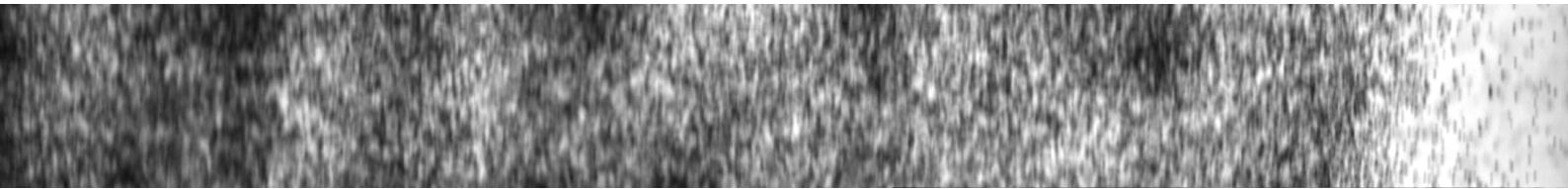


Experimentelle Untersuchung eines Vorhangs aus frei fallenden Partikeln zur Absorption von konzentrierter Solarstrahlung

vorgelegt als Bachelor-Thesis
beim Lehr- und Forschungsgebiet Solartechnik der RWTH Aachen
am 22. September 2011



Name: Alexander Rubbert
Matrikelnummer: 282143
Erstprüfer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Pitz-Paal
Betreuer und Zweitprüfer: Dipl.-Phys. Birgit Gobereit



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Motivation	5
1.2	Einführung in die Solarthermie	6
1.2.1	Stand der Technik	6
1.2.2	Entwicklungstrends	8
1.2.3	Potenzial der Partikeltechnologie	9
1.3	Problemdefinition	11
1.4	Zielsetzung	12
2	Versuchsaufbau	13
2.1	Verwendete Partikel	13
2.2	Komponenten	13
2.3	Messtechnik	14
3	Auswertung	17
3.1	Eingangsdaten	17
3.2	Massenstrombestimmung	20
3.3	Grundlagen der Particle Image Velocimetry	20
3.4	Implementierung PIV	23
3.5	Anwendung der PIV	25
3.6	Fehlerabschätzung	27
4	Ergebnisse	29
4.1	Auswahl der Ergebnisse	29
4.2	Geschwindigkeiten	30
4.2.1	Spaltbreite 9 mm - $\dot{m}'_1$	30
4.2.2	Spaltbreite 13 mm - $\dot{m}'_2$	31
4.2.3	Spaltbreite 17 mm - $\dot{m}'_3$	31
4.2.4	Spaltbreite 22,5 mm - $\dot{m}'_4$	31
4.3	Transmission	45
4.4	Diskussion	50
4.5	Massenstromeinfluss	52
5	Zusammenfassung und Ausblick	56
A	Herstellerangaben zu verwendeten Partikeln	58
B	Siloabmaße	59

Abbildungsverzeichnis

1.1	Prinzipdarstellung einer zweikreisigen Parabolrinnenanlage	7
1.2	Prinzipdarstellung eines solarthermischen Turmkraftwerks mit Direktverdampfung	7
1.3	Prinzipdarstellung der Luftströme	11
2.1	Silo mit Dosiereinheit	13
2.2	Messaufbau	14
2.3	Lastkurven der Wägezellen mit und ohne Grundlast	15
2.4	Verschaltung der Messtechnik	16
3.1	Beispiel eines Bildpaares	17
3.2	Aufbau der Protokolldatei	18
3.3	Massenstromdichte, Sichtbarkeit und Beobachtungswahrscheinlichkeit über die Bildtiefe	20
3.4	Schema Kreuzkorrelation	21
3.5	Ein beispielhaftes Korrelationsfeld	22
3.6	Beispielhaftes Histogramm	25
3.7	Interpolation von Fehlkorrelationen (grün dargestellt)	26
3.8	Strahlengang und Lage der Kalibrations- bzw. Fallfilmebenen	27
4.1	Gewichts- und geglättete Massenstromkurve	29
4.2	Typische Einzelprofile bei $\dot{m}'_1$	33
4.3	Instationäres Verhalten bei $\dot{m}'_1$	34
4.4	Mittleres Profil bei $\dot{m}'_1$	35
4.5	Typische Einzelprofile bei $\dot{m}'_2$	36
4.6	Instationäres Verhalten bei $\dot{m}'_2$	37
4.7	Mittleres Profil bei $\dot{m}'_2$	38
4.8	Typische Einzelprofile bei $\dot{m}'_3$	39
4.9	Instationäres Verhalten bei $\dot{m}'_3$	40
4.10	Mittleres Profil bei $\dot{m}'_3$	41
4.11	Typische Einzelprofile bei $\dot{m}'_4$	42
4.12	Instationäres Verhalten bei $\dot{m}'_4$	43
4.13	Mittleres Profil bei $\dot{m}'_4$	44
4.14	Strahlenbildung bei $\dot{m}'_3$ und 4m Fallhöhe	45
4.15	Mittlere Transmission bei $\dot{m}'_1$	46
4.16	Mittlere Transmission bei $\dot{m}'_2$	47
4.17	Mittlere Transmission bei $\dot{m}'_3$	48
4.18	Mittlere Transmission bei $\dot{m}'_4$	49
4.19	Gegenüberstellung eines Realbildes und der zugehörigen Geschwindigkeitsauswertung	51
4.20	Vergleich zweier Weißbilder	52
4.21	Mittlere Geschwindigkeit über die Fallhöhe	53
4.22	Mittlere Geschwindigkeit über den Massenstrom	53
4.23	Geschwindigkeit im Zentrum über die Fallhöhe	53
4.24	Zentrale Geschwindigkeit über den Massenstrom	54

4.25	Maximalgeschwindigkeit über die Fallhöhe	54
4.26	Maximale Geschwindigkeit über den Massenstrom	54

Tabellenverzeichnis

1.1	Beispielhafte Aufführung aktuell betriebener Anlagen	8
1.2	Überblick über gängige Wärmeträgermedien	10

1. Einleitung

1.1. Motivation

Vor dem Hintergrund des wachsenden Energiebedarfs und gleichzeitig steigender Kosten für konventionelle Energieträger findet seit einigen Jahren ein Umdenken in der Gesellschaft statt. Erstmals seit der Industrialisierung ist ein einfaches Verbrennen von kostbaren Rohstoffen kein probates Mittel mehr, um den Energiebedarf zu decken. Zusätzlich führen ökologische Bedenken in Hinblick auf den stattfindenden Klimawandel und Ausstoß von Schadstoffen dazu, dass die Suche nach alternativer Energiegewinnung eine der zentralen Aufgaben unserer Zeit darstellt. Die Lösung dieser Problematik wird durch verstärkte Anstrengungen im Bereich der nachhaltigen und regenerativen Energiegewinnung angestrebt. Neben Windkraft, Wasserkraft, Photovoltaik, Biomasse und einigen anderen Konzepten zählt auch die Solarthermie zu diesen Technologien. Diese zeichnen sich durch schadstofffreie bzw. -neutrale Arbeitsweise und die Nutzung nachwachsender oder nahezu unendlich verfügbarer Energiequellen wie Wind oder Sonneneinstrahlung aus.

Die Umstellung auf nachhaltige Energienutzung birgt jedoch Probleme. Insbesondere die Verfügbarkeit zu jedem gewünschten Zeitpunkt lässt sich häufig nur durch verlustbehaftete und teure Speicher bewerkstelligen. Die Machbarkeit einer Umstellung auf nachhaltige Energienutzung ist möglich, aber die Wirtschaftlichkeit stellt ein Hemmnis dar. Verschiedene Szenarien zur vollständigen Umstellung auf regenerative Energieversorgung wurden durch verschiedene Studien am DLR näher untersucht. In einer aktuellen Studie zeigt sich, dass der maßgebliche Einfluss auf die Auswahl der zu verwendenden Technologien die Preisentwicklung in den kommenden Jahrzehnten ist. Unter entsprechenden politischen Rahmenbedingungen sowie durch technische Entwicklung ist eine vollständig regenerative Versorgung jedoch bis 2050 machbar. Dabei kann Solarthermie einen Beitrag von bis zu 20% leisten [Sch10]. Auch das European Renewable Energie Council prognostiziert der Solarthermie ein kontinuierliches Wachstum von jährlich über 30% bis 2020 [Cou10].

Voraussetzung für das Erreichen dieser Ziele ist kontinuierliche Weiterentwicklung der Technologien um die Wirtschaftlichkeit zu sichern, einen effizienten Betrieb zu erreichen und eine einfache Umsetzung zu ermöglichen. Einen möglichen Schritt in diese Richtung stellt die Partikeltechnologie dar. Diese vielversprechende Technologie befindet sich in einem frühen Entwicklungsstadium. Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Methode entwickelt und getestet werden, um frei fallende Partikelvorhänge zu untersuchen, auf die nachfolgende Entwicklungen aufbauen können.

1.2. Einführung in die Solarthermie

1.2.1. Stand der Technik

In solarthermischen Kraftwerken wird durch Spiegelflächen eine Bündelung der einfallenden Sonnenstrahlung erreicht. Ein Receiver dient dazu, die konzentrierte Strahlung in nutzbare Prozesswärme umzusetzen. Die so entstandene Prozesswärme kann dann im Kraftwerksblock durch einen weitgehend konventionellen Kraftwerksprozess in Strom und Abwärme umgesetzt. Einzig der Dampferzeuger und Überhitzer weichen hierbei signifikant von aus konventionellen Kraftwerken bekannten Komponenten ab, da die Aufheizung nicht mehr durch Verfeuerung von fossilen Brennstoffen erfolgt. Daher kann bei vielen Komponenten auf bereits verfügbare Technologien und Erfahrungen zurückgegriffen und diese gegebenenfalls adaptiert werden.

Bei solarthermischen Anlagen unterscheidet man hauptsächlich zwischen linienbeziehungsweise punktfokussierenden Systemen. Dabei erreichen punktfokussierende Systeme deutlich höhere Konzentrationsverhältnisse, wodurch sie für den Einsatz bei hohen Betriebstemperaturen gut geeignet sind. Zudem unterscheidet man zwischen Anlagen mit einem beziehungsweise zwei Wärmekreisläufen. Während Anlagen mit einem Wärmekreislauf z.B. Dampf direkt im Receiver erzeugen und auf die gewünschte Temperatur aufheizen, wird die Wärme bei zweikreisigen Anlagen zuerst im Primärkreis durch ein Wärmeträgerfluid im Receiver aufgenommen und dann durch einen Wärmetauscher dem Kraftwerksprozess zugeführt. Dabei weisen beide Umsetzungen Vor- und Nachteile auf. In direktverdampfenden Anlagen werden Kosten durch das Einsparen eines Wärmetauschers und die damit verbundenen Exergieverluste eingespart. Zweikreisige Anlagen haben hingegen durch verwendete Wärmeträgermedien im Primärkreis Vorteile bei der Speicherung von Wärme und umgehen einen technisch herausfordernden Phasenwechsel im Receiver.

Parabolrinnenanlagen zählen zu den linienfokussierenden Systemen. Sie konzentrieren die solare Einstrahlung auf ein Receiverrohr in der Fokuslinie der Parabolspiegel. Bei Turmkraftwerken dient ein Feld zweiachsig nachgeführter Spiegelflächen - den Heliostaten - zur Umlenkung der Strahlung auf die Spitze eines Turmes, wo sich der Receiver befindet. Andere Bauarten wie Fresnelsysteme oder Stirling-Dish-Systeme haben bisher keine vergleichbare Verbreitung erreicht.

Abbildung 1.1 zeigt ein Schema einer Parabolrinnenanlage mit nur einem Wärmekreislauf. In Abbildung 1.2 ist ein Schema eines Turmkraftwerks mit zwei Wärmekreisläufen abgebildet.

Solarthermische Anlagen tragen bereits heute zur Stromversorgung bei. Dabei findet sich ein Großteil der installierten Leistung in den Vereinigten Staaten und Südsanien. Einige Anlagen werden in Tabelle 1.1 beispielhaft aufgeführt.

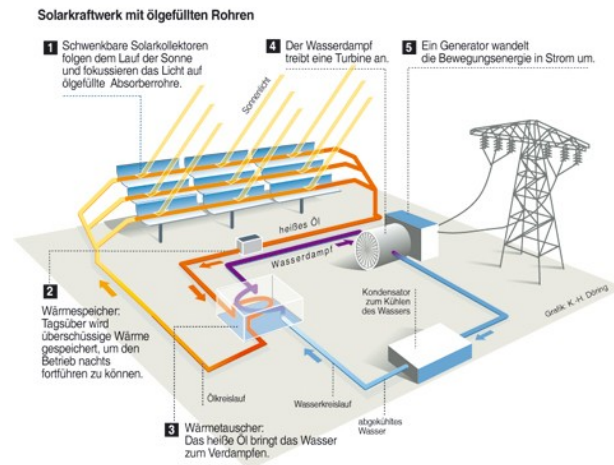


Abbildung 1.1: Prinzipdarstellung einer zweikreisigen Parabolrinnenanlage

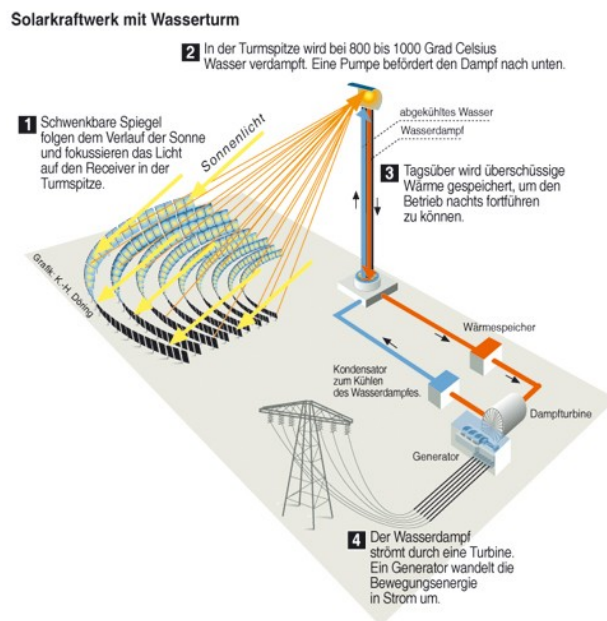


Abbildung 1.2: Prinzipdarstellung eines solarthermischen Turmkraftwerks mit Direktverdampfung

Name	Standort	Baujahr	Verschaltung	Bauart	Auslegungslast
SEGS 1 bis 9	Kalifornien	1984 - 1990	Zweikreisig, Thermoöl, Dampf	Parabolrinne	zsm. 354 MW
Nevada Solar One	Boulder City, Nevada	2007	Zweikreisig, Thermoöl, Dampf	Parabolrinne	64 MW
Andasol I und II	Andalusien, Spanien	2008/2009	Zweikreisig, Thermoöl	Parabolrinne	je 50 MW
PS10 und PS20	Sevilla, Spanien	2007	direkte Verdampfung	Turm	11 MW bzw. 20 MW
Gemasolar	Sevilla, Spanien	2011	Zweikreisig, Salz, Dampf	Turm	19,9 MW

Tabelle 1.1: Beispielhafte Aufführung aktuell betriebener Anlagen

1.2.2. Entwicklungstrends

Die Entwicklung solarthermischer Kraftwerke orientiert sich maßgeblich an einigen Zielgrößen. Dazu gehören das Erhöhen der oberen Prozesstemperatur, die Verminderung von Verlusten und die Verbesserung der Speichermöglichkeiten.

Die obere Prozesstemperatur ist dabei einer der Parameter, die großen Einfluss auf den Wirkungsgrad des Kraftwerksprozesses und somit der Gesamtanlage haben. Gleichzeitig erlaubt eine Steigerung der erreichbaren Temperaturen die Einkopplung der solaren Wärme in den Gasturbinenprozess. Ein aktueller Ansatz ist das (teil-)solare Betreiben einer Gasturbine. Dieser wird zum Beispiel durch das EU-geförderte SOLUGAS-Projekt und einige andere Projekte verfolgt [GB09].

Mit steigender Prozesstemperatur entsteht gleichzeitig die Notwendigkeit, Receiver und Wärmetauscher für solche Temperaturen zu entwickeln. Die Verwendung bereits bekannter Konzepte könnte dazu führen, dass der im Kraftwerksprozess gewonnene Wirkungsgrad durch mit der Temperatur steigende Abstrahl- und Konvektionsverluste wieder eingebüßt wird. Die Bewertung neuer Entwicklungen kann daher nicht komponentenweise erfolgen. Sie muss daher immer das gesamte System betrachten.

Einen weiteren Bereich der Entwicklung stellt der Wärmespeicher für solarthermische Anlagen dar. Bei der Solarthermie können die Stromgestehungskosten durch das Einbinden eines Wärmespeichers gesenkt und gleichzeitig die Verfügbarkeit einer

Anlage gesteigert werden. Zurückzuführen ist dieser Sachverhalt darauf, dass der Kraftwerksprozess bei entsprechender Auslegung des Heliostatenfelds und Speichers länger mit Nennlast betrieben und somit besser ausgenutzt werden kann [Let08]. Diesen Vorteil durch gesteigerte Kapazitäten und geringere Kosten mittels verschiedenster Ansätze wie zum Beispiel Latent-Speichern oder thermochemischen Speichern weiter auszubauen, stellt einen weiteren Schwerpunkt in der Entwicklung solarthermischer Anlagen dar.

Nicht zuletzt findet auch die Fortentwicklung der Heliostaten statt. Da die direkten Investitionskosten für eine solarthermische Anlage bis zu 50 % auf das Heliostatenfeld entfallen [VK10], birgt auch diese Entwicklung großes Verbesserungspotenzial. Herausforderungen in diesem Bereich stellen Formgenauigkeit der Spiegelfläche, Windlasten und präzise Nachführung dar. Aufgrund des großen Anteils an der Investitionssumme ist diese Entwicklung besonders kostensensibel.

Insgesamt dienen alle vorgestellten Entwicklungen letztendlich der Senkung der Stromgestehungskosten und damit zur Steigerung der Konkurrenzfähigkeit der Solarthermie auf dem Strommarkt. Während steigende Wirkungsgrade bei konventionellen Kraftwerken schon allein durch geminderte Brennstoffkosten häufig zu großen Einsparungen führen, muss in der Solarthermie abgewogen werden. Da keine Brennstoffkosten entstehen, wird auf diesem Wege auch keine Einsparung erfolgen. Eine Wirkungsgradsteigerung führt aber dazu, dass mehr Energie mit der betrachteten Anlage gewonnen werden kann und die spezifischen Investitionskosten sinken. Eine effizientere aber zugleich teurere Prozessführung im Kraftwerksblock kann trotzdem zu Einsparungen führen, wenn dadurch für die gleiche elektrische Leistung ein kleineres Heliostatenfeld benötigt wird.

1.2.3. Potenzial der Partikeltechnologie

Bei der Partikeltechnologie übernehmen Feststoffpartikel die Funktion des Wärmeträgermediums in der solarthermischen Anlage. Keramische Partikel können aufgrund ihrer hohen Temperaturfestigkeit und ihrer Verfügbarkeit im industriellen Maßstab als Wärmeträgermedium verwendet werden. Bei erfolgreicher Umsetzung erhofft man sich verschiedenste Verbesserungen im Vergleich zu Anlagen mit anderen Wärmeträgermedien. Eine Übersicht über momentan verwendete Wärmeträger wird in Tabelle 1.2 gegeben.

Einen maßgeblicher Vorteil bei der Verwendung von keramischen Partikeln als Wärmeträger stellt die hohe zu erreichende Temperatur dar. Diese Eigenschaft eröffnet neue Möglichkeiten beim Einsatz keramischer Partikel in solarthermischen Anlagen. So können durch die hohen Temperaturen effizientere Dampfprozesse betrieben werden oder alternativ Gas- oder Kombiprozesse, die deutlich höhere Temperaturniveaus erfordern, zum Einsatz kommen. Insbesondere die Möglichkeit der Einkopplung der solaren Wärme in den Gasprozess ist hier von Interesse, da dieser keinen Kondensator benötigt und somit den Bedarf für Kühlwasser oder ineffiziente Trockenkühlungen umgeht.

Gleichzeitig ist die hohe erreichbare Temperatur von großem Vorteil für

Typ	Temperaturbeständigkeit	Speicherbarkeit
Thermoöle	bis ca. 400°C	Einfache Handhabung, in Tanks speicherbar
Flüssigsalze	bis ca. 560°C	Hohe spez. Wärmekapazität, Gefahr des Einfrierens
Direktverdampfung	—	Hohe Drücke nötig
Luft	—	Wärmeübergang in Feststoffspeicher nötig

Tabelle 1.2: Überblick über gängige Wärmeträgermedien

Wärmespeicher in solarthermischen Anlagen. Mit ihr lässt sich der Temperaturhub zwischen dem kalten Rückstrom und dem warmen Zustrom des Wärmeträgers in den Speicher deutlich steigern. Die Folge ist eine höhere massenspezifische Kapazität des Speichers. Es wird also eine geringere Menge des Wärmeträgers zur Speicherung der gleichen Wärmemenge benötigt, wodurch die spezifischen Speicherkosten sinken. Dadurch lassen sich so größere Kapazitäten realisieren, die die Verfügbarkeit des Kraftwerks verbessern. Wie bereits in Kapitel 1.2.2 beschrieben hat allein diese Kapazitätserhöhung das Potenzial zur Senkung der Stromgestehungskosten solarthermischer Anlagen.

Ein weiterer Vorteil beim Einsatz von Partikeln als Wärmeträger liegt in der Möglichkeit Direktkontaktwärmetauscher zur Übertragung der solaren Wärme in den Kraftwerksprozess einzusetzen. Dabei werden die aufgeheizten Partikel direkt durch das Arbeitsfluid des Kraftwerksblocks umströmt. Die große entstehende Kontaktfläche und das Fehlen einer Abgrenzung mit begrenzter Wärmeleitfähigkeit zwischen dem Fluid und den Partikeln führen zu einer deutlich effektiveren Wärmeübertragung bei geringeren Temperaturdifferenzen, sodass solche Wärmetauscher kleiner und preiswerter dimensioniert werden könnten.

Ähnlich verhält es sich im Receiver. Durch den Einsatz von Partikeln wird hier die direkte Absorption ohne ummantelndes Rohr möglich. Aufgrund großer Konzentrationsfaktoren in Turmanlagen müssen Receiver hohen Strahlungsflussdichten und damit verbundenen hohen Temperaturen standhalten. Es stellt sich ein starker Temperaturgradient zwischen der Außen- und Innenseite des Rohrs ein. Diese Übertemperatur führt gemäß des Stefan-Boltzmann-Gesetzes zu Abstrahlverlusten und skaliert mit der Temperatur in der vierten Potenz.

1.3. Problemdefinition

Um einen Partikelfallfilm zur Absorption von konzentrierter solarer Strahlung optimieren zu können, werden Erkenntnisse über seine Beschaffenheit benötigt. Dabei stellen lokal aufgelöste Geschwindigkeiten und Transmissionseigenschaften den Hauptinformationsbedarf dar. Mit Hilfe dieser Daten kann der Fallfilm optimiert werden, um einen zu bestrahlenden Bereich des Fallfilms auszuwählen, sodass die eintreffende Strahlung möglichst vollständig absorbiert wird und die geforderten Partikeltemperaturen erreicht werden.

