



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

PIV-basierte Strömungsmessung im Modellmaßstab: Durchführung und Auswertung

Bachelor Thesis

LuFG Computersimulation für Brandschutz und Fußgängerverkehr
FB D – Abteilung Bauingenieurwesen
Bergische Universität Wuppertal

Betreuer:

Dr. rer. nat. Lukas Arnold

M.Sc. Andreas Meunders

M.Sc. Benjamin Schröder

von

Leonie Rommeswinkel, Matrikelnummer 1121904

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die Bachelor Thesis selbstständig angefertigt und mich dabei nicht anderer als der von mir angegebenen Quellen bedient habe.

Gevelsberg, den

Leonie Rommeswinkel

Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle meinen Betreuern Dr. rer. nat. Lukas Arnold, Andreas Meunders und Benjamin Schröder für ihre Unterstützung während der Durchführung der PIV-Experimente, für ihre ausführliche Hilfe bezüglich des Programms Python und der damit verbundenen Datenauswertung, sowie beim Verfassen dieser Arbeit danken. Außerdem möchte ich mich bei Alexander Belt und Alexander Hundhausen vom IEK-6 für die tatkräftige Unterstützung und Mitarbeit bei der Durchführung der PIV-Experimente bedanken.

Desweiteren bedanke ich mich bei Herrn Dr. Harald Glückler und seinen Laboranten Steffen Wolf und Thomas Luis für die Erstellung der benötigten thermografischen Aufnahmen. Außerdem bedanke ich mich noch bei Herrn Dahlhoff und Herrn Töpfer für die Erstellung des Modelles.

Weiterhin bedanke ich mich bei meiner Familie, die mir mit Rat und Tat stets zur Seite gestanden hat.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	i
Danksagung	ii
Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	vi
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Ziel der Arbeit	1
1.2 Gliederung	2
2 Einführung in die PIV-Messtechnik	3
2.1 Bisheriger Einsatz der PIV-Messtechnik in Brandversuchen	3
2.2 Particle Image Velocimetry (PIV)	4
2.3 Bestandteile der PIV-Messtechnik	5
2.3.1 Tracerpartikel	5
2.3.2 Laser	7
2.3.3 CCD-Kamera	8
2.4 Digitales Auswerteverfahren (Kreuzkorrelation)	9
3 Experimenteller Teil	10
3.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	10
3.1.1 Beschreibung des Versuchsaufbaus	10
3.1.2 Durchführung der Experimente	16
4 Ergebnisanalyse	21
4.1 Erklärung des benötigten Python Skriptes	21
4.2 Auswertung der entstandenen Daten	23
4.3 Fehlerbetrachtung	30
4.4 Vergleichsmessungen zur Fehleroptimierung	31
5 Schlussbetrachtung	36
5.1 Zusammenfassung	36

5.2	Fazit und Ausblick	37
	Literaturverzeichnis	37
A	Python Skript	40
A.1	Erstellung eines Gesamtbildes und dazugehörigen Geschwindigkeitskurven	40

Abbildungsverzeichnis

2.1	Tracerpartikel im Lichtschnitt	5
2.2	Streulichtverteilung eines Öltröpfchens in der Luft	6
2.3	Benötigte Linsen für die Erzeugung eines Lichtschnittes	7
2.4	Aufbau eines Lasers	8
2.5	Bestimmung der Verschiebung zweier Bilder	9
3.1	Versuchsaufbau	10
3.2	Verwendete Kupferheizblock	11
3.3	Imager pro X 2M	12
3.4	Laser Spitlight Compact 200	13
3.5	Aufnahme des Zollstockes	15
3.6	Aufnahme eines Targets	16
3.7	Bildaufnahme des Targets	17
3.8	Beispielhafte Aufnahme des Zollstockes aus der Sicht von beiden Ka- meras	18
3.9	Hintergrundbild	19
4.1	Abbildungen der Ergebnisse für die Messung bei 50 °C	24
4.2	Abbildungen der Ergebnisse für die Messung bei 100 °C	25
4.3	Abbildungen der Ergebnisse für die Messung bei 150 °C	27
4.4	Abbildungen der Ergebnisse für die Messung bei 200 °C	28
4.5	Abbildungen der Ergebnisse für die Messung bei 250 °C	29
4.6	Abbildung der Ergebnisse für die Komplettmessung bei 200 °C mit einem Δt von 1300 μs	32
4.7	Abbildung der Ergebnisse für die Komplettmessung bei 200 °C mit einem Δt von 639 μs	33
4.8	Abbildung der Ergebnisse für die Komplettmessung bei 250 °C mit einem Δt von 497 μs	34

Tabellenverzeichnis

3.1	Technische Daten der CCD-Kamera	12
3.2	Technische Daten des Lasers	13

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Ziel der Arbeit

Diese Abschlussarbeit behandelt das Thema Brandschutz. Der Grundgedanke dieser Abschlussarbeit beschäftigt sich damit, wie sich ein Brand in einem U-Bahnhof ausbreitet. In früheren Zeiten ist es zu gefährlichen Bränden in U-Bahnhöfen gekommen, die sogar zu Todesfällen geführt haben.

