. Beispielweise wiesen Leu und Pan (2004) nach, dass in einer konischen Anlage die Amplitude der Druckfluktuationen verwendet werden kann, um die Initiierung des Zustands der verdünnten Strahlschicht zu identifizieren (Abb. 1.3 b). Dafür sollte der Verlauf der Amplitude der Druckfluktuationen in Abhängigkeit von der Gasgeschwindigkeit betrachtet werden. Als Maß für die Amplitude wurde in der Arbeit von Leu und Pan (2004) die Standardabweichung des Messsignals verwendet. Die Initiierung der verdünnten Strahlschicht war mit einer signifikanten Abnahme dieses Wertes verknüpft.

Im dichten Strömungsbereich verwendeten Freitas u. a. (2004), Liu u. a. (2008), Chen (2008), Piskova und Mörl (2008) die schnelle Fourier-Transformation<sup>2</sup> (engl.: Fast Fourier Transform, FFT) des Druckverlustsignals für die Identifizierung der Strömungszustände in Strahlschichten mit einem Rechteckquerschnitt. Freitas u. a. (2004) berichteten für eine Anlage mit dem Rechteckquerschnitt und einem vertikalen Gaseingang (engl.: slot rectangular spouted bed), dass beim Strahlschichtzustand im dichten Strömungsbereich periodische Druckfluktuationen mit einer Frequenz im Bereich 5-7,5 Hz das Frequenzspektrum dominieren.

Neben der Analyse von Frequenzen und Amplituden wurden auf die Drucksignale aus den Wirbel- und Strahlschichten mehrere Methoden auf der Basis der deterministischen Chaostheorie (DCT) angewandt. Van der Bleek und Schouten (1993) schlugen eine Anwendung von DCT-

<sup>2</sup> Weitere Informationen sind in Kap. 2.4.1 zu finden.