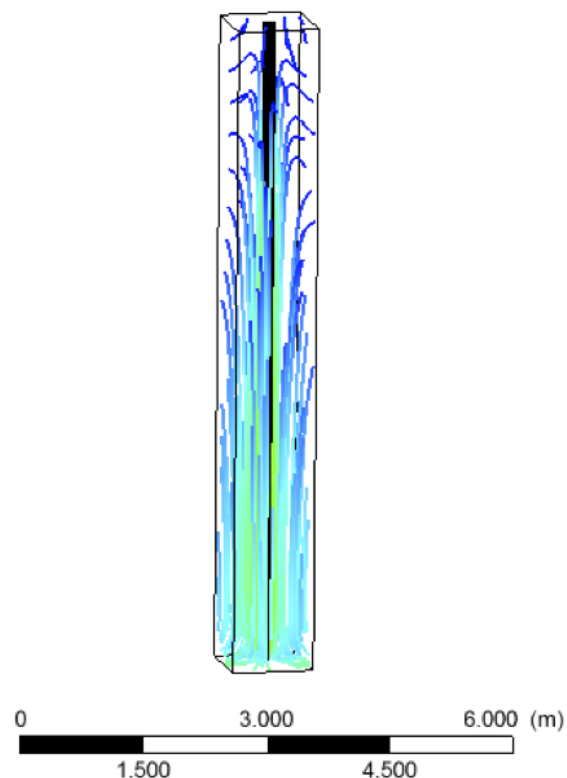


Abbildung 1.3: Prinzipdarstellung der Luftströme

Der zu untersuchende Fallfilm ist durch die Überlagerung verschiedener Phänomene beeinflusst, die sein Verhalten bestimmen. Zunächst handelt es sich um eine Zwei-Phasen-Strömung aus den Partikeln und der Luft als Umgebungsmedium. Im Gegensatz zu in Luft fallenden Einzelpartikeln kann das Medium hierbei nicht als bewegungslos angenommen und dabei vernachlässigt werden, dass nicht nur der

betrachtete Partikel einen Widerstand erfährt, sondern der Widerstand gleichermaßen in entgegengesetzter Richtung auf das umgebende Medium wirkt. Die fallenden Partikel verursachen also eine Beschleunigung des umgebenden Mediums. Da die Widerstandskraft von der Differenzgeschwindigkeit zwischen Partikel und Medium abhängt, hat die durch den Fallfilm verursachte Luftströmung einen maßgeblichen Einfluss auf die Eigenschaften des ausgebildeten Fallfilms. Für einzelne, kugelförmige Körper existieren empirische Erkenntnisse über Widerstandskoeffizienten. Für Partikelgruppen müsste ein Nachweis erst erbracht oder ein alternativer Zusammenhang nachgewiesen werden. Einen Kritikpunkt stellt die fehlende Berücksichtigung von Effekten wie Windschatten dar. Gleichmaßen kann das Umgebungsmedium selbst in mitbewegten Bezugssystemen nicht mehr als ruhend betrachtet werden. Es wird eine gewisse Turbulenz durch vorher passierende Partikel erfahren haben.

Außerhalb des Fallfilms wird die Umgebungsluft nicht durch fallende Partikel beschleunigt. Daher ist im Randbereich des Fallfilms eine Scherschicht zu erwarten. Dort entstehende Schubspannungen führen zu einem nach außen abfallenden Geschwindigkeitsprofil des Luftstroms. Da das Geschwindigkeitsprofil des Partikelstroms maßgeblich durch den sich ausbildenden Luftstrom beeinflusst wird, ist ein ähnliches Verhalten des Partikelstroms zu erwarten.

Neben der reinen Interaktion zwischen Partikel- bzw. Umgebungsphase kommt hinzu, dass die Partikel in Form von Kollisionen auch untereinander interagieren. Die erhöhte Kollisionswahrscheinlichkeit in Bereichen mit hoher Partikeldichte wird zu einer Streuung der Partikel führen.

Insgesamt gestaltet sich die Modellierung eines Fallfilms daher äußerst schwierig. Ohne Vergleichsdaten lässt sich keine Aussage über die Qualität der Voraussage treffen. Zur Entwicklung eines Fallfilmreceivers ist es jedoch wünschenswert, die relevanten Eigenschaften des Fallfilms vorhersagen zu können.

1.4. Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, die Erkenntnisse über Eigenschaften von Partikelfallfilmen voranzutreiben. Dabei sollen durch experimentelle Untersuchungen Geschwindigkeitsprofile (vgl. Kapitel 4.2) und Transmissionswerte (vgl. Kapitel 4.3) anhand von optischen Messungen ermittelt werden. Dazu soll ein Prüfstand konzipiert, konstruiert und aufgebaut werden. Der entstandene Prüfstand soll dann zur Untersuchung des Fallfilms dienen. Während der Untersuchungen sollen sowohl Fallhöhe als auch Partikelmassenstrom variiert werden.

Die gewonnenen Daten sollen als Referenzfall für numerische Simulationen solcher Fallfilme dienen und bei der Bewertung beziehungsweise Validierung der Modellierung Verwendung finden können. Gleichzeitig soll der Versuchsaufbau Erfahrungen im Umgang mit Partikeln einbringen. Eine abschließende Bewertung der Messmethodik anhand einer Diskussion der Ergebnisse soll abgegeben und mögliche Maßnahmen zur Verbesserung der Messdaten und Folgeuntersuchungen durch die gesammelten Erfahrungen vorgeschlagen werden.

2. Versuchsaufbau

2.1. Verwendete Partikel

Die vorgenommene Untersuchung beschränkt sich auf einen Partikeltyp. Es kommen Partikel aus Bauxit von Saint Gobain mit einem mittleren Durchmesser von 0,458 mm und einer Schüttdichte von $2,02 \frac{t}{m^3}$ zum Einsatz. Ihre guten Absorptionseigenschaften und hohe Temperaturfestigkeit qualifizieren sie für einen eventuellen späteren Einsatz in Partikelreivern, sodass ihre Untersuchung ein möglichst wirklichkeitsnahes Ergebnis erwarten lässt. Ein Auszug aus den Herstellerangaben kann ich Anhang A gefunden werden.

2.2. Komponenten

Der Prüfstand besteht aus drei Hauptkomponenten. Diese wurden auf einem handelsüblichen Bausgerüst der Firma Layher montiert, sodass eine Fallhöhe von 8m realisiert werden konnte. Die oberste Position nimmt im Versuchsaufbau das Vorhaltesilo ein. Das Silo besteht aus verschweißten PE-Platten und wurde von der Firma Aricon gefertigt. Es kann bis zu 200 kg der zu untersuchenden Partikel fassen, sodass auch bei hohen Massenströmen eine ausreichende Versuchsdauer gewährleistet ist.

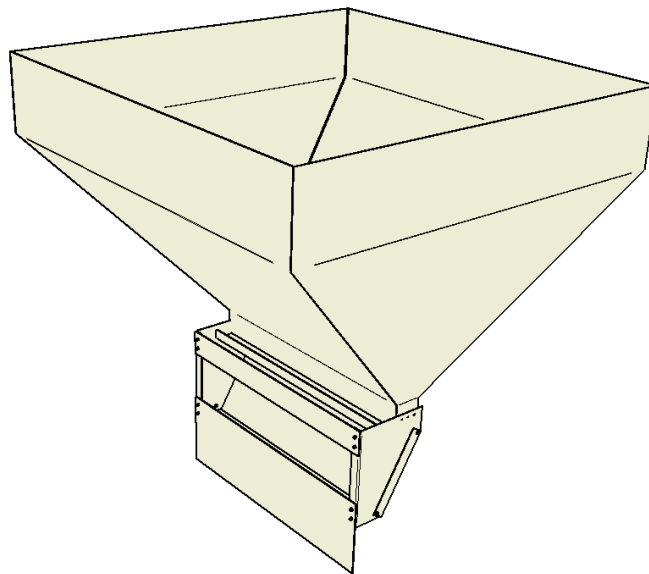


Abbildung 2.1: Silo mit Dosiereinheit

Es verfügt über einen 0,5 m breiten Auslaufspalt. Detaillierte Abmaße finden sich in

Anhang B. Mittels eines Schiebers lassen sich verschiedene Spaltbreiten einstellen, um den auslaufenden Massenstrom zu regulieren. Ein verstellbarer Anschlag sorgt dafür, dass gewünschte Spaltbreiten voreingestellt werden können. Während der ursprüngliche Entwurf eine schräge Ebene samt Prallplatte unterhalb des Silos vorsah, um den Fallfilm zu homogenisieren [Bar94], wurde diese für die durchgeführten Versuche wieder entfernt, da sie dem Fallfilm eine große Horizontalgeschwindigkeit aufprägte und zu nicht tolerabler Streuung führte. Durch drei Wägezellen, auf denen das Silo gelagert wird, kann das Silogewicht überwacht und aufgezeichnet werden.

Am Boden des Gerüsts wird der Fallfilm aufgefangen. Dazu dient ein aufgespannter Big Bag. Aufgrund des hohen Füllgewichts des Silos, wird der Big Bag auf einem Wagen aufgespannt, sodass die aufgefangenen Partikel leichter zu handhaben sind.

Die Aufnahme der Messdaten erfolgt auf der Messebene. Diese ist in Schritten von 0,5m auf der gesamten Fallhöhe montierbar. Auf der Messebene werden eine High Speed Kamera und ein LED-Leuchtfeld montiert. Das LED-Feld ist dabei der Kamera gegenüber angeordnet. Während eines Versuchs fällt der Fallfilm zwischen dem Leuchtfeld und der Kamera herab, sodass er vom vom Leuchtfeld durchstrahlt wird. Dadurch sind Partikelstrukturen im Fallfilm auf den Aufnahmen der Kamera gut zu erkennen.

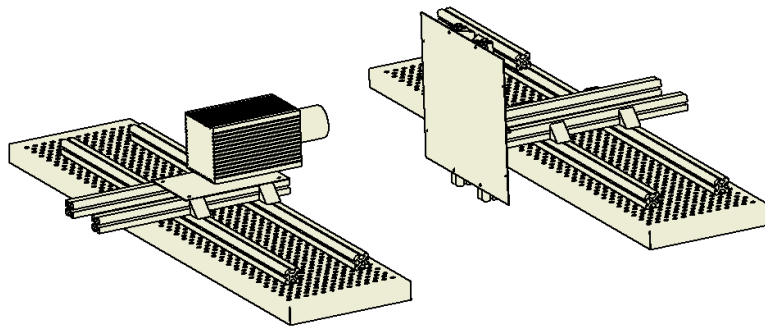
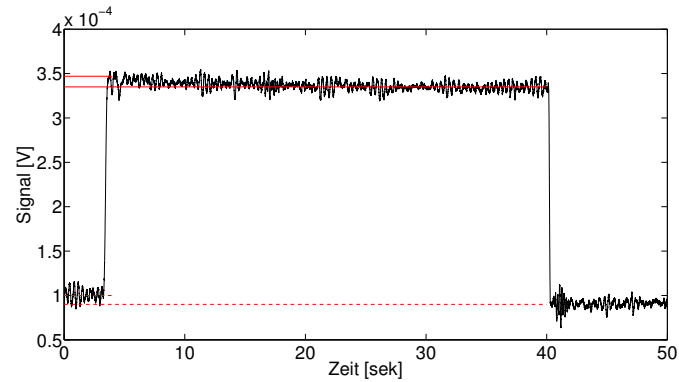


Abbildung 2.2: Messaufbau

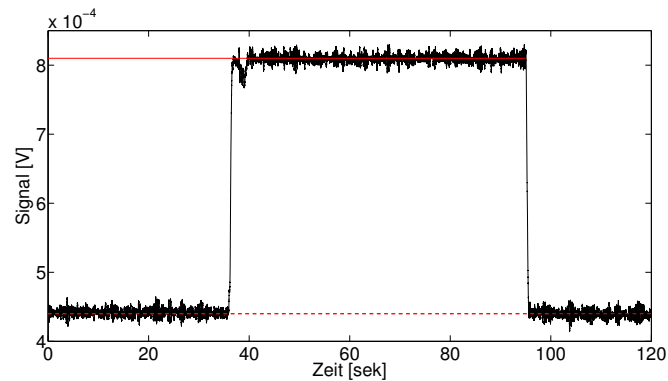
Die Rückförderung der Partikel nach dem Versuch erfolgt durch einen Kettenzug. Dabei wird der gefüllte Big Bag an Trageschlaufen eingehängt und wieder auf die Siloebene befördert. Ein Auslauf am Boden des Big Bags erleichtert das Befüllen des Silos.

2.3. Messtechnik

Zur Messung des Silogewichts kommen drei Wägezellen des Typs KM38 von ME-Systeme zum Einsatz. Sie werden mit einer Spannung von 10V gespeist. Zwei der Zellen sind dabei für eine Nennlast von 1000N ausgelegt. Aufgrund der Lastverteilung auf die Zellen wurde



(a) keine Grundlast



(b) 2,5kg Grundlast

Abbildung 2.3: Lastkurven der Wägezellen mit und ohne Grundlast

die dritte Zelle mit einer Nennlast von 2000N ausgewählt. Die Wägezellen zeigen bei einer Entlastung auf Nulllast kein fixes Nullsignal. Verbleibt aber eine Restlast, so stellt sich ein fixes Basissignal für diese Grundlast ein, sodass entsprechende Empfindlichkeiten ermittelt werden konnten. Plots der aufgezeichneten Signale einer Wägezelle bei Be- bzw. Entlastung findet sich in Abbildung 2.3.

Die Signale der Wägezellen wurden durch eine AD-Wandlerkarte des Typs NI-6220 erfasst und durch ein in LabVIEW implementiertes Programm aufgezeichnet. Dabei wurden nur Rohdaten protokolliert. Die weitere Auswertung der Daten erfolgte nicht während des Versuchs. Neben der Aufzeichnung der Wägezellensignale diente die Software auch zur Ansteuerung der Kamera. Eingesetzt wurde eine Motion Pro Y-5 der Firma IDT. Daher war es möglich, nicht kontinuierlich aufzunehmen sondern einen Auslöserhythmus vorzugeben. Es wurden immer zwei Bilder in schneller Abfolge mit einer Auslösefrequenz von 3000 Hz aufgenommen. Nach der Erfassung eines solchen Bildpaares wurde die Aufnahme für eine konfigurierbare Dauer ausgesetzt. Diese

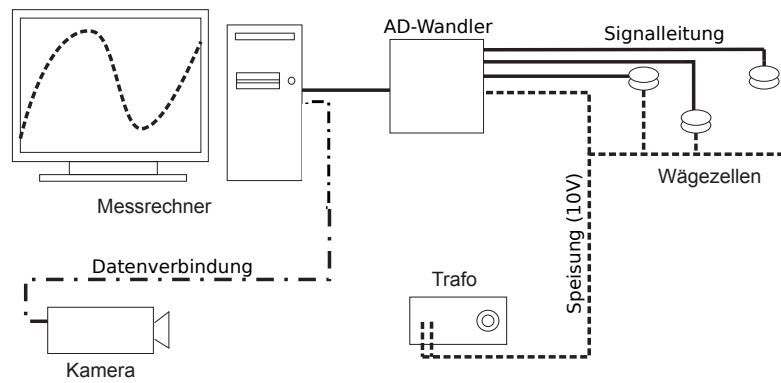


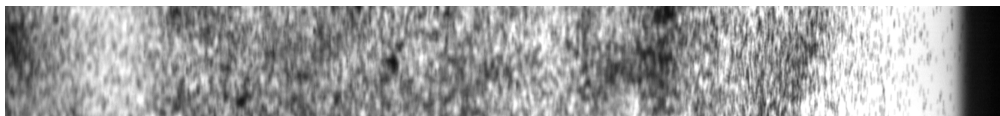
Abbildung 2.4: Verschaltung der Messtechnik

betrug für alle Versuche 250ms, sodass vier Bildpaare pro Sekunde entstanden. Dieser Aufnahmerhythmus stellt einen Kompromis zwischen verschiedenen Anforderungen dar. Die Aufnahme­frequenz ist erforderlich, um Strukturen im Fallfilm in mehreren Bildern erkennen und verfolgen zu können. Da die Anzahl der Aufnahmen pro Versuch durch den Kameraspeicher limitiert ist, wird von der kontinuierlichen Aufnahme mit der erforderlichen Auslösefrequenz abgesehen. So kann eine Messdauer von einigen Minuten erreicht werden. Es entstehen Bildpaare, die zur Verfolgung der Strukturen im Fallfilm tauglich und gleichzeitig über die Versuchsdauer verteilt sind. Die Verschaltung der Messtechnik ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

3. Auswertung

3.1. Eingangsdaten

Wie in Kapitel 2 beschrieben wurden Bildpaare von der Kamera aufgezeichnet. Diese sind reine Schwarz/Weiß-Bilder mit einer Helligkeitstiefe von 10 bit, sodass Strukturen im Fallfilm beobachtet werden können. Während dieser Untersuchung wurde dabei eine Auflösung von 2336 x 256 Pixel verwendet. Diese Auflösung gewährleistet, dass die volle Sensorbreite der Kamera genutzt wird und somit der größtmögliche Bereich über die Fallfilmbreite erfasst werden kann. Die vertikale Auflösung wurde auf 256 Pixel beschränkt, um die Kamera mit der benötigten Auslösefrequenz von 3000 Hz betreiben zu können. Ein Beispiel ist in Abbildung 3.1 zu sehen.



(a) A-Bild



(b) B-Bild

Abbildung 3.1: Beispiel eines Bildpaares

Zusätzlich liegen von der Messsoftware mitgeschriebene Spannungsdaten der Wägezellen in Form einer Textdatei vor. Diese sind nicht verstärkt und liegen daher im Bereich einiger Millivolt. Hier betrug die Samplerate 200 Hz. Die Zuordnung der Spannungsdaten zu einem Bildpaar ist durch die Aufzeichnung eines virtuellen Messkanals möglich. Dieser nimmt immer dann den Wert 1 an, wenn ein Bildpaar aufgezeichnet wird. Andernfalls ist er Null.

Ziel der Untersuchung sind Fallgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des herrschenden Massenstroms. Dabei ist zu bedenken, dass der Fallfilm an sich dreidimensional ist und auch über die Bildtiefe entlang der optischen Achse ein Geschwindigkeitsprofil ausbildet. Die Aufnahmen der Kamera sind jedoch lediglich eine zweidimensionale Projektion des Fallfilms.

Um zu ermitteln, welche Geschwindigkeiten beobachtet werden können, dient folgende grobe Abschätzung. Dabei wird eine Gauß-Verteilung für die Massenstromdichte $\dot{m}''$ über die Bildtiefe angenommen (Gl. 3.1), um einen hohen Kernstrom, der nach außen abfällt, zu modellieren. Dabei beziehen sich die Koordinaten auf den Kernstrom, der bei $x = 0$ liegt. Es kann zusätzlich angenommen werden, dass der Volumenanteil

$$\left(\begin{array}{c|ccc|c} Header_0 & & & & \\ \vdots & & & & \\ Header_n & & & & \\ 0 & Voltage_{10} & \cdots & Voltage_{30} & ImageIndicator_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ t_m - t_0 & Voltage_{1m} & \cdots & Voltage_{3m} & ImageIndicator_m \end{array} \right)$$

Abbildung 3.2: Aufbau der Protokolldatei

γ der Partikel mit der lokalen Massenstromdichte skaliert (Gl. 3.2). Nun kann ein Ansatz für Sichtbarkeit S einzelner Strukturen im Fallfilm gebildet werden. Die Sichtbarkeit in Abhängigkeit der Bildtiefe ist als Transmission bis zu der Ebene bei x zu verstehen. Der Ansatz in Gleichung 3.3 nimmt an, dass die Änderung der Sichtbarkeit durch den Partikelvolumenanteil bestimmt ist. Sollten sich im Sichtfeld viele Partikel befinden, so decken sie einen größeren Teil des Bildes ab. Gleichzeitig findet sich die Sichtbarkeit selbst im Ansatz. Dies begründet sich in der Tatsache, dass auf einer Bildebene x , die durch davor liegende Partikel nur eine geringe Sichtbarkeit erreicht, eine hohe Wahrscheinlichkeit besteht, dass in der betrachteten Ebene liegende Partikel die Sichtbarkeit nicht weiter einschränken, da sie bereits verdeckt sind. Nur in der betrachteten Ebene noch sichtbare Partikel können die Sichtbarkeit weiter einschränken. Es ergibt sich die in Gleichung 3.4 beschriebene Gleichung für die Sichtbarkeit.

$$\dot{m}'' = C_m \cdot e^{-x^2} \quad (3.1)$$

$$\gamma = C_V \cdot \dot{m}''(x) \quad (3.2)$$

$$\frac{dS}{dx} = -C_S \cdot \gamma \cdot S \quad (3.3)$$

$$\Leftrightarrow S(x) = S_0 \cdot e^{-\int_{x_0}^x C_S \cdot C_V \cdot C_m \cdot e^{-x^2} dx} \quad (3.4)$$

Zur Nutzung dieses Ansatzes müssen nun die Parameter C_m , C_V und C_S anhand von bekannten Größen abgeschätzt werden. Zur Abschätzung von C_m werden die Vorhangbreite B von 0,5m und die untersuchten Massenströme zwischen $2,5 \frac{kg}{s}$ und $11 \frac{kg}{s}$ hinzugezogen:

$$\dot{m} = B \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \dot{m}''(x) dx \quad (3.5)$$

$$\Leftrightarrow C_m = \frac{\dot{m}}{B \cdot \sqrt{\pi}} \quad (3.6)$$

$$\Rightarrow C_m \in [3, 12] \frac{kg}{m^2 s} \quad (3.7)$$

C_V wird anhand von der beobachteten Geschwindigkeiten zwischen $5 \frac{m}{s}$ und $10 \frac{m}{s}$ und der Partikeldichte $\rho_{Partikel}$ von $3500 \frac{kg}{m^3}$ abgeschätzt.

$$\dot{m}'' = v \cdot \gamma \cdot \rho_{Partikel} \quad (3.8)$$

$$\Leftrightarrow C_V = \frac{1}{v \cdot \rho_{Partikel}} \quad (3.9)$$

$$\Rightarrow C_V \in [2.8E - 5, 5.7E - 5] \frac{m^2 s}{kg} \quad (3.10)$$

Für die Abschätzung von C_S in einem infinitesimal schmalen Element werden Überlagerungen ausgeschlossen. Der Einfluss von Überlagerungen findet sich bereits dadurch im Ansatz wieder, dass der lokalen Volumenanteil mit der lokalen Sichtbarkeit multipliziert wird. Daher wird C_S mit einem einfachen Verhältnis aus Querschnittsfläche und Volumen eines Partikels gebildet. $r_{Partikel}$ beträgt 0,458 mm.

$$C_S = \frac{3 \cdot \pi \cdot r_{Partikel}^2}{4 \cdot \pi \cdot r_{Partikel}^3} \quad (3.11)$$

$$\Rightarrow C_S \approx 1600 \frac{1}{m} \quad (3.12)$$

Beobachtbare Partikelstrukturen liegen mit großer Wahrscheinlichkeit dort, wo entsprechende Massenströme zur Verfügung stehen. Die Wahrscheinlichkeit eine Struktur im Bild zu erfassen, ist also proportional zum Produkt aus Sichtbarkeit und der dimensionslosen Massenstromdichte (gegeben durch $\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp -x^2$).

Die Beobachtungswahrscheinlichkeit wird jeweils so skaliert, dass ihr Integral 1 ergibt. Sichtbarkeit, Massenstromverteilung und Beobachtungswahrscheinlichkeit sind in Abbildung 3.3 für die maximalen und minimalen Werte von C_m , C_V und C_S dargestellt und stellen daher die äußeren Grenzen für die möglichen Verläufe dar. Deutlich wird, dass die Beobachtungswahrscheinlichkeit nur wenige Millimeter von der Massenstromdichtenverteilung abweicht. Es kann also mit guter Näherung davon ausgegangen werden, dass beobachtete Strukturen und daraus resultierende Geschwindigkeiten dem Kernstrom des Fallfilms zuzuordnen sind.

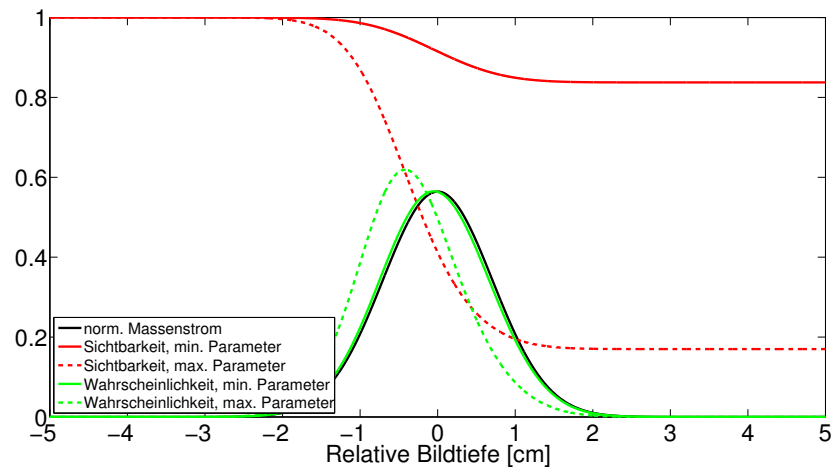


Abbildung 3.3: Massenstromdichte, Sichtbarkeit und Beobachtungswahrscheinlichkeit über die Bildtiefe

3.2. Massenstrombestimmung

Die Bestimmung des Massenstroms erfolgt anhand der in Abbildung 3.2 beschriebenen Datei. Bevor die aufgezeichneten Signale weiter verwendet werden können, werden einzelne Peaks entfernt und das Signal geglättet. Aufgrund der hohen Aufnahmefrequenz und der Tatsache, dass das Auslaufverhalten des Silos nur wenig dynamisch ist, können beide Maßnahmen ohne einen nennenswerten Informationsverlust durchgeführt werden. Im Anschluss werden die aufgezeichneten Spannungen durch die bekannten Empfindlichkeiten, Speisespannung und Nennlasten der einzelnen Wägezellen in Gewichtskräfte umgerechnet. Um den Massenstrom zu bestimmen, wird zu jedem Zeitpunkt der Aufzeichnung die Ableitung durch eine lokale Regression approximiert. Um dem so errechneten Massenstrom ein Bildpaar zuordnen zu können, wird der virtuelle Messkanal herangezogen und die Anzahl der Auslösungen bis zum aktuellen Zeitpunkt gezählt.