Die Experimente in dieser Arbeit sind in Kooperation mit dem Forschungszentrum Jülich durchgeführt worden. Es wird keine realitätsnahe Simulation durchgeführt, sondern ein Brand wird in einer rechteckigen Box simuliert. Dies dient der Sammlung von ersten Erfahrungen in der Durchführung und Auswertung von Strömungen im Modellmaßstab. In dieser Arbeit wird der Fokus auf einen Auftriebsstrahl, der sich oberhalb eines elektrisch beheizten Kupferblocks befindet, gelegt. Dabei wird in diesem Experiment die Strömung der erwärmten Luft, die sich oberhalb des Heizblocks befindet, analysiert. Diese Strömung wird für verschiedene Temperaturen ausgewertet. Problematisch ist in diesem Fall die erwärmte Luft zu verfolgen und zu analysieren.

Derzeit überwiegen Verfahren, die auf der Punktmessung basieren. Diese Verfahren messen im Allgemeinen nur einzelne Punkte. Daher sind diese Verfahren für die Messungen von ganzen Bereichen und Messungen von auftretenden Wirbeln ungeeignet. In diesem Experiment sind der Auftriebsstrahl sowie die entstehenden Wirbel von großer Bedeutung. Um den Auftriebsstrahl analysieren zu können, wird hier eine der Ganzfeldmethoden eingesetzt. Diese ermöglicht einzelne Bereiche zu erfassen. Die vorher erwähnte Ganzfeldmethode ist noch nicht weit verbreitet, sie wird unter dem Namen Particle Image Velocimetry (PIV) geführt. Diese Messtechnik ist 1977 im Bereich der Hydromechanik vorgestellt worden [ZACHOS, 1993]. Die Particle Image Velocimetry ist ein Werkzeug zur Charakterisierung von instationären Strömungen. Allerdings ist diese Technik bis jetzt nur unzureichend für die Auswertungen bezüglich des Brandschutzes eingesetzt worden [DEIMLING, 1999].

In diesem Verfahren werden der erwärmten Luft Partikel hinzugefügt, welche von einem Laser angestrahlt werden. Diese Partikel streuen das Licht und somit kann es von einer CCD-Kamera aufgenommen werden. Es werden zwei Bilder kurz hintereinander erstellt. Mit Hilfe eines Auswerteverfahrens kann der Weg der Partikel berechnet werden.

Durch die Messungen mit der Particle Image Velocimetry sollen die Strömungen bei unterschiedlichen Temperaturen klar definiert werden. In der vorliegenden Arbeit wird der Aufbau eines PIV-Systems sowie die Auswertung dieser Aufnahmen beschrieben.

Ziel dieser Abschlussarbeit ist es, die Particle Image Velocimetry für die Anwendung im Brandschutz speziell auf die Strömungen im Modellmaßstab zu bearbeiten und dabei die Einsatzbedingungen und die Grenzen dieser Messmethode zu erkennen. Aus den hierbei entstandenen Ergebnissen sollen Optimierungen für die Verwendung der Particle Image Velocimetry im Bereich des Brandschutzes diskutiert werden.

1.2 Gliederung

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in vier Hauptteile. Zuerst wird ein Einblick in die Particle Image Velocimetry gegeben (Kap. 2, 3 und 4). Außerdem werden in diesem Teil die einzelnen Bestandteile einer PIV-Messtechnik erläutert und beschrieben.

Der zweite Teil beschreibt den verwendeten Versuchsaufbau sowie die Durchführung des Experimentes (Kap. 5).

Im dritten Teil dieser Arbeit (Kap. 6, 7 und 8) werden die Ergebnisse aus der Particle Image Velocimetry Messung aufgezeigt und analysiert. Am Ende des dritten Teils werden die möglichen Fehler betrachtet, die bei der Durchführung und Auswertung der Experimente aufgefallen sind.

Im letzten Hauptteil, der Schlussbetrachtung (Kap. 9), wird eine kurze Zusammenfassung dieser Arbeit, ein Fazit sowie ein Ausblick aufgezeigt.

2 Einführung in die PIV-Messtechnik

2.1 Bisheriger Einsatz der PIV-Messtechnik in Brandversuchen

Die Particle Image Velocimetry Messtechnik (nachfolgend PIV-Messtechnik genannt) ist erst in wenigen Experimenten für den Brandschutz eingesetzt worden. Erste Versuche mit der PIV-Messtechnik sind von Kawagoe (1958) sowie McCaffrey und Rockett (1977) durchgeführt worden. Bei diesen Versuchen wurde gemessen, wie sich die Belüftung eines Raumes auf die Strömungen von feuererwärmter Luft sowie deren entstehender Oxidationsprodukte auswirkt. Allerdings sind diese Messungen nur mit wenigen Messfühlern durchgeführt worden. Die Messfühler stellen die Druckunterschiede und die Temperaturen dar. Diese Untersuchungen beruhen auf der Bernoulli Gleichung und der Annahme, dass es nur eindimensionale Strömungen gibt. [BRYANT, 2009]

Spätere Messungen mit der PIV-Messtechnik sind von I. Nakaya, T. Tanaka, M. Yoshida und K. Stechler durchgeführt worden. Die Forscher haben zudem auch die Strömungen, die durch eine Türöffnung entweichen, gemessen. Hierbei hatte die Tür einen Anschluss zu einem zweiten Raum.

Als Energiequelle diente dort ein Propan-Diffusionsbrenner. Die Stärke des Feuers und die Breite der Türöffnung sind in diesen Versuchen variiert worden. Innerhalb der Öffnung ergaben die Messungen zweidimensionale Geschwindigkeiten und Temperaturprofile. Außerdem wurden vertikale Gastemperaturprofile in den beiden Räumen erstellt. [STECHLER, 1986]

Rodney A. Bryant hat weitere Experimente über die Belüftung eines Raumes, indem sich ein Feuer befindet, durchgeführt. Er untersuchte die Strömungen der warmen Luft sowie der Oxidationsprodukte des Brandes die durch eine Türöffnung nach außen entweichen. Desweiteren beobachtete er das Verhalten der Frischluft die in das Gehäuse strömt. Mit Hilfe der PIV-Technik entwickelte er zeitlich gemittelte Geschwindigkeitsfelder, welche in der Türöffnung auftreten. [BRYANT, 2009].

2.2 Particle Image Velocimetry (PIV)

Die Particle Image Velocimetry (kurz: PIV) ist eine Messtechnik, die für die Geschwindigkeitsmessungen von Partikeln eingesetzt wird. Diese Technik ist ein berührungsloses optisches Verfahren [BLUMRICH, 2009]. Folgende Bestandteile gehören zu einem PIV-System:

- Lichtstreuende Tracerpartikel
- Laser
- Hochauflösende CCD-Kamera
- Computer mit entsprechendem Auswertungsprogramm

Bei der PIV-Messtechnik wird mit Hilfe eines Lasers ein Lichtschnitt erzeugt, der die strömenden Partikel anstrahlt. Trifft das Licht auf diese Partikel, wird es gestreut und somit kann die Kamera die Partikel erfassen. Die Kamera nimmt zu zwei kurz hintereinander folgenden Zeitpunkten die Partikel in der ausgewählten Ebene auf [BLUMRICH, 2009]. Diese Momentaufnahmen können von einem ebenen Bereich erstellt. Dies ist unter anderem ein wichtiges Merkmal der PIV-Messtechnik, da sie einen ganzen Bereich aufnehmen kann und nicht wie andere Messtechniken z.B. wie die Laser-Doppler-Anemometrie (kurz: LDA), die nur einzelne Partikel aufnimmt. Die PIV-Messtechnik wird auch Ganzfeldmethode genannt [ZACHOS, 1993]. Ein weiteres Merkmal dieser Technik ist, dass schon an wenigen Aufnahmen Veränderungen in einer Strömung erkennbar sind, wie z.B. Wirbel.