3.3. Grundlagen der Particle Image Velocimetry

Bei Particle Image Velocimetry handelt es sich um optisches Verfahren zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten. Dabei werden Bildpaare von einem mit Partikeln (dem Seeding) angereicherten Strömungsfeld aufgenommen und durch eine Kreuzkorrelation auf Verschiebungen untersucht. Bei bekannter Aufnahmefrequenz und Kalibration können dadurch Geschwindigkeiten ermittelt werden. Während in der ursprünglichen Form die beobachteten Partikel Rückschlüsse auf das Geschwindigkeitsfeld des

Mediums geben sollen, ist in dieser Untersuchung die Partikelgeschwindigkeit gesucht. Unsicherheiten, ob Partikel der Strömung exakt folgen, entfallen also.

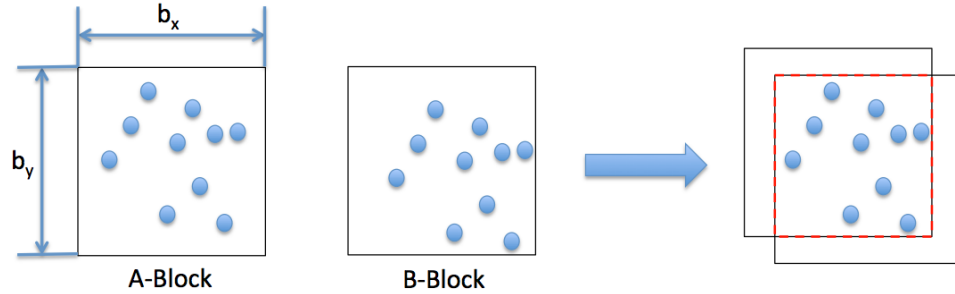


Abbildung 3.4: Schema Kreuzkorrelation

Zur Auswertung von Bildpaaren per Kreuzkorrelation werden die zu untersuchenden Bilder zuerst in Teilbilder unterteilt, die man als Blöcke bezeichnet (Abbildung 3.4). Jedem Block im ersten Bild des Bildpaares (A-Bild) entspricht also ein Block im zweiten Bild (B-Bild). Auf diese Blockpaare wird nun die Kreuzkorrelation zur Ermittlung der lokalen Verschiebung angewendet. Diese basiert auf der Minimierung des Fehlerquadrats. Dabei wird zuerst eine Verschiebung (hier u , v) angenommen und die Differenzen der Helligkeitswerte zwischen den Blöcken quadratisch aufsummiert (Gleichung 3.13). Dabei ist zu beachten, dass die Summierungsgrenzen je nach untersuchter Verschiebungsrichtung angepasst werden müssen.

$$E_{uv} = \sum_{x=1}^{b_x-u} \sum_{y=1}^{b_y-v} (A(x, y) - B(x + u, y + v))^2 \quad (3.13)$$

Eine einfache Umformung ergibt folgende Gleichung:

$$E_{uv} = \sum_{x=1}^{b_x-u} \sum_{y=1}^{b_y-v} \underbrace{A^2(x, y)}_I - 2 \cdot \underbrace{A(x, y) \cdot B(x + u, y + v)}_{II} + \underbrace{B^2(x + u, y + v)}_{III} \quad (3.14)$$

Bei näherer Betrachtung der Einzelterme zeigt sich, dass weder Term I noch III eine Aussage über den Zusammenhang der beiden Blöcke machen, sondern vielmehr lokale Eigenschaften des Einzelbildes beschreiben. Nur Term II ist durch die Verschiebung zwischen den Blöcken bestimmt. Dabei zeigt ein betragliches Anwachsen des Terms einen geringen quadratischen Fehler an. Aus diesem Grund wird die Korrelationsfunktion wie

folgt definiert:

$$R_{uv} = \sum_{x=1}^{b_x-u} \sum_{y=1}^{b_y-v} A(x, y) \cdot B(x+u, y+v) \quad (3.15)$$

Dieses Verfahren wird nun für jede mögliche Verschiebung durchgeführt. Verglichen wird immer nur die Überlagerung der beiden Blöcke bei einer festen Verschiebung. Der entsprechende Bereich ist in Abbildung 3.4 rot gekennzeichnet. Um auszuschließen, dass R nur dann hohe Korrelationen erreichen kann, wenn kleine Verschiebungen und damit große Überlagerungen vorliegen, muss eine Gewichtung vorgenommen werden. Die Gewichtung wird wie folgt durchgeführt:

$$R_{uv}^* = \frac{1}{(b_x-u)(b_y-v)} \cdot R_{uv} \quad (3.16)$$

Es ergibt sich ein Korrelationsfeld wie in Abbildung 3.5. Dabei kann nun diejenige Verschiebung mit der größten Korrelation als die tatsächlich vorliegende interpretiert werden [Tör04]. Bei dieser Vorgehensweise spricht man von direkter Kreuzkorrelation.

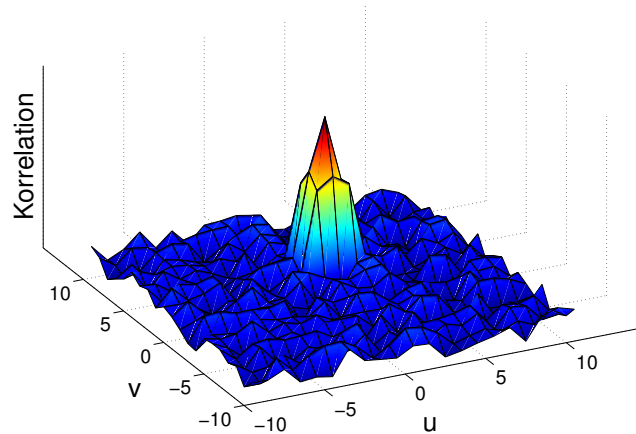


Abbildung 3.5: Ein beispielhaftes Korrelationsfeld

Da dieses Verfahren für jede mögliche Verschiebung und alle im Bildpaar befindlichen Blöcke durchzuführen ist, ergibt sich ein hoher Rechenaufwand von n^4 , wobei n die eindimensionale Auflösung eines Blocks angibt. Eine Möglichkeit den Rechenaufwand stark zu reduzieren liegt in der Anwendung eines Näherungsverfahrens. Dabei werden beide Blöcke per zweidimensionaler Fouriertransformation transformiert. Das Produkt aus dem transformierten A-Block und dem konjugierten transformierten B-Block ergibt

nach einer Rücktransformation eine Näherung für die Korrelationsfunktion R [BP66]. Der Rechenaufwand sinkt auf $n^2 * \log(n)$.

$$A \circ \text{---} A^* \quad (3.17)$$

$$B \circ \text{---} B^* \quad (3.18)$$

$$A^* * (B^*)' \text{---}\circ R_{uv} \quad (3.19)$$

3.4. Implementierung PIV

Die Auswertung der Bildpaare wurde in Matlab 2011a implementiert. Matlab zeichnet sich durch ein breites Angebot an fertigen mathematischen Funktionen aus. Zudem ist Matlab für verschiedene Plattformen verfügbar, sodass der entstandene Code auf verschiedensten Systemen lauffähig ist. Die entstandene Software ist für Mehrkernsysteme ausgelegt und durch ihre objektorientierte Struktur einfach erweiterbar. Im Folgenden sollen die wichtigsten Funktionen, die in der Auswertung der Messdaten Anwendung finden, kurz vorgestellt werden.

Adaptive Kreuzkorrelation - Die adaptive Kreuzkorrelation macht sich bereits vorhandene Informationen über die Verschiebung der Strukturen im Bild zu Nutze und wählt anhand dieser den mit dem A-Block zu vergleichenden B-Block aus. Der B-Block hat also nicht die selben Pixelkoordinaten wie der A-Block, sondern ist um die zuvor berechnete Verschiebung versetzt. Das Ergebnis der Kreuzkorrelation wird der bereits bekannten Verschiebung zugerechnet. Dieses Verfahren wird zur Verfeinerung der Auswertung genutzt. So ist es möglich, durch die Verwendung kleiner Blöcke eine hohe Auflösung des Verschiebungsfelds zu erreichen, ohne dass die Gefahr besteht, durch die Blockgröße große Verschiebungen gar nicht erfassen zu können. Die nötigen Eingangsverschiebungen können durch einen zuvor ausgeführten Korrelationsschritt mit größeren Blöcken erbracht werden.

Subpixelapproximation - Bei der Erkennung von Verschiebungen zwischen zwei Bildern stellt die Auflösung die Grenze für die Messgenauigkeit dar. Um Verschiebungen noch feiner bestimmen zu können, wird die Subpixelapproximation angewandt. Dabei wird nicht nur der größte Peak der Korrelationsfunktion betrachtet, sondern die benachbarten Korrelationswerte herangezogen. Verschiebt sich eine Struktur zwischen den Aufnahmezeitpunkten der Bilder des Bildpaares um etwas mehr als eine runde Pixelanzahl, so bildet sich ein Korrelationspeak bei der nächstliegenden ganzzahligen Verschiebung aus. In Richtung der vernachlässigten Restverschiebung wird der benachbarte Korrelationswert größer sein als der Korrelationswert in Gegenrichtung der Restverschiebung. Zur Quantifizierung werden die benachbarten Korrelationswerte wie auch der Korrelationspeak als Stützstellen einer Gaußfunktion eingesetzt. Das Maximum dieser Funktion kann jetzt auch gebrochene Werte annehmen und wird als erkannte Verschiebung mit Subpixelapproximation verstanden.

Interpolation - Sowohl bei direkter Kreuzkorrelation als auch bei der angenäherten Methode besteht die Möglichkeit, dass zufällige Korrelationspeaks entstehen, die nicht der Verschiebung entsprechen. Um solche Fehler nicht weiterzuverwenden, können sie anhand von manuell erstellten Kriterien erkannt und mit Ergebnissen von benachbarten Blöcken interpoliert werden. Wenn die Anzahl solcher Fehler einige Prozent übersteigt, deutet das auf entweder falsch gewählte Ausschlusskriterien oder untaugliche Bilddaten hin.

Kalibration - Eine besondere Bedeutung für die Auswertung hat das Kalibration. Dieser Auswertungsschritt dient dazu, im Bildraum erkannte Verschiebungen in Realkoordinaten umzurechnen. Dazu wird ein Kalibrationsbild mit Punkten, deren Realkoordinaten bekannt sind, aufgenommen. Die hier verwendete lineare Kalibration nutzt einen Ansatz der in Gleichung 3.20 gezeigten Form, um Blöcken Realkoordinaten zuzuweisen. Alle Konstanten (C_x , C_y , C_{xy} und C_0) lassen sich aus den bekannten Paarungen aus Real- und Bildkoordinaten einiger Punkte berechnen.

Im Folgeschritt werden die Geschwindigkeiten anhand von Gleichung 3.21 transformiert. Dazu dient das totale Differential. Die Ableitungen von Real- nach Bildkoordinaten lassen sich ausgehend von Gleichung 3.20 bilden, während die Ableitung von Bildkoordinaten nach der Zeit aus den Verschiebungen und der Aufnahme Frequenz resultieren.

Durch die lineare Kalibration können neben der Geschwindigkeitsumrechnung perspektivische Effekte ausgeglichen und zu den Pixelkoordinaten verdrehte Realkoordinatensysteme genutzt werden.

$$x_{real} = C_x \cdot x_{Bild} + C_y \cdot y_{Bild} + C_{xy} \cdot x_{Bild} \cdot y_{Bild} + C_0 \quad (3.20)$$

$$u_{real} = \underbrace{\frac{dx_{real}}{dx_{Bild}}}_{aus\ 3.20} \underbrace{\frac{dx_{Bild}}{dt}}_{u_{Bild}} + \underbrace{\frac{dx_{real}}{dy_{Bild}}}_{aus\ 3.20} \underbrace{\frac{dy_{Bild}}{dt}}_{v_{Bild}} \quad (3.21)$$

Transmissionsauswertung - Zur Auswertung der Transmission des Fallfilms wurde die selbe Aufteilung der Bildpaare in Blöcke herangezogen, wie schon bei der Kreuzkorrelation. Dazu wurden die Helligkeitswerte eines Blocks aufsummiert und von der Summe der Helligkeiten in einem Weißbild abgezogen. Das Weißbild ist ein vor dem Versuch entstandenes Bild, das keine Partikel zeigt, aber die Umgebungsbedingungen im Messaufbau festhält. Die errechnete Differenz entspricht also einer Abdunklung des Bildes. Zur Berechnung einer Transmission wurde nun der folgende Ansatz herangezogen:

$$Transmission = 1 - \frac{Abdunklung}{Bezugshelligkeit} \quad (3.22)$$

Um eine zutreffende Bezugshelligkeit zu ermitteln, wird ein Histogramm jedes Bildpaares erstellt. Dabei fallen zwei Häufigkeitsansammlungen auf. Die Anhäufung bei den geringen Helligkeitswerten werden als abgedeckte Bildteile interpretiert, während

die Anhäufung bei hohen Helligkeitswerten als durchlässig verstanden werden. Die Bezugshelligkeit wird als Differenz zwischen der Weißbildhelligkeit und der Trennung zwischen den beiden Anhäufungen im Histogramm berechnet. Im Histogramm werden die Häufigkeiten einzelner Helligkeitswerte dargestellt (vgl. Abbildung 3.6).

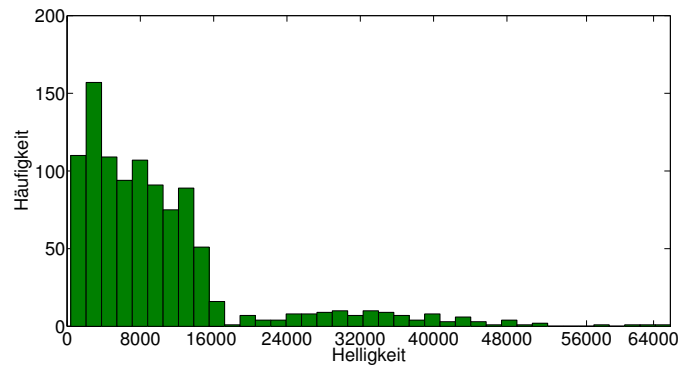


Abbildung 3.6: Beispielhaftes Histogramm

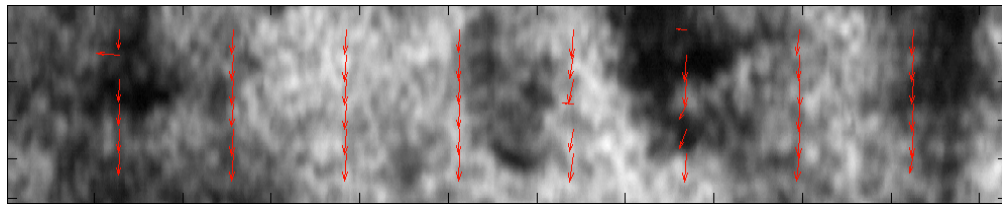
3.5. Anwendung der PIV

Die Auswertung der Bildpaare läuft in fünf Schritten ab. Im ersten Auswertungsschritt wird eine grobe Kreuzkorrelation durchgeführt. Dazu werden die Bilder in 18 x 8 Blöcke unterteilt. Wie in allen folgenden Arbeitsschritten auch kommt hier das Annäherungsverfahren zum Einsatz. Von der Nutzung der direkten Kreuzkorrelation wird abgesehen.

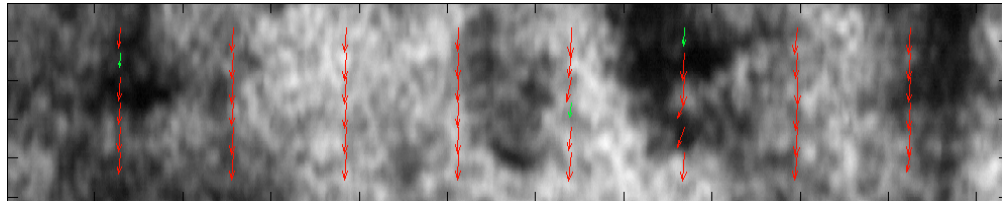
Im zweiten Auswertungsschritt werden die ermittelten Verschiebungen auf Fehlkorrelationen untersucht, gefiltert und erkannte Fehler durch Interpolationen der Umgebung ersetzt. Die verwendeten Kriterien schließen große Horizontalkomponenten und nach oben gerichtete Verschiebungen aus, da solche Verschiebungen im fallenden Partikelstrom nicht plausibel sind. Die Verschiebung in Fallrichtung ist nominell zwar limitiert, lässt aber mit 30 Pixel genug Spielraum für alle plausiblen Geschwindigkeiten. In diesem Schritt erkannte Verschiebungen liegen typischerweise zwischen 15 und 23 Pixel. Abbildung 3.7 zeigt beispielhafte Ergebnisse nach den ersten beiden Auswertungsschritten.

Im dritten Auswertungsschritt kommt nun die adaptive Kreuzkorrelation mit Subpixelapproximation zum Einsatz. Die Anzahl der Blöcke steigt auf 38 x 16, sodass lokal schärfer aufgelöst werden kann.

Die Kalibrierung wird im vierten Schritt der Auswertung vorgenommen. Anhand der bereits in Kapitel 3.4 beschriebenen Kalibrationsbilder werden die Pixelverschiebungen in Realkoordinaten umgerechnet und mittels der Auslösefrequenz der Kamera zu



(a) Erster Auswertungsschritt



(b) Zweiter Auswertungsschritt

Abbildung 3.7: Interpolation von Fehlkorrelationen (grün dargestellt)

Geschwindigkeiten weiterverarbeitet. Dabei spielt die Auswahl des Kalibrationsbildes eine entscheidende Rolle. Aufgrund des Strahlengangs durch das Objektiv erscheinen weiter entfernte Objekte im Bild kleiner als Objekte in direkter Kameranähe. Dies trifft auch auf Kalibrationsbilder zu. Wird also im Kalibrationsbild die Skala in großer Entfernung aufgenommen, so ergibt sich beim Mapping ein großes Verhältnis zwischen Realkoordinaten und Pixeln, während eine Skala in direkter Objektivnähe ein kleines Verhältnis zur Folge hat. Der Auswahl einer geeigneten Kalibrationsebene kommt also eine große Bedeutung zu.

Da die Lage des Fallfilms nicht vor dem Versuch bekannt war und in Abhängigkeit von der Fallhöhe und dem Massenstrom variierte, wurden mehrere Kalibrationsbilder aufgenommen, die über die Bildtiefe, also den Abstand zur Kamera, in Abständen von 5 cm gestaffelt und markiert wurden. Vor den Versuchen lagen also bereits Kalibrationsbilder für den gesamten Bereich, in dem der Fallfilm liegen könnte, vor. Während des Versuchs wurde die Lage des Fallfilms beobachtet und die Kalibrationsebene ausgewählt, der der Kernstrom des Fallfilms am nächsten war, da dieser hauptsächlich für die beobachtbaren Strukturen in den aufgenommenen Bildpaaren verantwortlich ist (Siehe Kapitel 3.1). Das Kalibrationsbild der ausgewählten Kalibrationsebene wurde dann zur Kalibrierung verwendet.

Im letzten Auswertungsschritt wurden den einzelnen Blöcken Transmissionswerte nach dem in Kapitel 3.4 beschriebenen Verfahren zugeordnet.

3.6. Fehlerabschätzung

Um einen Hinweis auf die Qualität der gemessenen Daten zu erhalten, sollen Fehlereinflüsse im Folgenden diskutiert und abgeschätzt werden. Dabei fallen drei Fehlerquellen auf.

Korrelationsfehler - Die bei der Auswertung verwendete Kreuzkorrelation ist nicht exakt und prinzipiell erst einmal auf ganzzahlige Verschiebungen begrenzt. Daher muss ein Fehler von einem Fehler von $\pm 0,5$ Pixel ausgegangen werden. Eine größere Abweichung zwischen berechneter Korrelation und tatsächlicher Verschiebung müsste dazu führen, dass benachbarte, ganzzahlige Verschiebung eine größere Korrelation hervorbringen würde, sodass auch hier der Fehler unter $0,5$ Pixel liegen würde. Bei typischen Verschiebungen zwischen 15 und 23 Pixeln ergibt sich ein Fehler zwischen $\pm 2,2\%$ und $\pm 3,3\%$, der aufgrund der statistischen Verteilung der Partikelstrukturen im Pixelraster auch statistisch verteilte Messabweichungen hervorbringen muss. Durch die Subpixelapproximation wird der Korrelationsfehler geringer ausfallen. Mangels einer geeigneten Quantifizierung sollte jedoch trotzdem von ca. 3% ausgegangen werden.

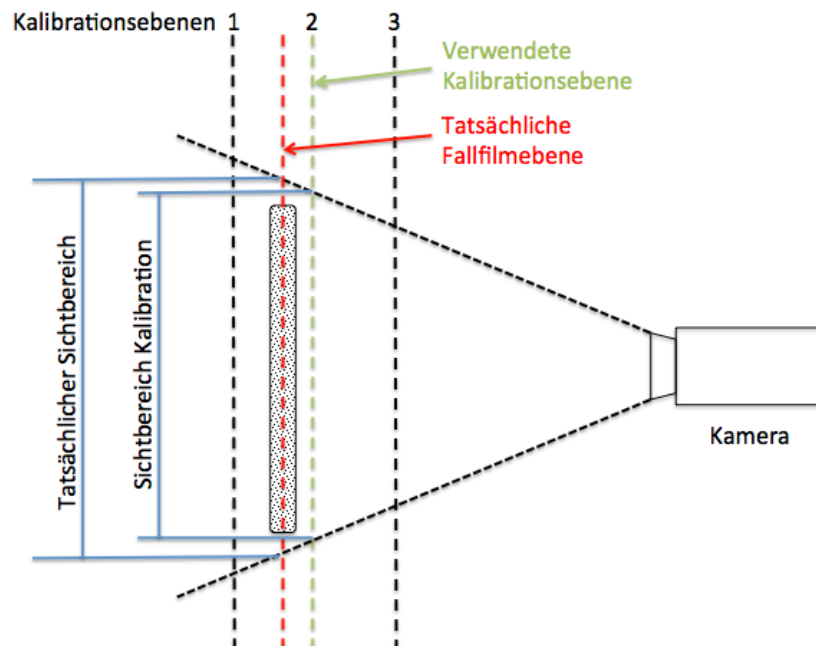


Abbildung 3.8: Strahlengang und Lage der Kalibrations- bzw. Fallfilmebenen

Kalibrationsfehler - Die zur Auswertung verwendete Kalibrationsebene ist maßgeblich für das Ergebnis verantwortlich. Zur Auswahl stehen Kalibrationsbilder im

Abstand von 5 cm über die Bildtiefe, sodass bei richtiger Auswahl eine Restunsicherheit von maximal 2,5 cm bleibt. Dies bezieht sich allerdings nur auf den Kernstrom des Fallfilm, anhand dessen die Kalibrationsebene gewählt wurde. Außerhalb des Kernstroms liegende Strukturen sind deutlich größeren Kalibrationsfehlern unterworfen. Eine Prinzipskizze des Strahlengangs findet sich in Abbildung 3.8.

Zur Quantifizierung des Messfehlers aufgrund der Kalibration ist es nötig, den Abstand zwischen Objektiv und Kalibrationsebene zu kennen. Typischerweise liegt dieser bei 0,7 bis 0,8 m. Eine Abweichung von 2,5 cm zwischen der Kalibrationsebene und dem beobachteten Kernstrom entspricht also einer Erweiterung bzw. Verkleinerung des Sichtbereichs um bis zu $\pm 3,6\%$. Sollte der Kernstrom hinter der Kalibrationsebene liegen, ist das im Mapping entstehende Verhältnis aus Pixeln und Realkoordinaten also in der Kalibrationsebene größer als in der tatsächlich beobachteten Ebene, da in der Kalibrationsebene gleich viele Pixel einen kleineren Realbereich darstellen. Beim Mapping werden also für eine Realeinheit zu viele Pixel herangezogen. Entsprechend wird durch Kreuzkorrelation erkannten Verschiebungen in Pixeln ein langsamerer Realwert zugeordnet, als er tatsächlich vorliegt. Analog wird Strukturen, die vor der Kalibrationsebene liegen, eine zu große Geschwindigkeit zugeordnet. Der Fehler beträgt für den Kernstrom der Erweiterung bzw. Verringerung des Bildbereichs entsprechende $\pm 3,6\%$.

Unsicherheit bei der Massenstrombestimmung - Die Sensordaten der Wägezellen zur Bestimmung des Massenstroms sind einem starken Rauschen unterworfen. Zwar können durch Glättung und Aussortieren von stark abweichenden Einzelwerten plausible Gewichtsverläufe ermittelt werden, der verbleibende Rauschpegel führt jedoch bei der Bestimmung der Ableitung und somit des Massenstroms zu starken Schwankungen. Somit kann der Massenstrom nur unter Betrachtung von sowohl der Gewichtskurve als auch der Massenstromkurve größenordnungsmäßig bestimmt werden.

4. Ergebnisse

4.1. Auswahl der Ergebnisse

Das Auslaufverhalten des Silos ist während der Versuchsdauer nicht stationär. Abbildung 4.1 zeigt eine typische Massenstromkurve, wie sie während eines Versuchsdurchlaufs entstanden ist. Dabei fallen Einlaufverhalten und insbesondere das beschleunigte Auslaufverhalten bei der Leerung des Silos auf. Dazwischen ergibt sich ein weitgehend linearer Verlauf. Als maßgeblicher Parameter für das Geschwindigkeitsfeld im Fallfilm muss daher jedem Ergebnis ein Massenstrom zugeordnet werden.

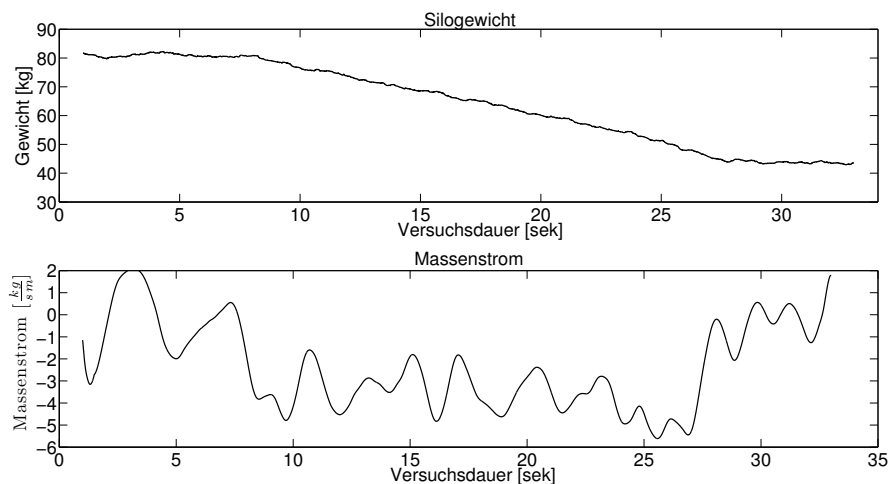


Abbildung 4.1: Gewichts- und geglättete Massenstromkurve

Diese Untersuchung beschränkt sich auf die Variation der Spaltbreite am Siloauslauf um vergleichbare und auf die Fallfilmbreite normierte Massenströme $\dot{m}'_1$ bis $\dot{m}'_4$ zu erzeugen. Die ausgewählten Spaltbreiten betragen 9 mm, 13 mm, 17 mm und 22,5 mm. Bei der Auswahl der auszuwertenden Bildpaare wird zuerst ein möglichst stationärer Zeitbereich im zeitlichen Verlauf des Silogewichts ausgewählt. Die berechnete Massenstromkurve ist aufgrund des Rauschpegels der Messdaten selbst in scheinbar stationären Teilstücken nie glatt. Hier dient der Mittelwert des ausgewählten Zeitbereichs als Nennmassenstrom. Eine exakte Zuordnung ist aufgrund des starken Rauscheinflusses auf die Ableitung zwar möglich, gibt aber nicht das tatsächlich träge Auslaufverhalten wieder. Um untersuchen zu können, ob das Geschwindigkeitsfeld im Fallfilm vom Massentrom abhängt, wird jedem Ergebnis ein so ermittelter Massenstrom zugeordnet. Bei dieser Untersuchung wurden soweit verfügbar folgende Massenströme ausgewählt, die allerdings nicht als exakte Messung zu verstehen sind:

$$\dot{m}'_1 \approx 5 \frac{kg}{ms} \quad (4.1)$$

$$\dot{m}'_2 \approx 8,5 \frac{kg}{ms} \quad (4.2)$$

$$\dot{m}'_3 \approx 13 \frac{kg}{ms} \quad (4.3)$$

$$\dot{m}'_4 \approx 22 \frac{kg}{ms} \quad (4.4)$$

4.2. Geschwindigkeiten

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Untersuchungen vorgestellt werden. Dabei werden Halbprofile verschiedener Fallhöhen und Massenströme betrachtet. Halbprofile zeigen die Hälfte des Geschwindigkeitsprofils über die Fallfilmbreite. Es wird davon ausgegangen, dass der Vorhang symmetrisch ist, daher genügt der Bildausschnitt über die Hälfte des Fallfilms. Dabei entspricht $x = 0$ immer der Mitte des Fallfilms während $x = 0,25$ die äußere Grenze des Siloauslaufs markiert. Alle Daten jenseits dieser Grenze sind der Aufweitung des Fallfilms zuzuschreiben.

Ein Einzelprofil stellt die Geschwindigkeitsdaten dar, die aus einem einzelnen Bildpaar resultiert. Die Zeit zwischen zwei Bildern entspricht der eingestellten Taktzeit der Kamera. Bei 3000 Hz ergeben sich das 0,33 ms. Im Vergleich zur Versuchsdauer stellt das Einzelprofil somit den Fallfilm zu einem annähernd diskreten Zeitpunkt dar. Ausreißer am rechten Bildrand ($x \approx 0,28$) können dadurch entstehen, dass dort bereits der Rand des Leuchtfeldes aufgenommen wurde, sodass die Korrelation in diesem Bereich erschwert wird.

Die Darstellung des instationären Verhaltens wird durch Polynomapproximationen aufeinander folgender Einzelprofile erreicht. Durch diese vereinfachte Darstellung des Einzelprofils lassen sich mehrere Profile gleichzeitig betrachten, die einen Eindruck über das instationäre Verhalten des Fallfilms geben. Pro Sekunde werden vier Bildpaare aufgezeichnet, sodass ein Profil alle 250 ms entsteht.

Die zeitlich gemittelten Profile zeigen den allgemeinen Trend des Fallfilms bei den betrachteten Parametern an. Dabei werden alle ausgewählten Einzelprofile herangezogen. Die Messpunkte stammen also aus Bildpaaren, die zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommen wurden. Zusätzlich wird ein rein zeitlich gemitteltes Näherungspolynom (rot) und einen Geschwindigkeitsmittelwert über alle aufgezeichneten Profile und die gesamte Profilbreite (blau) dargestellt.

4.2.1. Spaltbreite 9 mm - $\dot{m}'_1$

Beim geringsten Massenstrom $\dot{m}'_1$ bilden sich glatte Geschwindigkeitsprofile aus, wie sie in Abbildung 4.2 gezeigt sind. Dabei zeigen die Messwerte lokal nur geringe Streuungen auf. Abbildung 4.3 zeigt einige gemittelte Einzelprofile. Die erkennbaren Abweichungen untereinander lassen sich auf zeitliche Instabilitäten zurückführen. Dabei

nimmt die zeitliche Schwankung mit der Fallhöhe zu. Die mittlere Fallfilmgeschwindigkeit in Abbildung 4.4 zeigt einen Anstieg von $4,6 \frac{m}{s}$ bei 2,5m Fallhöhe (Abbildung 4.4a) bis auf $8,8 \frac{m}{s}$ bei 8m Fallhöhe (Abbildung 4.4d). Die Bildung eines lokalen Maximums zwischen $x = 0,15$ und $x = 0,2$ haben die mittleren Profile aller Fallhöhen gemeinsam.

Die von Abbildung 4.2a bis 4.2d veränderte Form des Geschwindigkeitsprofils stellt kein fallhöhenpezifisches Charakteristikum dar. Die deutliche Streuung der Einzelwerte in der zeitlich gemittelten Darstellung ist weitestgehend auf das instationäre Verhalten des Fallfilms zurückzuführen, da die bereits diskutierten Einzelprofile diese Streuung nicht aufweisen.

4.2.2. Spaltbreite 13 mm - $\dot{m}'_2$

Ähnlich wie bei $\dot{m}'_1$ zeigt das in Abbildung 4.5a dargestellte Geschwindigkeitsprofil einen glatten, schwankungsarmen Verlauf. Mit zunehmender Fallhöhe deuten sich aber bei diesem Massenstrom im Einzelprofil steigende Schwankung an (Beispielsweise in Abbildung 4.5d bei $x = 0,04$). Mit den Daten aus der Messung mit $\dot{m}'_1$ vergleichbar ist das instationäre Verhalten über die Fallhöhe, wie es in Abbildung 4.6 dargestellt ist. Dabei zeigt sich jedoch eine deutlich größere Dynamik im Randbereich ab $x = 0,2$.

Beim Massenstrom von $\dot{m}'_2$ entwickelt sich die mittlere Fallgeschwindigkeit von $5,3 \frac{m}{s}$ bei 2,5m Fallhöhe (Abbildung 4.7a) bis auf $8,9 \frac{m}{s}$ bei 8m Fallhöhe (Abbildung 4.7d). Die Streuung der Daten ist eine Überlagerung aus instationärem Verhalten und der teilweise lokal auftretenden Streuung innerhalb der Einzelprofile. Analog zum Massenstrom $\dot{m}'_1$ ergibt sich nach der Mittelung sich wieder ein Geschwindigkeitsmaximum zwischen $x = 0,15$ und $x = 0,2$.

4.2.3. Spaltbreite 17 mm - $\dot{m}'_3$

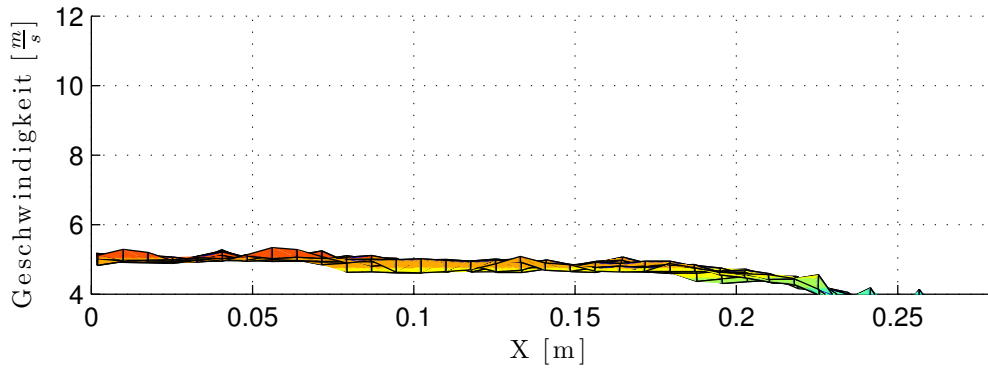
Die Daten bei $\dot{m}'_3$ zeigen teils starke Streuungen selbst innerhalb der Einzelprofile (Abbildung 4.8), die mit der Fallhöhe zunehmen. Ausreißer wie in Abbildung 4.8d bei $x = 0,15$ deuten auf Inhomogenitäten innerhalb des Vorhangs hin. Das instationäre Verhalten ist dem Verhalten bei geringeren Massenströmen ähnlich. Es lassen sich keine markanten Unterschiede feststellen.

Die zeitlich gemittelten Profile ergeben mittlere Geschwindigkeiten von $5,6 \frac{m}{s}$ bei 2,5m Fallhöhe bis $9,3 \frac{m}{s}$ bei 8m Fallhöhe. In Abbildung 4.10d zeigen sich vereinzelt Messwerte mit starker Abweichung vom mittleren Profil. Diese entsprechen den in den Einzelprofilen bereits beobachteten Abweichungen.

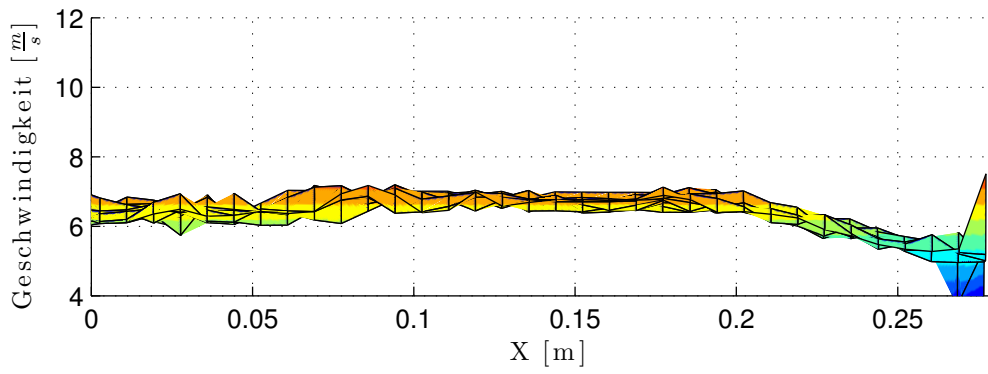
4.2.4. Spaltbreite 22,5 mm - $\dot{m}'_4$

Die Einzelprofile in Abbildung 4.11 zeigen eine Erhöhung der bei $\dot{m}'_3$ beobachteten Streuung. Die stark vom zu erahnenden Profil abweichenden Stellen treten häufiger und bei allen Fallhöhen gleichermaßen auf. Selbst hier zeigen sich jedoch glatte Bereiche (Abbildung 4.11c bei $x < 0,03$, $x = 0,15$ und $x > 0,2$). Die einzelnen Messwerte in

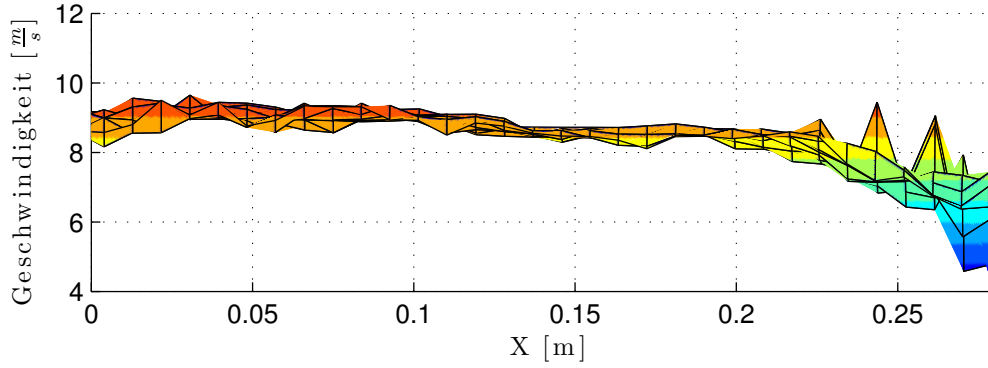
Abbildung 4.13 zeigen, dass beobachtete Abweichungen vom einem glatten Profil nicht ortsfest sind. Die mittlere Fallgeschwindigkeit wächst von $5,8 \frac{m}{s}$ bei 2,5m Fallhöhe auf $9,3 \frac{m}{s}$ bei 8m Fallhöhe an.



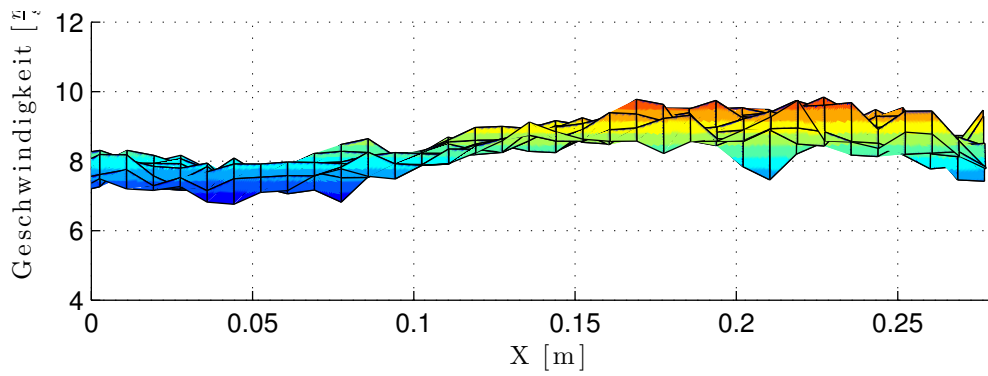
(a) Fallhöhe: 2,5m



(b) Fallhöhe: 4m

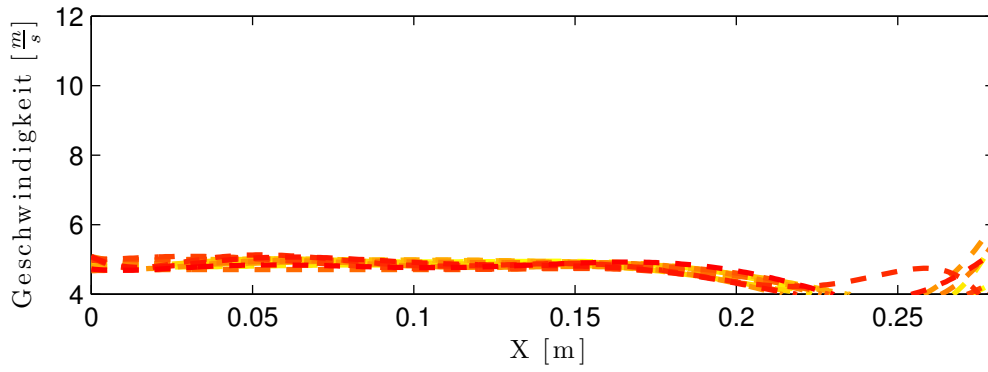


(c) Fallhöhe: 6m

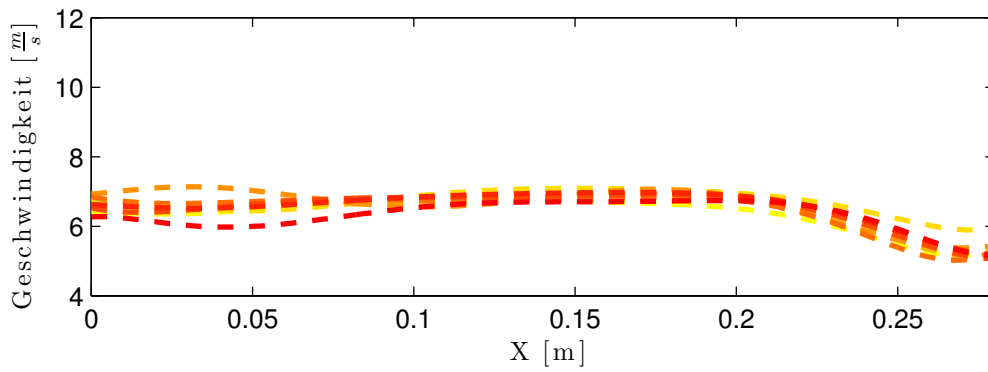


(d) Fallhöhe: 8m

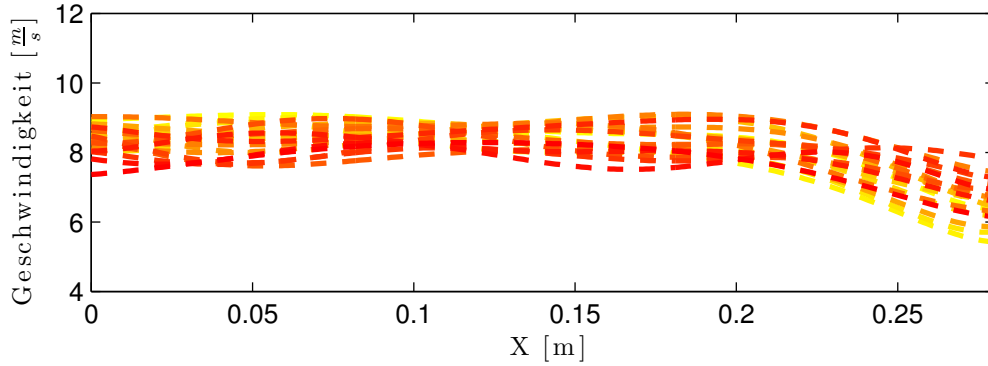
Abbildung 4.2: Typische Einzelprofile bei $\dot{m}'_1$



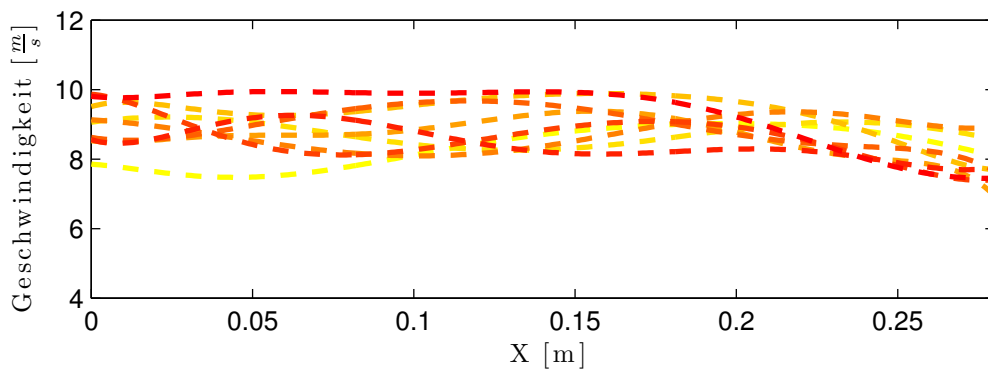
(a) Fallhöhe: 2,5m



(b) Fallhöhe: 4m

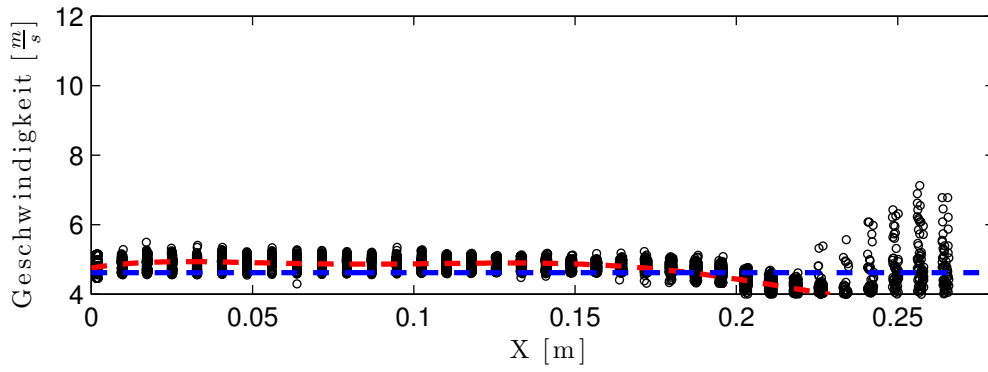


(c) Fallhöhe: 6m

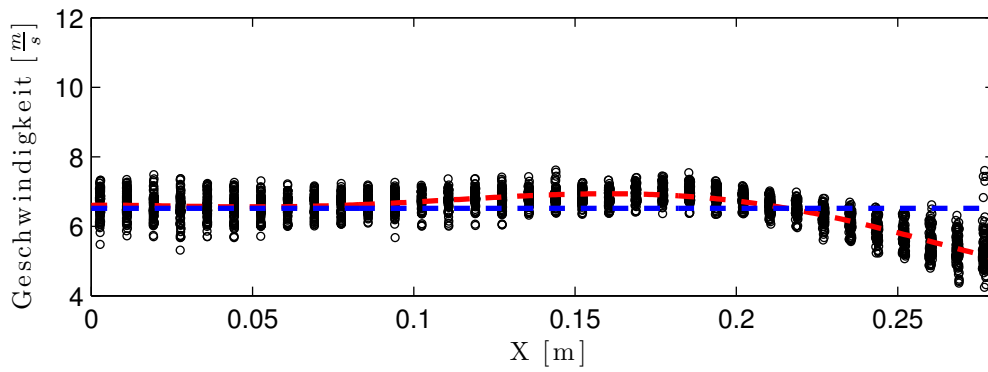


(d) Fallhöhe: 8m

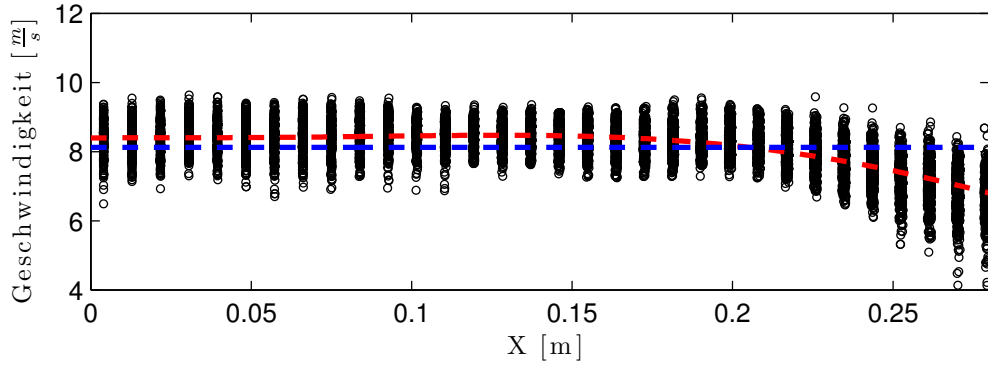
Abbildung 4.3: Instationäres Verhalten bei $\dot{m}'_1$



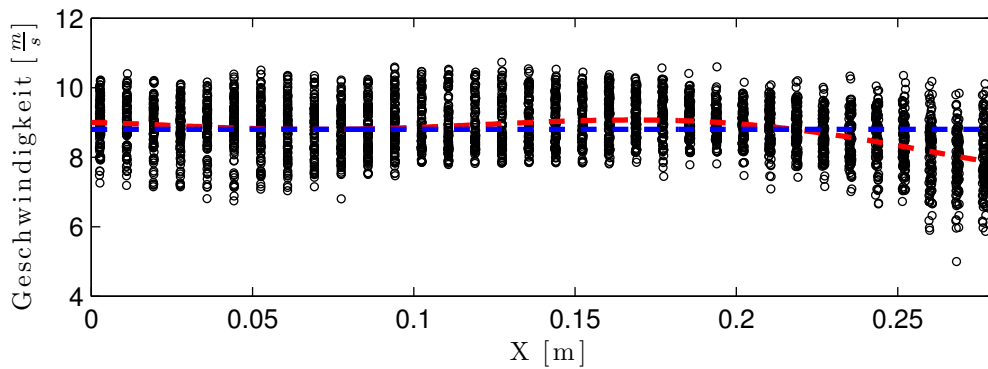
(a) Fallhöhe: 2,5m



(b) Fallhöhe: 4m

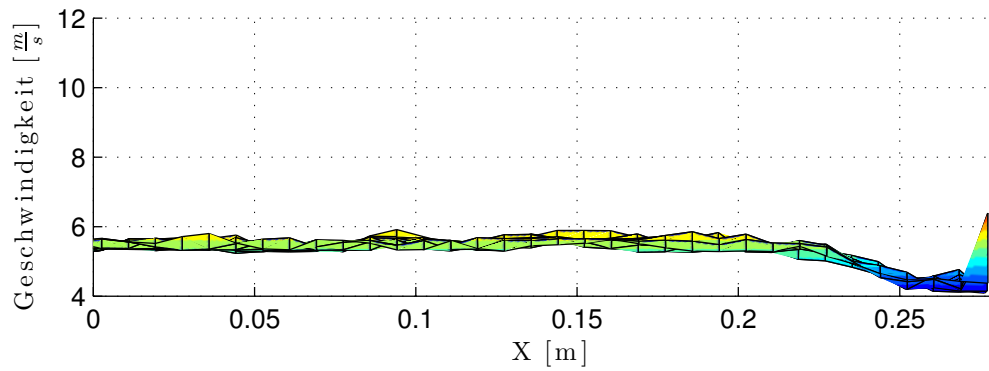


(c) Fallhöhe: 6m

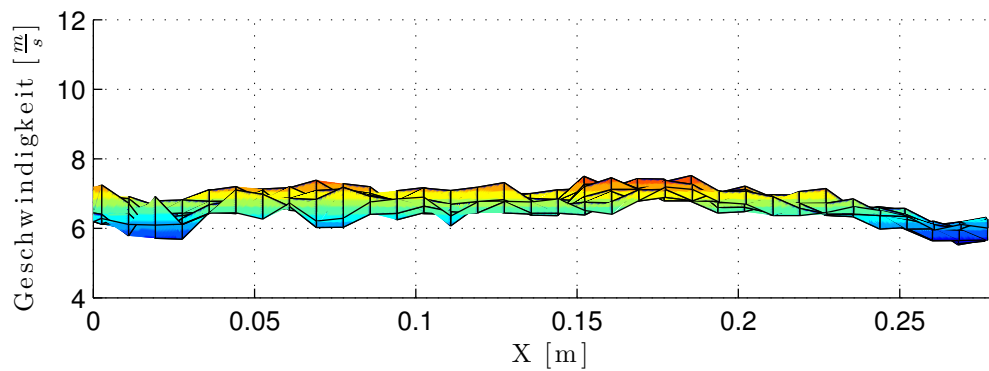


(d) Fallhöhe: 8m

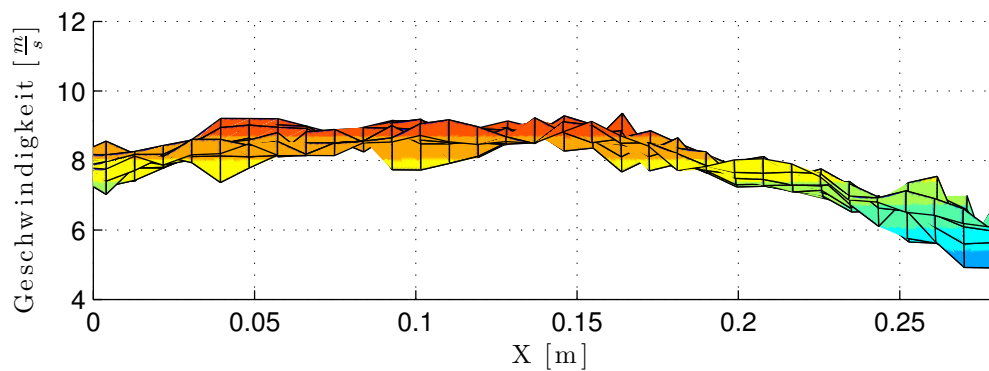
Abbildung 4.4: Mittleres Profil bei m'_1



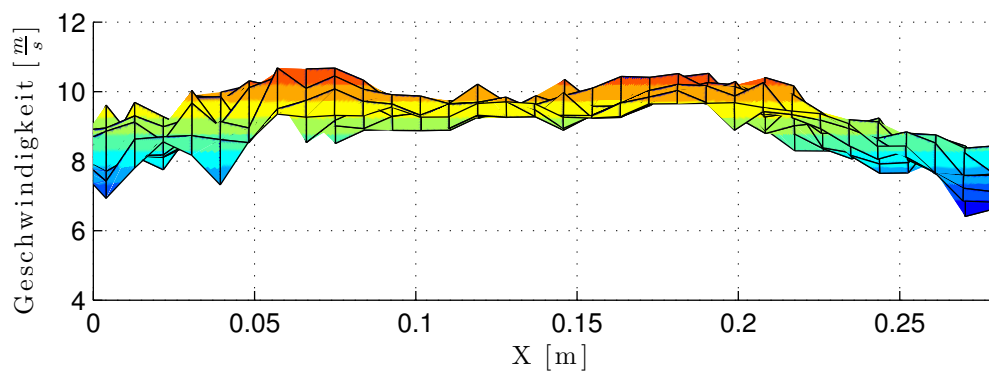
(a) Fallhöhe: 2,5m



(b) Fallhöhe: 4m

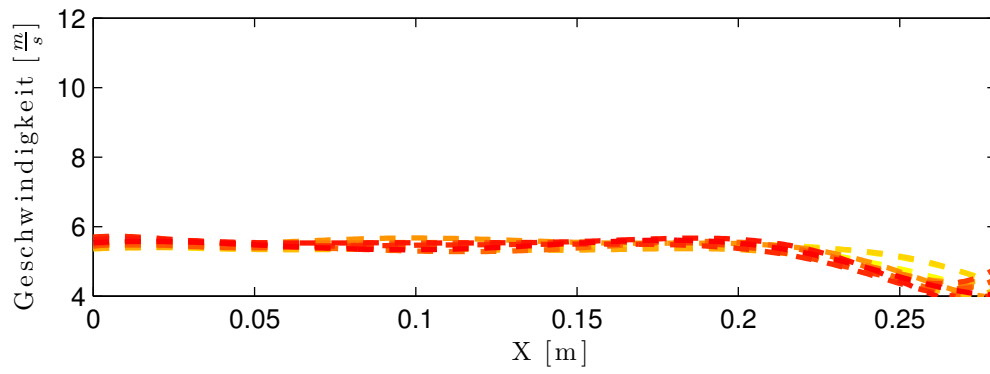


(c) Fallhöhe: 6m

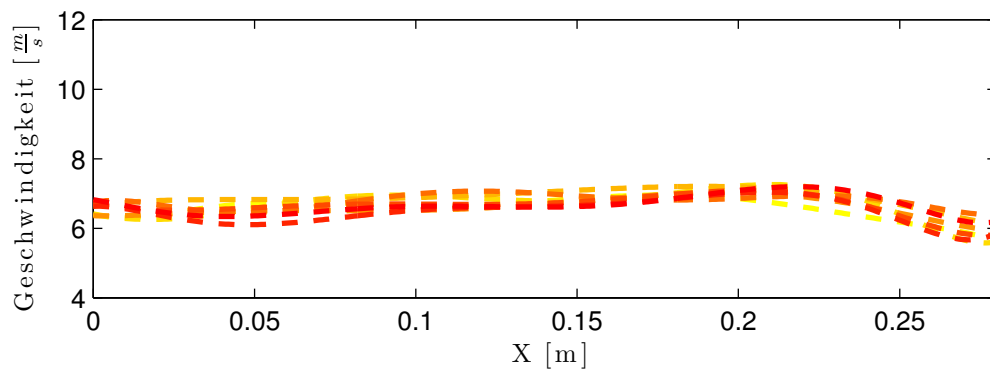


(d) Fallhöhe: 8m

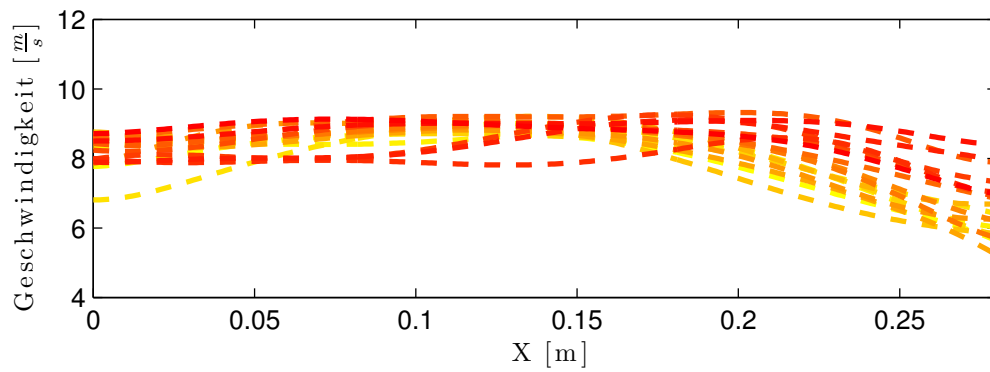
Abbildung 4.5: Typische Einzelprofile bei $\dot{m}'_2$



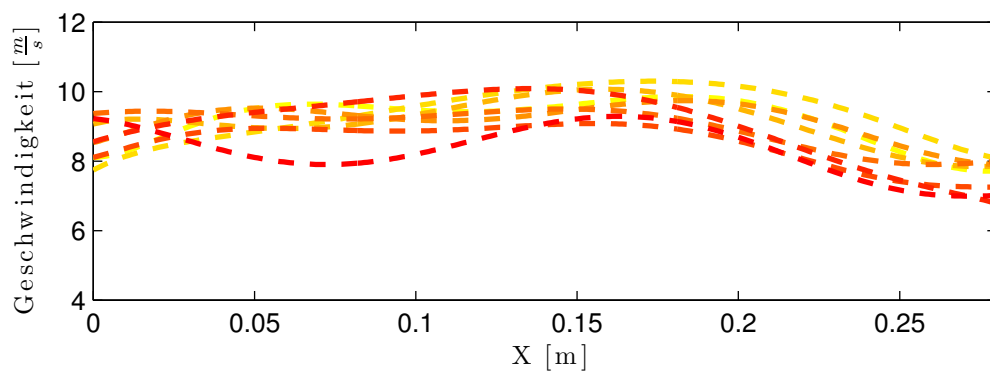
(a) Fallhöhe: 2,5m



(b) Fallhöhe: 4m

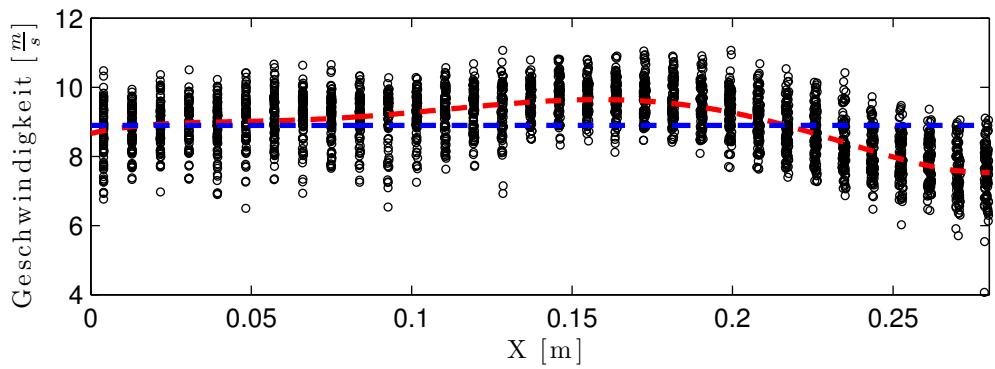
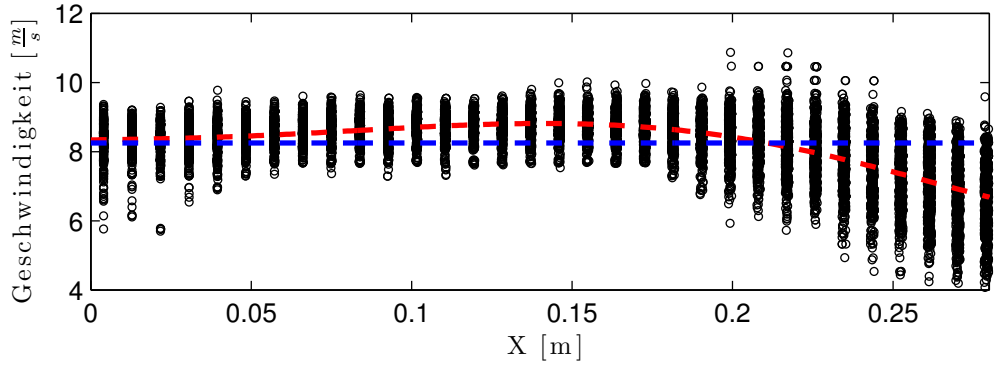
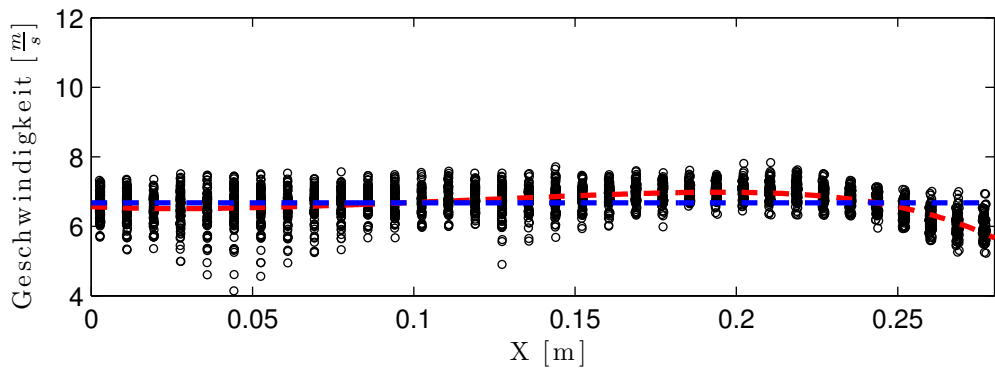
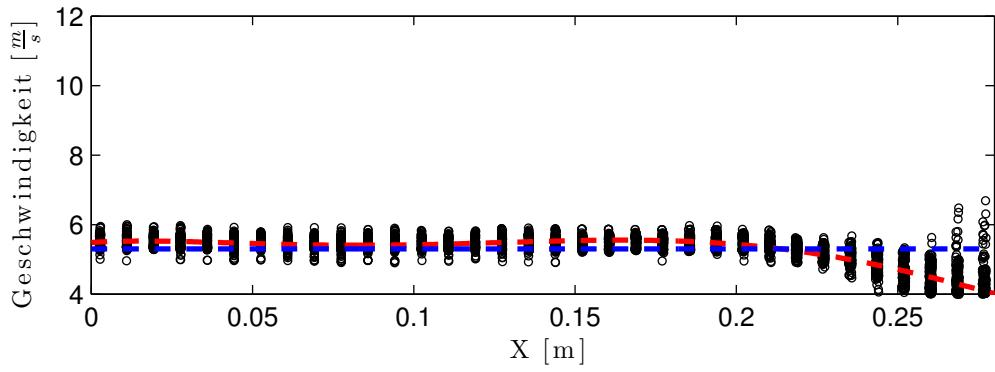


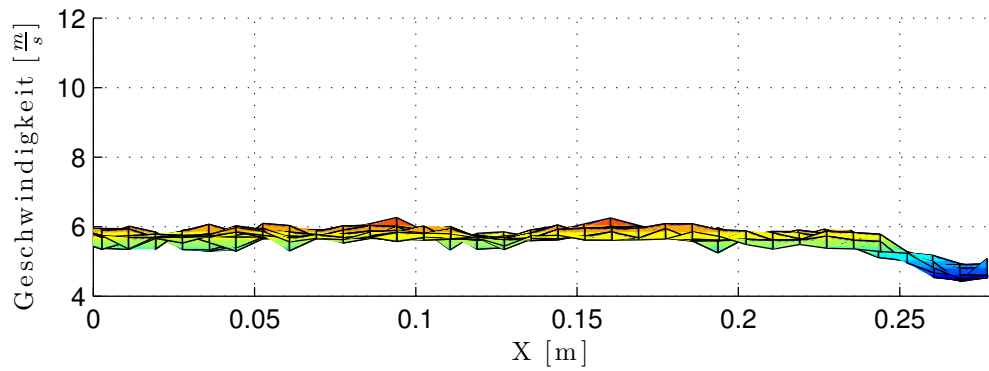
(c) Fallhöhe: 6m



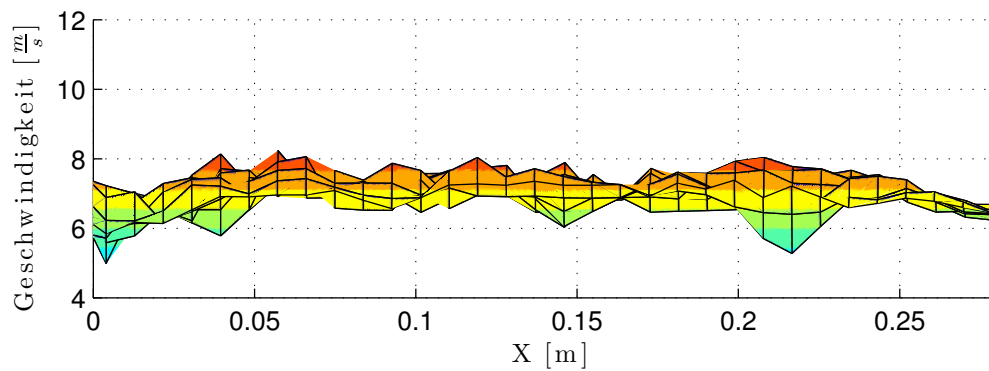
(d) Fallhöhe: 8m

Abbildung 4.6: Instationäres Verhalten bei $\dot{m}'_2$

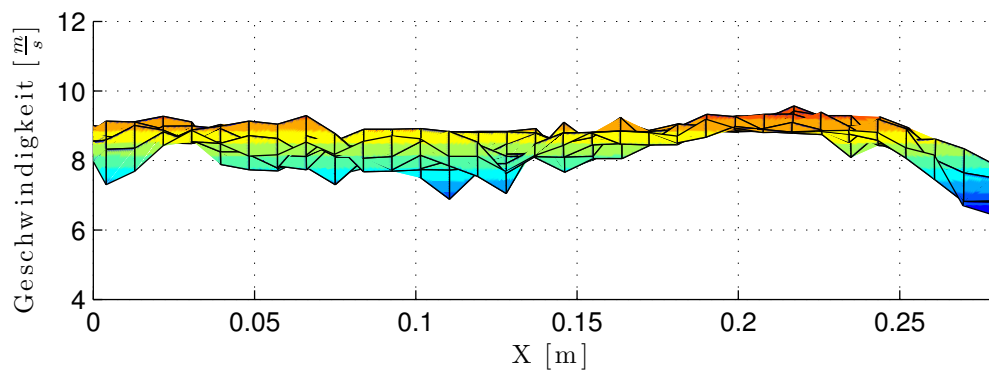
Abbildung 4.7: Mittleres Profil bei m'_2



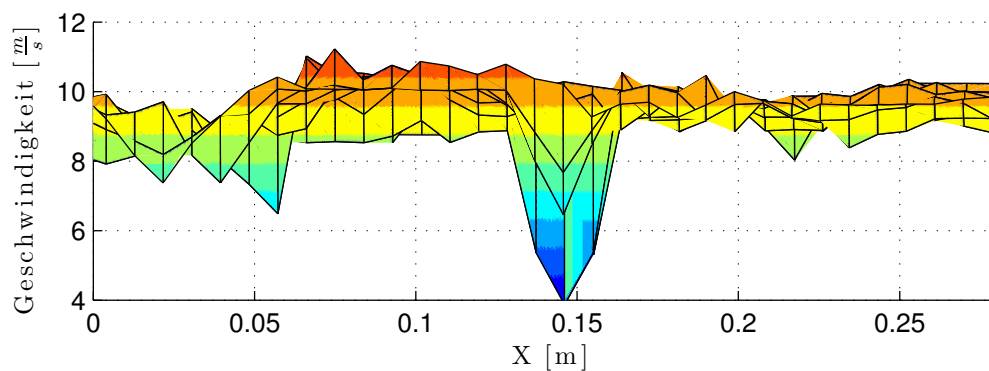
(a) Fallhöhe: 2,5m



(b) Fallhöhe: 4m

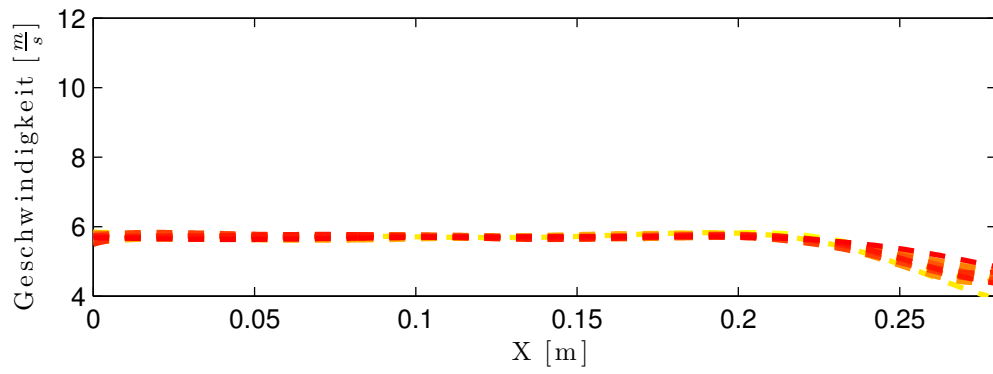


(c) Fallhöhe: 6m

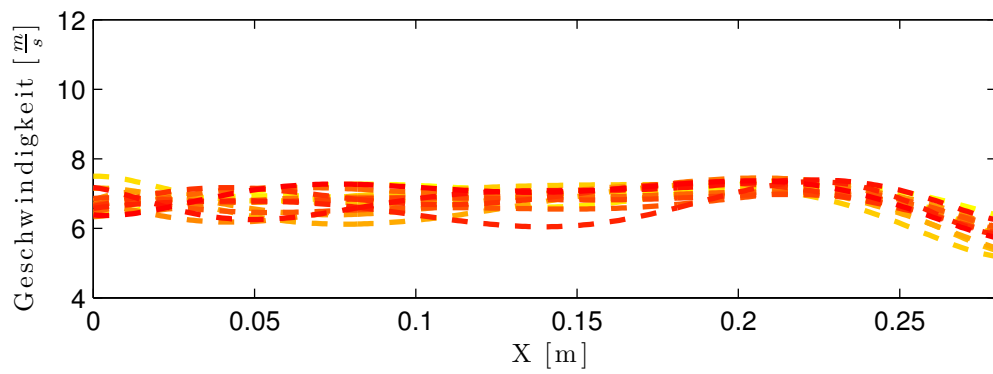


(d) Fallhöhe: 8m

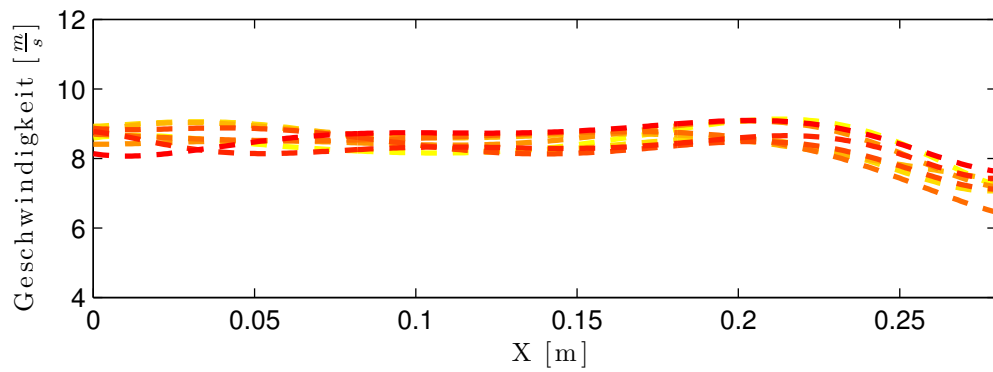
Abbildung 4.8: Typische Einzelprofile bei $\dot{m}'_3$



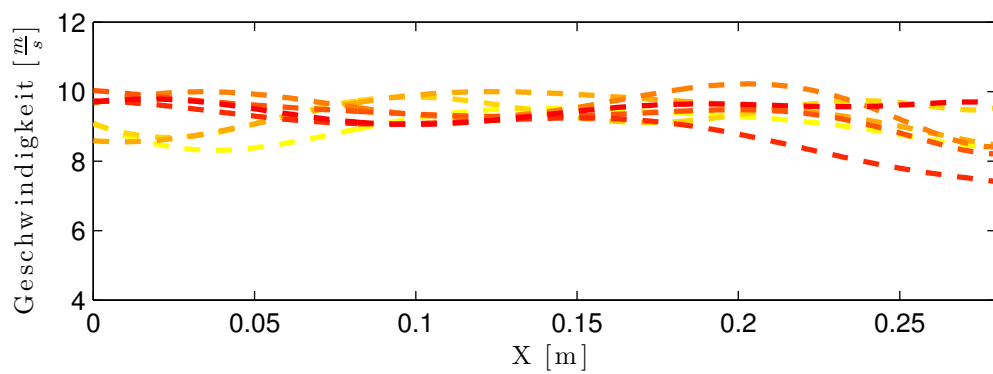
(a) Fallhöhe: 2,5m



(b) Fallhöhe: 4m

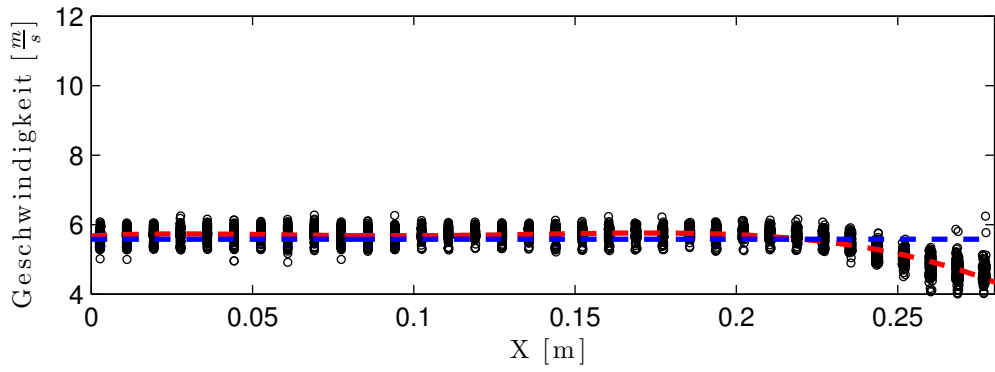


(c) Fallhöhe: 6m

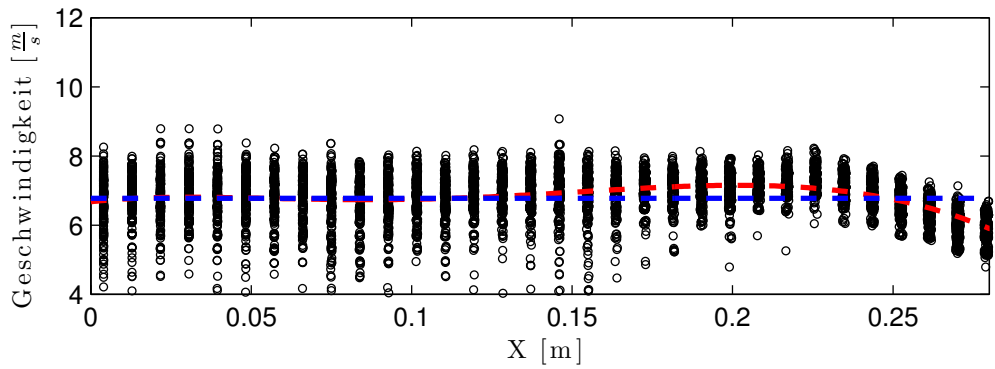


(d) Fallhöhe: 8m

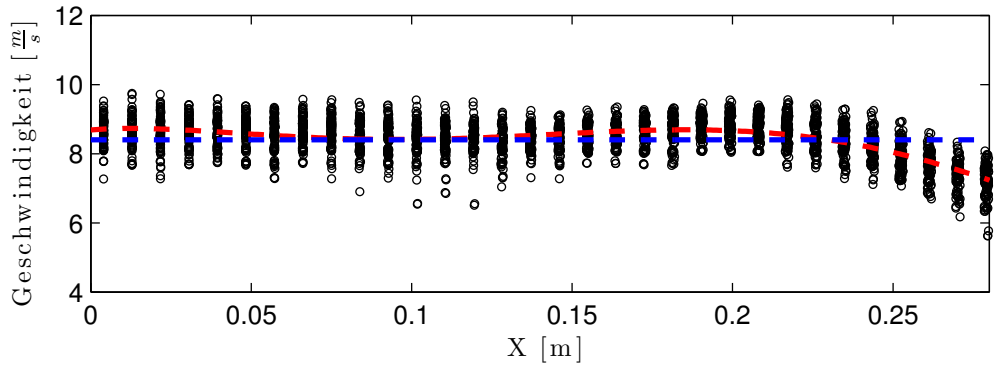
Abbildung 4.9: Instationäres Verhalten bei $\dot{m}'_3$



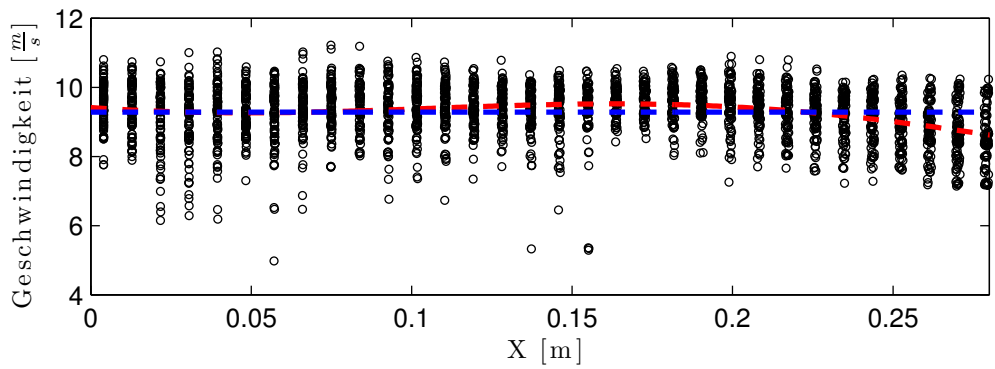
(a) Fallhöhe: 2,5m



(b) Fallhöhe: 4m

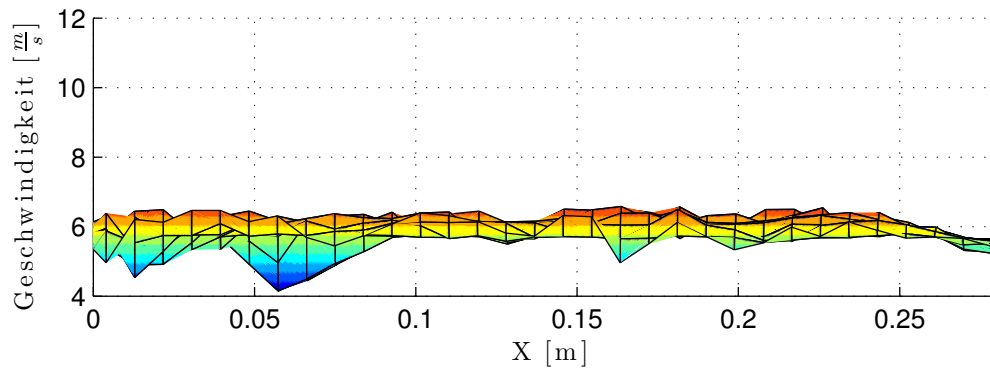


(c) Fallhöhe: 6m

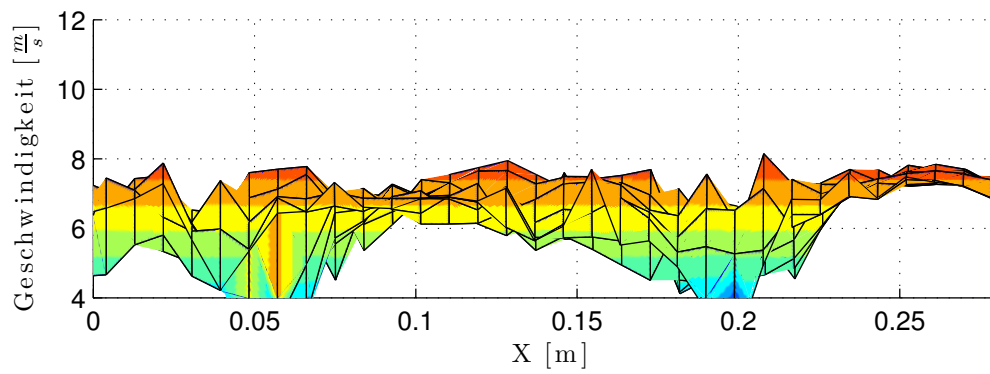


(d) Fallhöhe: 8m

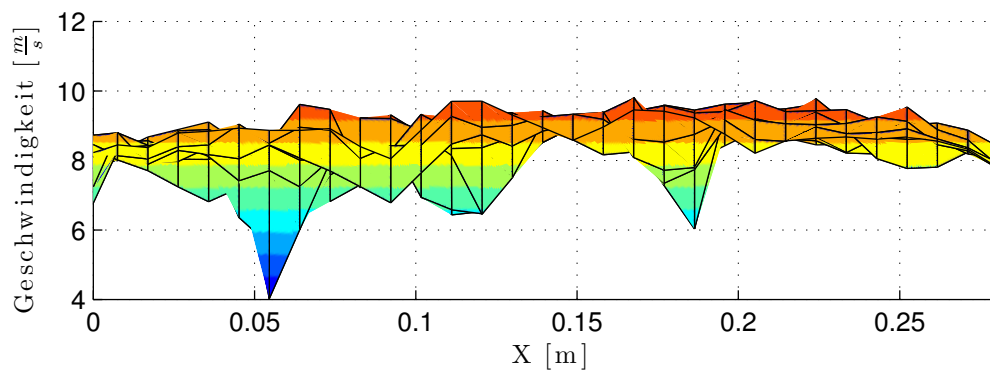
Abbildung 4.10: Mittleres Profil bei $\dot{m}'_3$



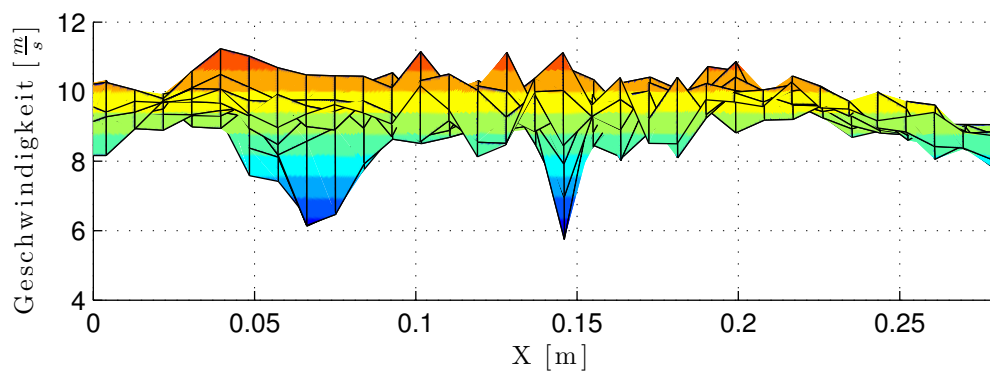
(a) Fallhöhe: 2,5m



(b) Fallhöhe: 4m

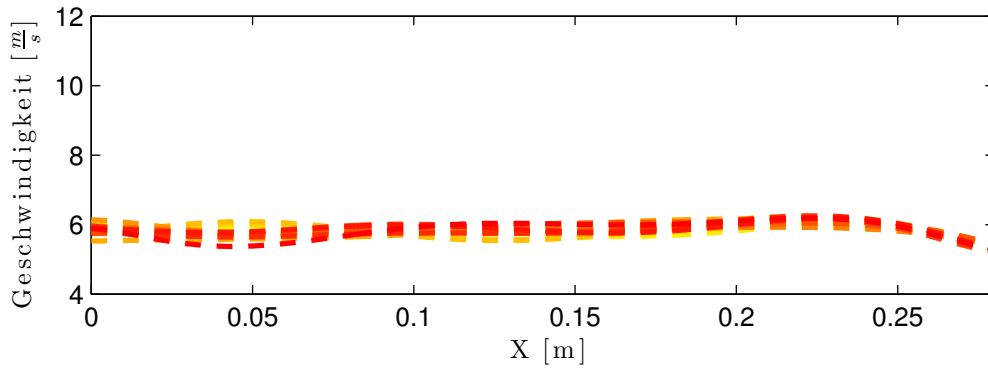


(c) Fallhöhe: 6m

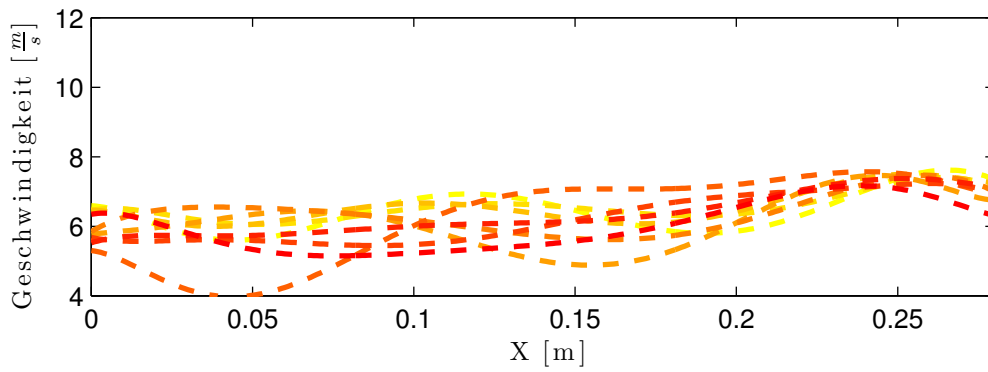


(d) Fallhöhe: 8m

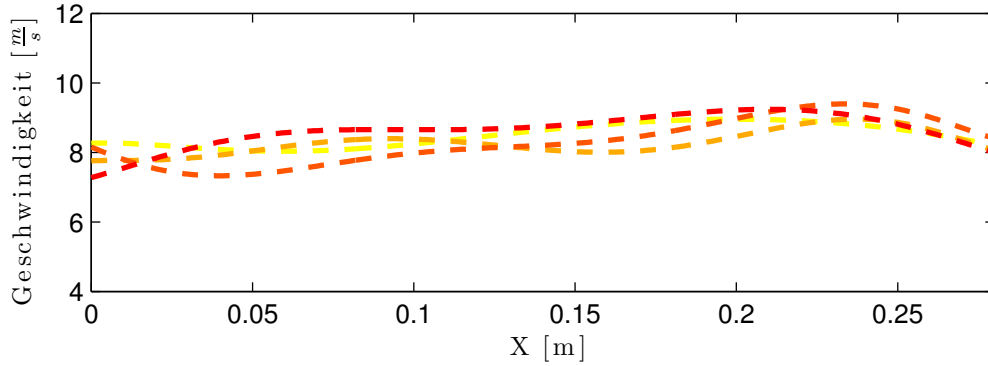
Abbildung 4.11: Typische Einzelprofile bei $\dot{m}'_4$



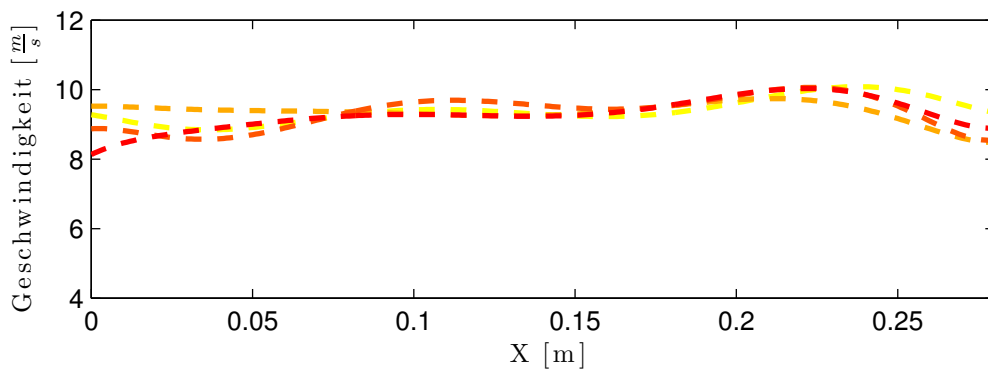
(a) Fallhöhe: 2,5m



(b) Fallhöhe: 4m

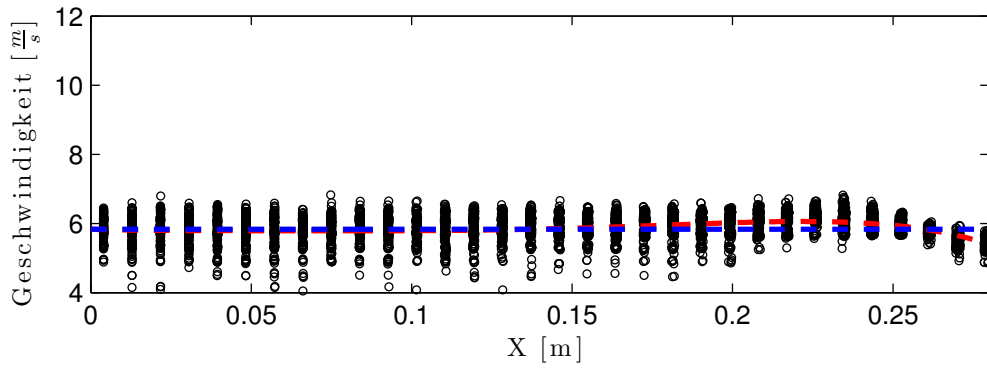


(c) Fallhöhe: 6m

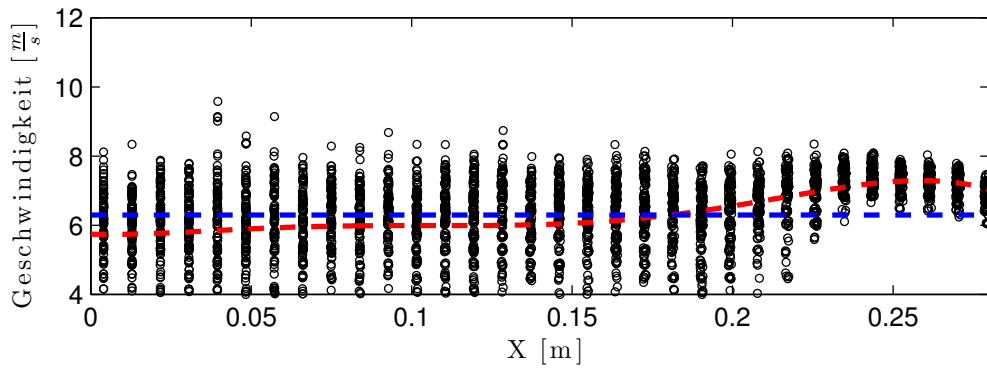


(d) Fallhöhe: 8m

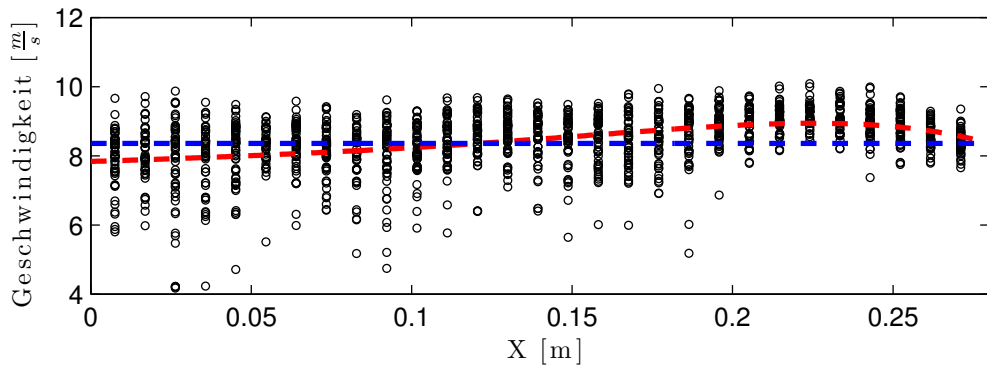
Abbildung 4.12: Instationäres Verhalten bei $\dot{m}'_4$



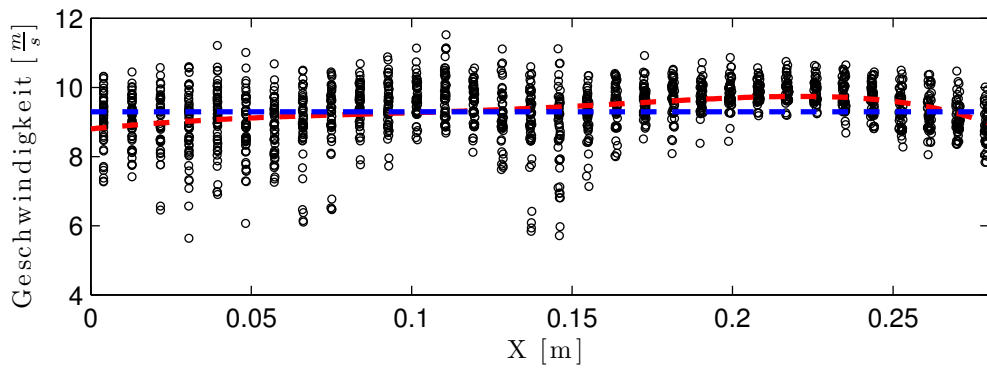
(a) Fallhöhe: 2,5m



(b) Fallhöhe: 4m



(c) Fallhöhe: 6m



(d) Fallhöhe: 8m

Abbildung 4.13: Mittleres Profil bei m'_4

4.3. Transmission

Beim Massenstrom $\dot{m}'_1$ zeigen Transmissionsprofile (Abbildung 4.15) einen Anstieg von der Fallfilmmitte bis zum Außenrand. Bei 4m bzw. 6m Fallhöhe erreicht das Transmissionsprofil im Bereich von $x = 0,25$ volle Transmission. Eine signifikante Aufweitung kann dementsprechend nicht festgestellt werden. Auch bei 8m Fallhöhe lässt sich im selben Bereich ein Maximum mit hohen Transmissionswerten von 0,9 feststellen.

Wie schon beim Massenstrom $\dot{m}'_1$ lässt sich bei $\dot{m}'_2$ keine Aufweitung des Fallfilms erkennen (Abbildung 4.16). Maximale transmission wird ab einem Wert zwischen $x = 0.2$ und $x = 0.25$ erreicht. Das deutet auf ein Einschnüren des Fallfilms. Lage der äußeren Kante variiert allerdings über die Fallhöhe. Das Fallfilmzentrum zeigt die geringste Transmission. Die Streuung der Einzelwerte um das zeitlich gemittelte Transmissionsprofil gibt einen Eindruck über Inhomogenitäten im Fallfilm.

Dieses Verhalten ist auch bei $\dot{m}'_3$ zu beobachten (Abbildung 4.17). Die Einschnürung fällt aber geringer aus. Es ist ein leichter Rückgang der Streuung bei einer Fallhöhe von 8m zu erkennen. Bei 4m Fallhöhe werden sowohl vollständig transparente als auch vollständig lichtdichte Bereiche erkannt. Diese Inhomogenität ist auf Strähnenbildung zurückzuführen (vgl. Abbildung 4.14). Entgegen den Erwartungen zeigen die Daten bei 8m Fallhöhe weniger Inhomogenität. Möglicherweise ist das auf die dort insgesamt niedrigere Helligkeit zurückzuführen (vgl. Kapitel 4.4).

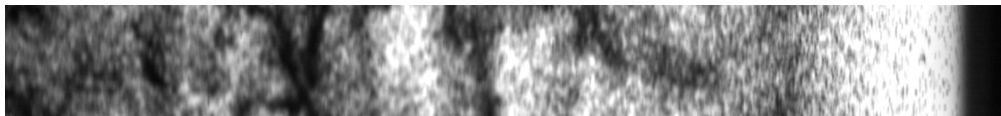
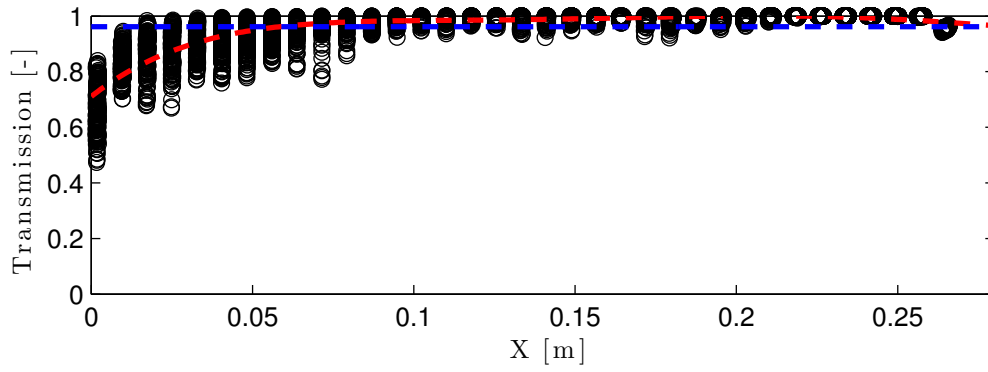


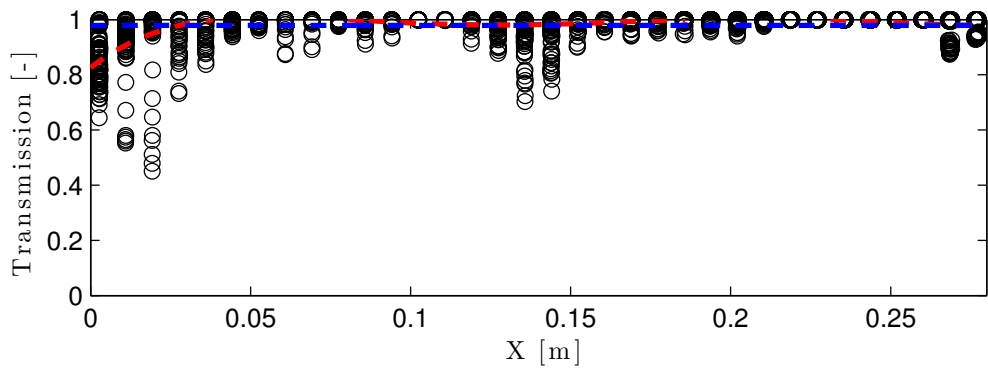
Abbildung 4.14: Strähnenbildung bei $\dot{m}'_3$ und 4m Fallhöhe

Bei $\dot{m}'_4$ lässt sich erstmals eine geringe Aufweitung des Fallfilms feststellen. Das mittlere Transmissionsprofil erreicht erst bei $x = 0,27$ volle Lichtdurchlässigkeit bzw. ein lokales Maximum. Die auf allen Fallhöhen große Streuung deutet an, dass gebildete Strähnen über die volle Fallhöhe bestehen (Abbildung 4.18).

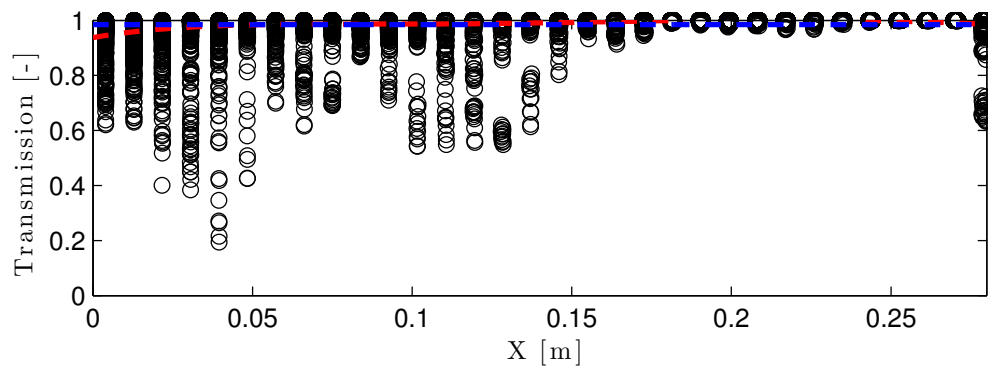
Die erwartete Steigerung der Transmission über die Fallhöhe kann hier nicht durchgängig festgestellt werden.



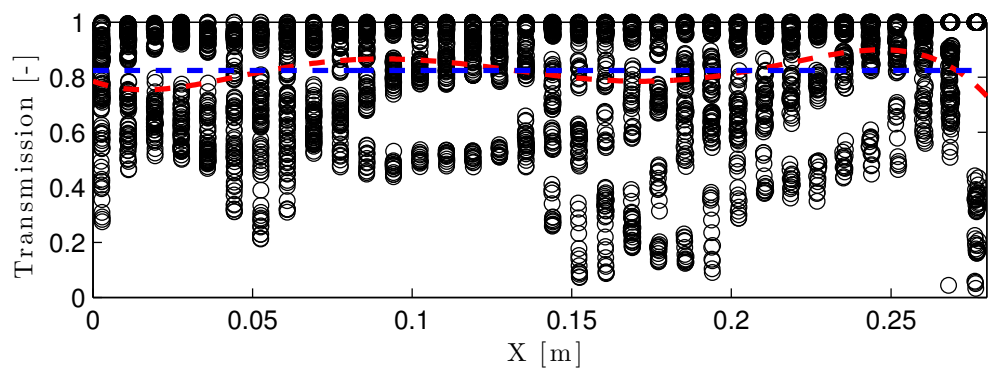
(a) Fallhöhe: 2,5m



(b) Fallhöhe: 4m

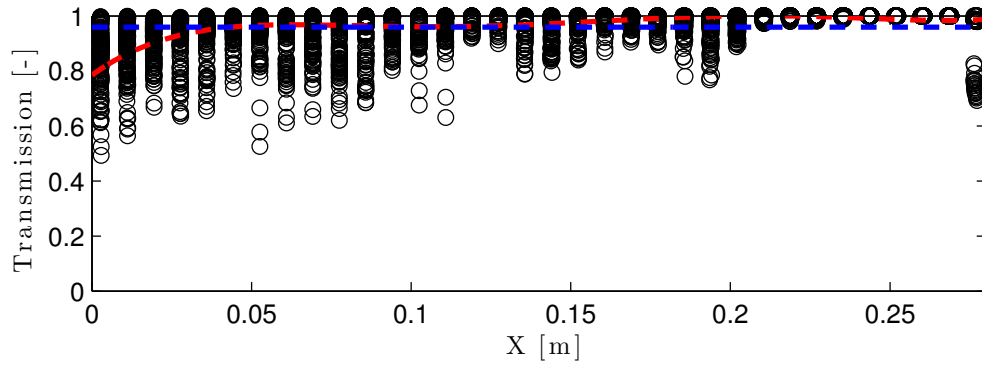


(c) Fallhöhe: 6m

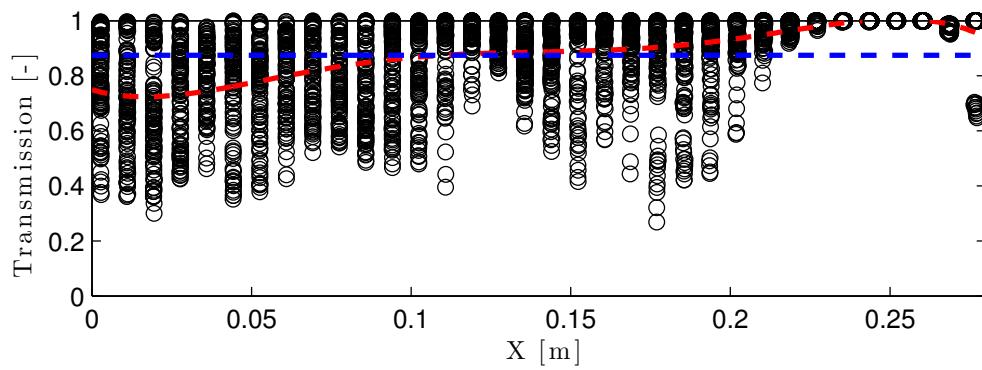


(d) Fallhöhe: 8m

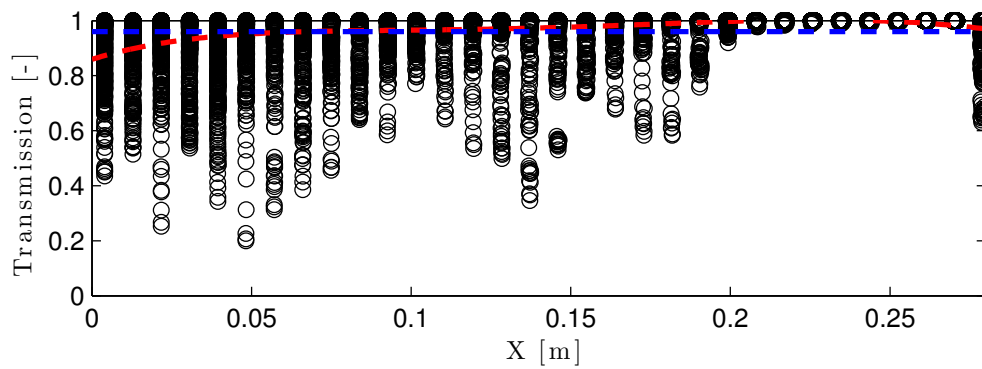
Abbildung 4.15: Mittlere Transmission bei m'_1



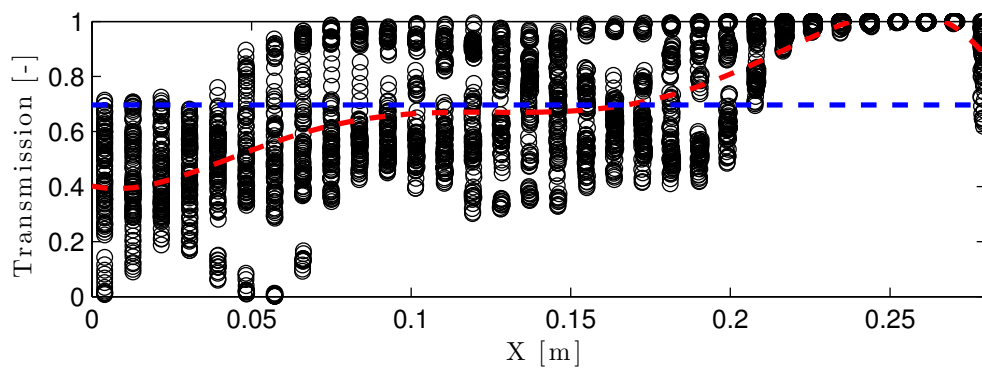
(a) Fallhöhe: 2,5m



(b) Fallhöhe: 4m

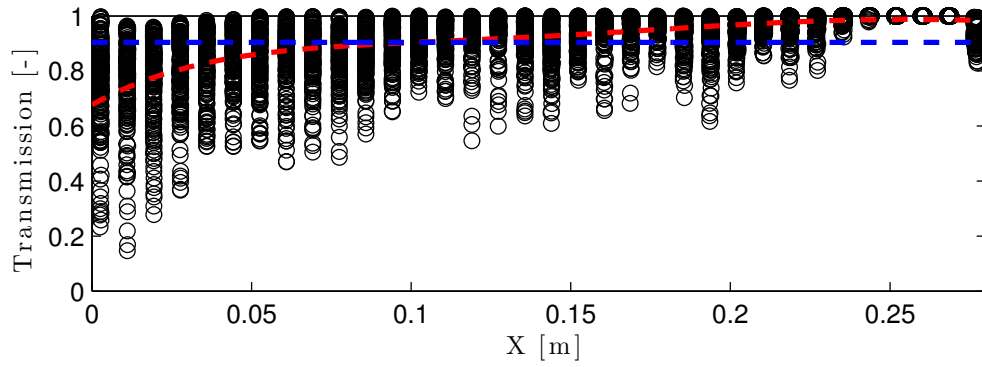


(c) Fallhöhe: 6m

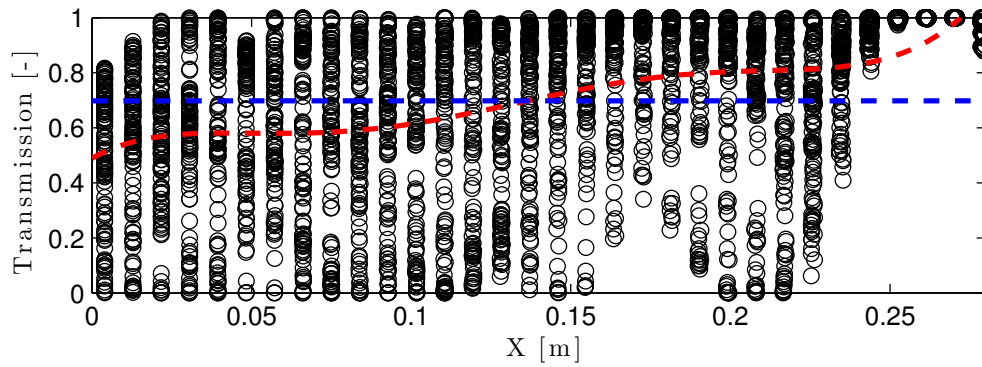


(d) Fallhöhe: 8m

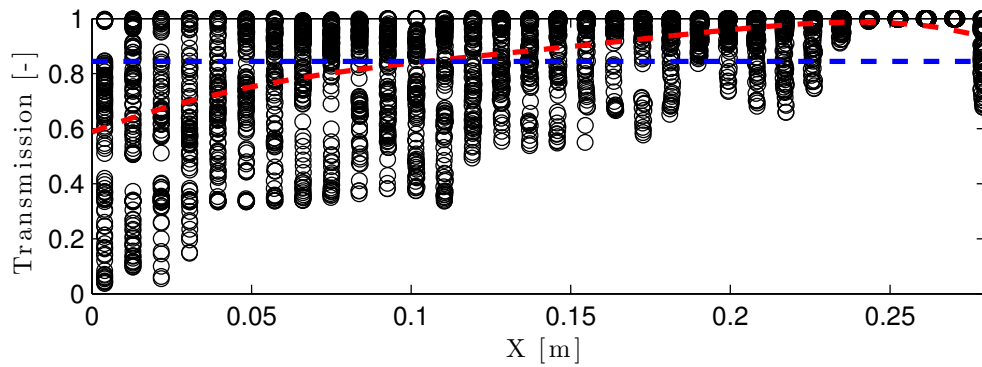
Abbildung 4.16: Mittlere Transmission bei m'_2



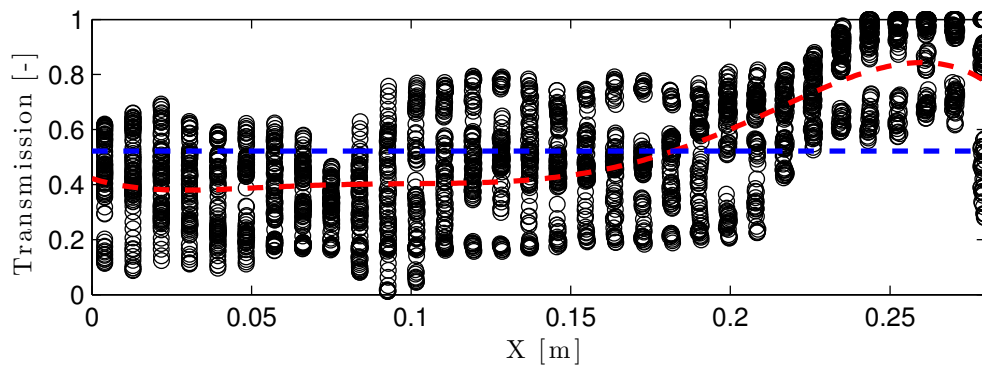
(a) Fallhöhe: 2,5m



(b) Fallhöhe: 4m

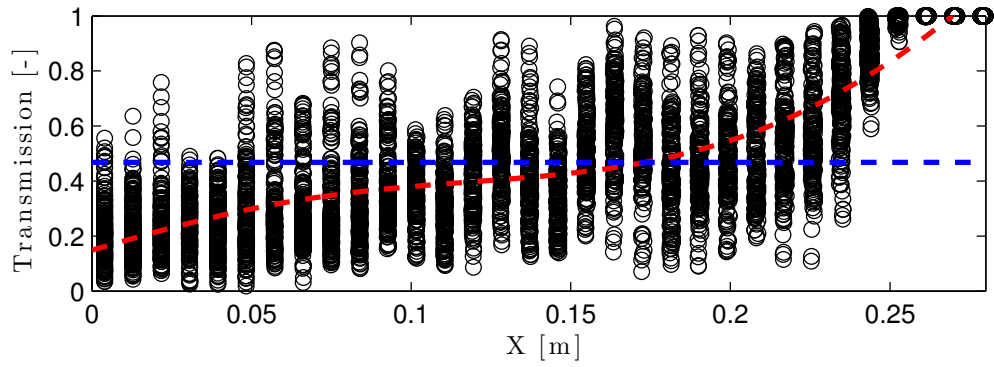


(c) Fallhöhe: 6m

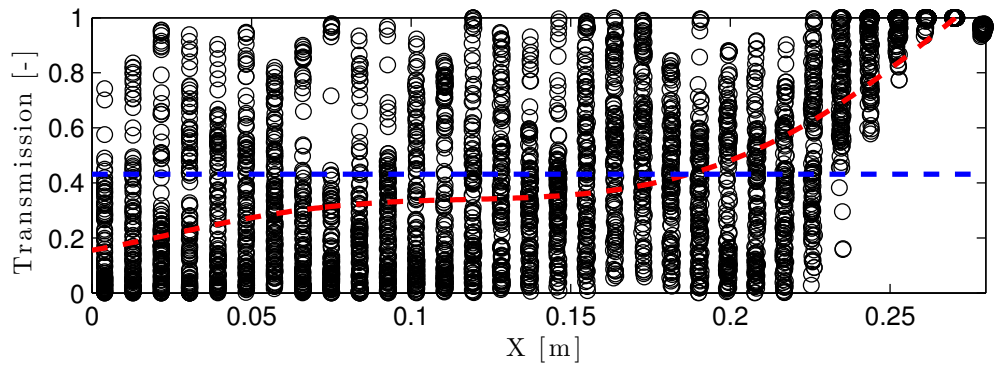


(d) Fallhöhe: 8m

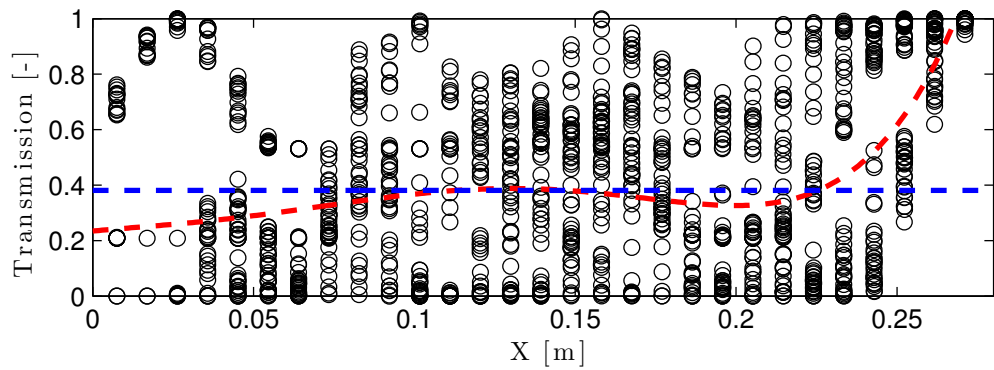
Abbildung 4.17: Mittlere Transmission bei $\dot{m}'_3$



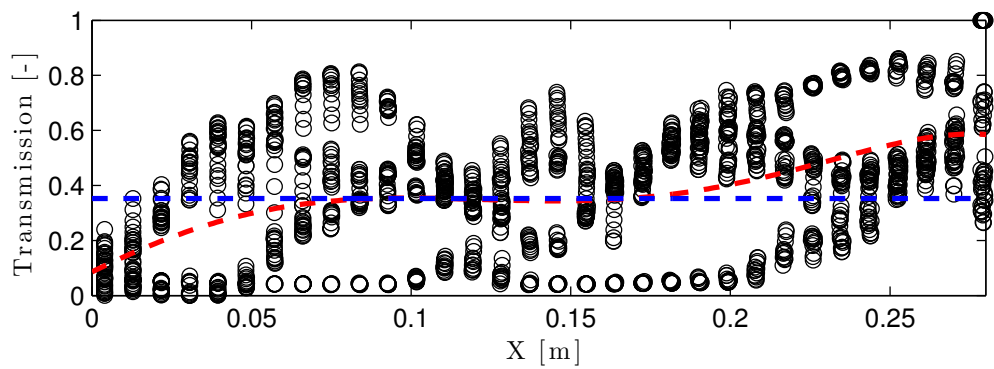
(a) Fallhöhe: 2,5m



(b) Fallhöhe: 4m



(c) Fallhöhe: 6m



(d) Fallhöhe: 8m

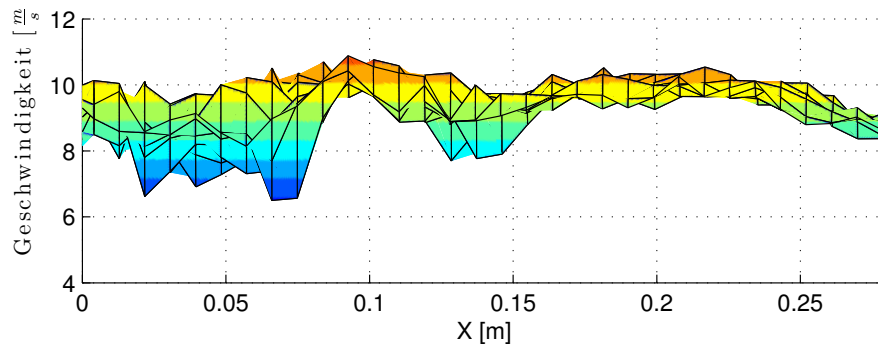
Abbildung 4.18: Mittlere Transmission bei m'_4

4.4. Diskussion

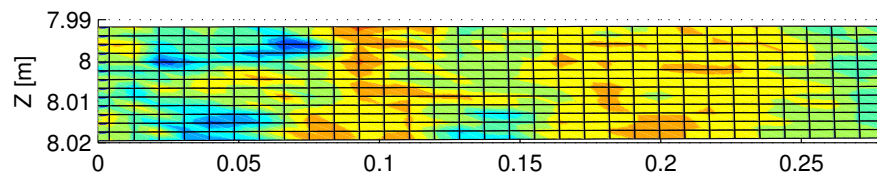
Bei der Analyse der ermittelten Daten lassen sich zwei Auffälligkeiten feststellen. Innerhalb der Geschwindigkeitsprofile, die bei großen Massenströmen entstanden sind, zeigen sich Abweichungen nach unten (vgl. Kapitel 4.2). Unter Vernachlässigung dieser Abweichungen ergibt sich ein glattes Geschwindigkeitsprofil. Das Geschwindigkeitsprofil streut dann nur noch um näherungsweise 4% wie bei $\dot{m}'_1$ und $\dot{m}'_2$. Abbildung 4.19 zeigt einen Vergleich zwischen einem Realbild und dem zugehörigen Geschwindigkeitsprofil mit deutlich größeren Schwankungen. Dabei ist zu erkennen, dass die Abweichungen bei $0,01 < x < 0,07$ und $x = 0,13$ in unscharfen Bildbereichen mit hoher Transparenz entstanden sind. Auch die Anordnung der betrachteten Stellen in der Geschwindigkeitsverteilung entspricht den transparenten Bereichen im Realbild. Über die Bildschärfe bei $x < 0$ lässt sich keine Aussage machen, da der Fallfilm dort nahezu vollständig Blickdicht ist. Für diese Betrachtung bleibt die Stelle daher außen vor. Der Bildbereich mit $x = 0,2$ zeigt auch eine hohe Transparenz, ist aber im Vergleich zu den betrachteten Stellen schärfer. Die Transparenz ist hier darauf zurückzuführen, dass es sich um eine Region in Randnähe des Fallfilms handelt. Auch dieser Bildbereich wird daher für die folgende Betrachtung nicht berücksichtigt.

Eine mögliche Erklärung dafür liegt in der Kalibration der Auswertung. Die Auswahl einer passenden Kalibrationsebene findet während des Versuchs statt und bezieht sich auf den Kernstrom des Fallfilms. Lokal helle und damit transparente Bildbereiche des Fallfilms lassen möglicherweise den Blick auf der optischen Achse nach deutlich tiefer gelegene Strukturen zu. Dafür spricht die beobachtete Unschärfe. Aufgrund des Öffnungswinkels des Strahlengangs zum Objektiv der Kamera ist der beobachtbare Bereich in größerer Bildtiefe größer, sodass Partikelstrukturen mit gleicher Geschwindigkeit langsamer wirken (vgl. Kapitel 3.6). Die Kalibration für den Kernstrom ist also lokal nicht mehr zutreffend. Es entstehen die beobachteten Abweichungen. Gleichzeitig ist es denkbar, dass tatsächlich langsamere Strukturen außerhalb des Kernstroms erfasst werden, da der Fallfilm nicht nur über die Breite sondern auch über die Tiefe der optischen Achse nach ein Geschwindigkeitsprofil ausbildet. In diesem Falle würden sich beide Effekte überlagern. Betrachtet man das Einzelprofil des betroffenen Bildpaares in Abbildung 4.19a, so stellt man fest, dass der Geschwindigkeitsgradient im Randbereich des dichten Fallfilms ($x > 0,25$) recht flach und kaum vom Kernstrom abweichende Streuung festzustellen ist. Dem Gradienten könnten bis zu $2 \frac{m}{s}$ zugeschrieben werden. Ein ähnlicher Gradient ist auch über die Bildtiefenachse beim Verlassen des Kernstroms zu vermuten. Der Gradient kann also nur für einen Teil der festgestellten Abweichung von $4,5 \frac{m}{s}$ oder mehr verantwortlich sein. Daher kann angenommen werden, dass die beschriebene Kalibrationsproblematik zumindest an der Entstehung der Abweichungen beteiligt ist.

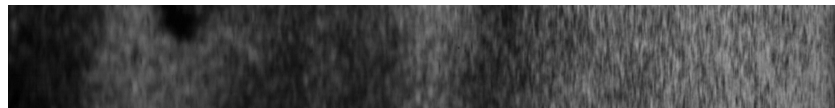
In Bezug auf ermittelte Transmissionswerte fällt der deutliche Abfall des Transmissionsniveaus bei 8m Fallhöhe auf. Dieser Verlauf erscheint nicht sinnvoll, da der Fallfilm vom Silo bis zum Auffangbereich beschleunigt wird und somit die Abstände zwischen Partikeln bzw. Partikelstrukturen anwachsen müssten. Ein Blick auf die Weißbilder der verschiedenen Fallhöhen in Abbildung 4.20 zeigt deutlich unterschiedliche



(a) Geschwindigkeitsprofil



(b) Geschwindigkeitsverteilung



(c) Realbild

Abbildung 4.19: Gegenüberstellung eines Realbildes und der zugehörigen Geschwindigkeitsauswertung

Helligkeitsniveaus. Die einfache Berechnung der Abdunklung durch den Vergleich des Weißbildes mit der Fallfilmaufnahme ist jedoch offensichtlich nicht geeignet, um die Transmission allgemeingültig festzustellen. Um die Bezugshelligkeit als Fehlerquelle auszuschließen, wurde die Transmissionsauswertung zusätzlich mit einer konstanten und für alle Versuche sowie Blöcke gleichen Bezugshellig durchgeführt. Trotzdem fiel die errechnete Transmission bei 8m Fallhöhe ab. Die Auswahl einer geeigneten Bezugshellig ist in diesem Versuch also nicht für das Ergebnis verantwortlich.

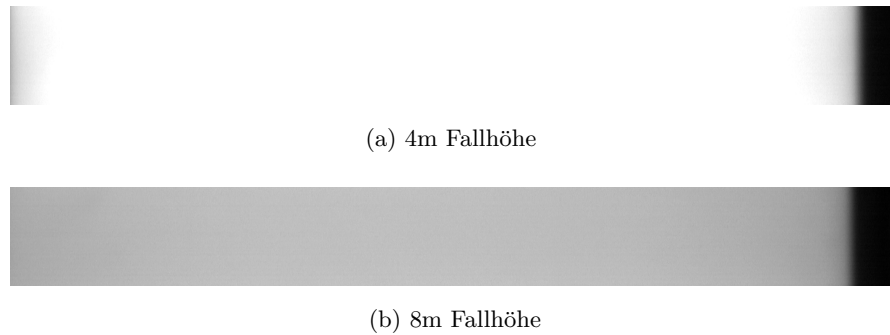


Abbildung 4.20: Vergleich zweier Weißbilder

4.5. Massenstromeinfluss

Zum Vergleich der verschiedenen Massenstromeinstellungen werden in Abbildung 4.21 bis 4.26 mittlere Geschwindigkeiten der Versuche über die Fallhöhe bzw. dem Massenstrom aufgetragen. Alle dargestellten Werte wurden einer zeitlichen Mittelung unterzogen. Die mittlere Fallfilmgeschwindigkeit ist zusätzlich über die Fallfilmbreite gemittelt. Die zentrale Fallfilmgeschwindigkeit wird auch lokal gemittelt, berücksichtigt aber nur Werte zwischen $x = 0$ und $x = 0.05$. Die Maximalgeschwindigkeit stammt aus dem approximierten Geschwindigkeitsprofil unter Berücksichtigung aller ausgewählten Bildpaare und ist unabhängig vom Ort ihres Auftretens. Zum Vergleich werden zusätzlich analytisch Geschwindigkeitswerte eines Einzelpartikels dargestellt. Sie stammen aus einer numerischen Integration und greifen auf empirische Widerstandsbeiwerte für Kugeln zurück [Sch05].

Geringe Massenströme führen tendenziell zu einer geringen mittleren Fallfilmgeschwindigkeit. Die einzige Ausnahme stellt hier die Messung bei $\dot{m}'_4$ und 4m dar. Bei Betrachtung der in Kapitel 4.2 beschriebenen Ergebnisse fällt auf, dass bei diesen Parametern starke Inhomogenitäten im Fallfilm zu beobachten sind, die sich in nicht ortsfesten Bereichen mit sehr niedriger Geschwindigkeit äußern. Diese sind nicht dem Kernstrom zuzuordnen (vgl. Kapitel 4.4). Trotzdem beeinflussen sie die mittlere Fallfilmgeschwindigkeit, was in dem abweichenden Wert resultiert.

Bei der Betrachtung der zentralen Fallfilmgeschwindigkeit ist kein Trend zu erkennen. Die Messungen mit $\dot{m}'_3$ ergeben hier die schnellsten Fallgeschwindigkeiten. Die Messungen mit $\dot{m}'_2$ bzw. $\dot{m}'_1$ liegen darunter und zeigen sehr ähnliche Werte, wobei der geringere Massenstrom hier zu den geringfügig höheren Werten führt. Der mit $\dot{m}'_4$ größte Massenstrom ergibt bis 6m Fallhöhe sehr geringe Geschwindigkeiten. Bei 8m Fallhöhe überschreitet er das Niveau der beiden geringsten Massenströme (Abbildung 4.23).

Eine mögliche Erklärung für dieses Verhaltens liegt in der lokalen Verteilung von Inhomogenitäten, die in den Messergebnissen durch äußerst geringe Geschwindigkeiten auffallen. Diese finden sich tendenziell eher im zentralen Fallfilmbereich (vgl. Kapitel 4.2).

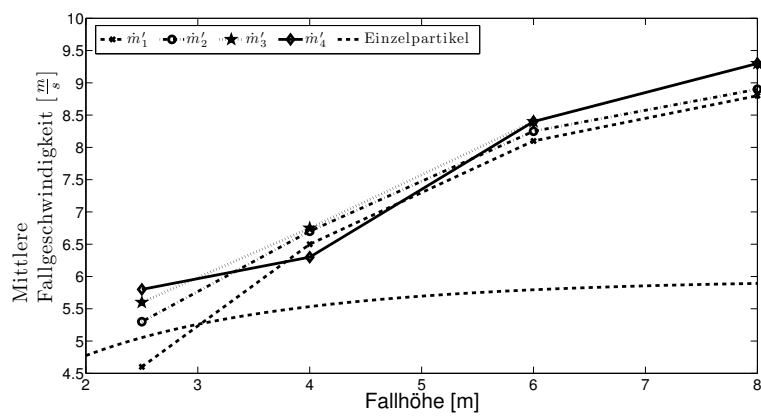


Abbildung 4.21: Mittlere Geschwindigkeit über die Fallhöhe

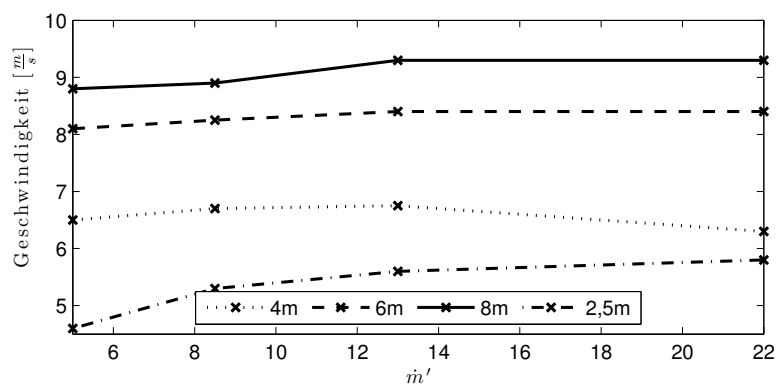


Abbildung 4.22: Mittlere Geschwindigkeit über den Massenstrom

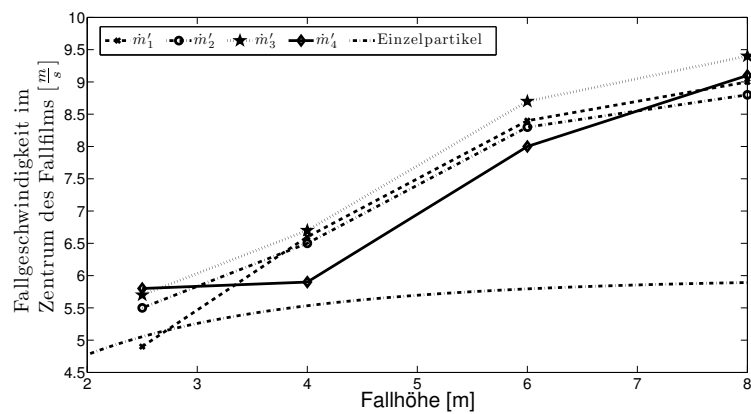


Abbildung 4.23: Geschwindigkeit im Zentrum über die Fallhöhe

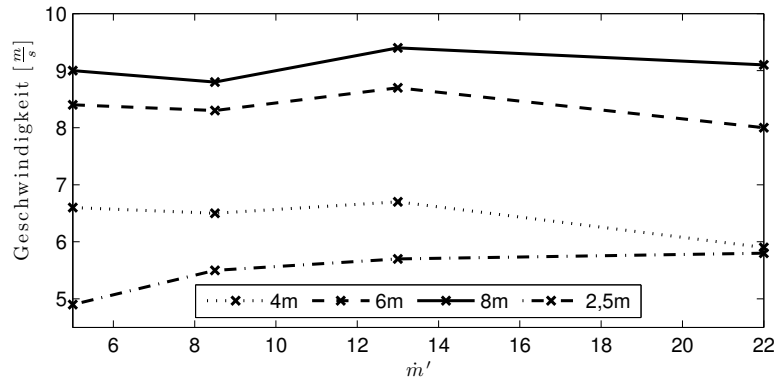


Abbildung 4.24: Zentrale Geschwindigkeit über den Massenstrom

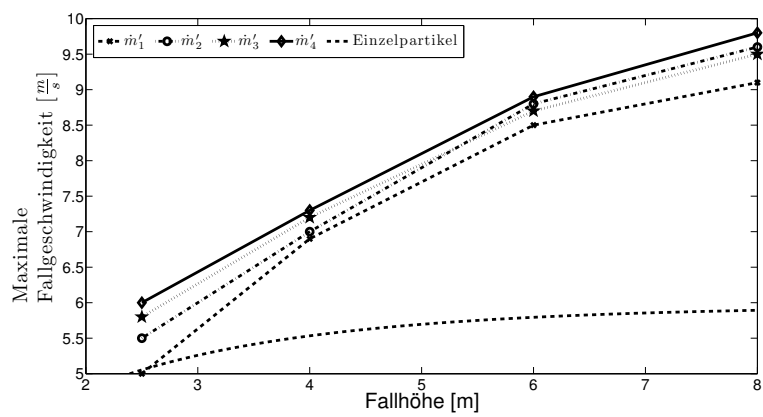


Abbildung 4.25: Maximalgeschwindigkeit über die Fallhöhe

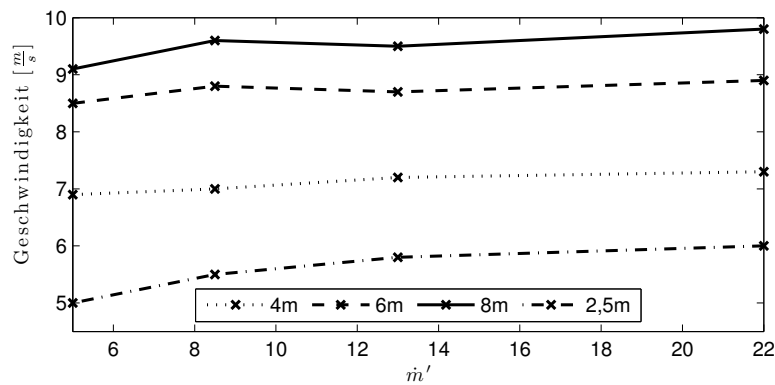


Abbildung 4.26: Maximale Geschwindigkeit über den Massenstrom

Da dort möglicherweise Geschwindigkeiten außerhalb des Kernstroms erfasst werden, über deren Lage keine Aussage getroffen werden kann, ist das Fehlen eines eindeutigen

Trends zu erwarten.

Die Betrachtung der Maximalgeschwindigkeiten der zeitlich gemittelten Profile zeigt wieder die Tendenz, die bereits bei der mittleren Fallfilmgeschwindigkeit festgestellt wurde. Der größte Massenstrom führt zu den größten Geschwindigkeiten, der geringste Massenstrom zeigt die niedrigsten Geschwindigkeiten. Dazwischen angeordnete Messdaten mit $\dot{m}'_2$ und $\dot{m}'_3$ liegen auf sehr ähnlichem Niveau und tauschen die Positionen abhängig von der Fallhöhe.

In Hinblick auf die zu erwarteten Messabweichungen ist festzustellen, dass die zeitliche Mittelung der dargestellten Daten die Messabweichungen aufgrund der Unsicherheiten während der Kreuzkorrelation (vgl. Kapitel 3.6) aufhebt. Es bleibt der Kalibrationsfehler von $\pm 3,6\%$ in sofern tatsächlich der Kernstrom erfasst wurde. Dieser Fehler kann nicht für die Geschwindigkeitsunterschiede von $\approx 10\%$ zwischen dem kleinsten und größten Massenstrom verantwortlich gemacht werden. Dass in Abbildung 4.25 die sehr ähnlich verlaufenden Kurven zu $\dot{m}'_2$ und $\dot{m}'_3$ zum Teil höhere Werte beim geringeren Massenstrom ergeben, ließe sich jedoch durch den Kalibrationsfehler erklären. Insgesamt scheint der Zusammenhang zwischen Massenstrom und Fallgeschwindigkeit daher plausibel.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Messungen liefern in Hinblick auf die Geschwindigkeitsprofile plausible Daten. Die mittlere Geschwindigkeit steigt wie erwartet mit dem Massenstrom und der Fallhöhe. Entsprechende Geschwindigkeitsprofile sind bei geringen Massenströmen kompakt und zeigen den erwarteten Verlauf über die Fallfilmbreite. Abweichungen bei großen Massenströmen können durch den optischen Aufbau erklärt werden. Das eingesetzte Verfahren hat sich daher zur Geschwindigkeitsbestimmung als weitgehend tauglich erwiesen.

Die gesammelten Transmissionsdaten zeigen nicht den erwarteten Verlauf über die Fallhöhe. Ein Vergleich der Weißbilder zeigt unterschiedliche Helligkeitsniveaus zwischen den Aufnahmen auf verschiedenen Fallhöhen auf. Eine Normierung der gemessenen Transmissionsdaten auf im Bild vorliegende Helligkeitsniveaus anhand von Histogrammen führt nicht zur Verbesserung der Ergebnisse. Um aussagekräftige Messdaten zu erlangen, ist es nötig, Fremdlicht aus der Umgebung komplett auszuschließen. Trotzdem können zumindest die während einer Messreihe mit fester Fallhöhe und variierenden Massenströmen aufgezeichneten Daten qualitativ miteinander verglichen werden. Zur Abschätzung der Aufweitung des Fallfilms können die gesammelten Transmissionsdaten zusätzlich genutzt werden.

Das stark instationäre Verhalten und die inhomogene Ausprägung des Fallfilms machen weitere Untersuchungen erforderlich. Beides hat deutlichen Einfluss auf die Qualität der gemessenen Daten. Eine angepasste Auslaufgeometrie stellt einen möglichen Ansatzpunkt zur Verbesserung dar.

Zur sinnvollen Weiterführung der Untersuchung von Fallfilmen bieten sich einige Maßnahmen an, die hier kurz empfohlen werden sollen. Dazu gehört die Anpassung des optischen Aufbaus. Um verschiedene Kalibrationsebenen über die Bildtiefe und die damit einhergehenden Messabweichungen bei inhomogenen Fallfilmen zu umgehen, könnte ein Konkavspiegel zum Einsatz kommen. Der so kollimierte Strahlengang durch den Fallfilm ermöglicht es nur eine einzige, von der Bildtiefe unabhängige Kalibration einzusetzen. Gleichzeitig wird dabei eine deutlich größere Tiefenschärfe erreicht.

Abschließend sind noch Messungen an aufgeheizten beziehungsweise bestrahlten Fallfilmen denkbar. Diese könnten den letzten Schritt vor der Entwicklung eines Prototyps darstellen.

Literatur

- [Bar94] Martin Barthelmeß. *Experimentelle Untersuchung und konstruktive Optimierung des Strömungsverhaltens von Partikeln in der Fallstrecke eines Solarreceivers*. 1994.
- [BP66] Julius S. Bendat and Allan G. Piersol. *Measurement and analysis of random data*. Wiley, New York, 1966.
- [Cou10] European Renewable Energy Council. *Renewable energy in Europe: markets, trends, and technologies*. Earthscan, London, 2nd edition, 2010.
- [GB09] S. Giuliano and R. Buck. *Solar-hybride Gasturbinen-Systeme mit Abwärmenutzung durch Absorptions-Kältemaschinen*. 2009.
- [Let08] Trevor M. Letcher. *Future energy: improved, sustainable and clean options for our planet*. Elsevier, 2008.
- [Sch05] Wolfgang Schröder. *Fluidmechanik*. Wissenschaftsverlag Mainz in Aachen, 2005.
- [Sch10] Y. Scholz. *Möglichkeiten und Grenzen der Integration verschiedener regenerativer Energiequellen zu einer 100-prozentigen regenerativen Stromversorgung der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2050*. 2010.
- [Tör04] Olle Törnblom. *Introduction Course in Particle Image Velocimetry*, 2004.
- [VK10] W. Vogel and H. Kalb. *Large-Scale Solar Thermal Power: Technologies, Costs and Development*. Wiley-VCH, 2010.

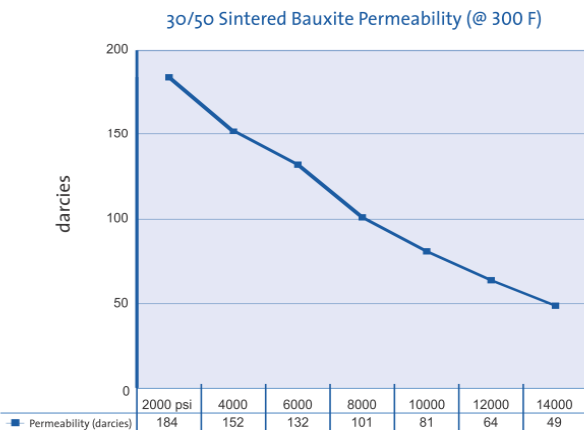
 IT-GOBAIN
OPPANTS

er Road
1, AR 72904
479-782.2001
800.643.2149
479-782.9984
ppants.saint-gobain.com

Size and Shape	
Sieve	Wt.% Retained
+20m	0.0%
+30m	4.0%
+40m	74.0%
+50m	22.0%
<50m	0.0%

Shape/Sphericity (Krumbein & Sloss) 0.9

Bulk Density	2.02 g/cc 125 lbs/ft ³
Specific Gravity	3.49 g/cc
Absolute Volume	0.0347 gal/lb
Acid Solubility	2.2%
Crush Resistance (%)	5000 psi N/A 7500 psi 0.2% 10000 psi 0.6% 12500 psi 1.0% 15000 psi 1.5%



B. Siloabmaße

Projekt DLR
Sonderbehälter ähnlich TCC

ARICON