Mit einer CCD-Kamera werden zwei hintereinander folgende Aufnahmen erstellt, hiermit lässt sich der Weg Δx eines Partikels, den er zwischen den beiden Aufnahmen zurückgelegt hat, bestimmen. Das Programm, mit dem die Auswertung durchgeführt wird, verfolgt somit einzelne Partikel und kann den Weg, den ein Partikel zurückgelegt hat, darstellen. In diesem Programm wird außerdem ein Zeitabstand Δt eingetragen, der angibt, in welchem definierten zeitlichen Abstand der Laser zwei kurze Lichtimpulse aussendet. Durch die Bestimmung des Weges und des Zeitabstandes lässt sich die Geschwindigkeit wie folgt berechnen:

$$\text{Geschwindigkeit: } v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Diese Gleichung berechnet die Geschwindigkeit eines lichtstreuenden Partikels, welcher der Luft oder einem Fluid hinzugefügt worden ist [ZÄHRINGER]. Die lichtstreuenden Partikel stehen stellvertretend für ein zu untersuchendes Medium, z.B. für die erwärmte Luft. Die Geschwindigkeit des Mediums kann meistens nicht gemessen werden und somit kommt es zum Einsatz der lichtstreuenden Partikel.

Um die passenden Partikel auszuwählen wird überprüft, ob sie der Strömung sehr genau folgen. Die Partikel sollten eine geringe Trägheit aufweisen und schnell auf Veränderungen der Strömung reagieren. Ein weiteres Kriterium sollte sein, dass die Partikel ausreichend sedimentieren. Alle vorher erklärten Voraussetzungen müssen

erfüllt sein, damit der Versuch Ergebnisse liefert, die mit der Realität vergleichbar sind. Die Geschwindigkeit des Mediums wird dann indirekt über die Partikel bestimmt.

2.3 Bestandteile der PIV-Messtechnik

2.3.1 Tracerpartikel

Tracerpartikel werden für die Kamera sichtbar, indem sie das vom Laser ausgestrahlte Licht streuen. Die Abbildung 2.1 zeigt die angestrahlten Tracerpartikel im Lichtschnitt. Der abgebildete Versuchsaufbau ist jedoch nicht exakt der Aufbau, der für die Auswertung verwendet worden ist. Diese Abbildung soll verdeutlichen, wie ein Lichtschnitt aussieht. Der richtige Aufbau ist in Abbildung 3.1 zusehen.

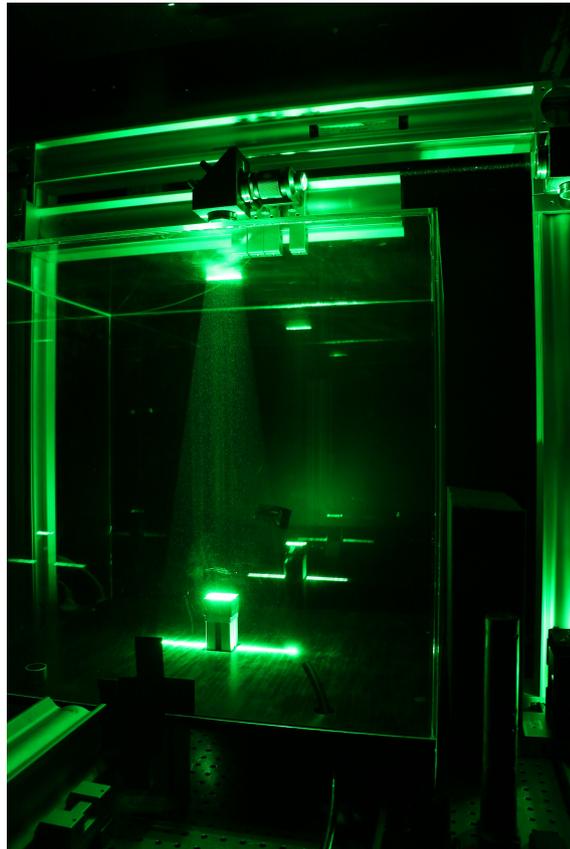


Abbildung 2.1: Tracerpartikel im Lichtschnitt

Das von den Tracerpartikeln gestreute Licht wird von der CCD-Kamera in zwei kurz hintereinander folgenden Aufnahmen erfasst.

Es gibt mehrere Kriterien, die Tracerpartikel erfüllen müssen:

- Gutes Folgevermögen
- Gutes Streuvermögen
- Keine Beeinflussung der Strömung
- Kleine kugelförmige Partikel

Von großer Bedeutung ist die Frage, wie viel Licht die einzelnen Partikel streuen. Um das zu bestimmen, benötigt man eine maßgebende Kenngröße, die Brechzahl. Diese Zahl gibt an, wie groß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes ist [SPEKTRUM]. Eine hohe Brechzahl steht für ein optisch dichteres Medium. Im Umkehrschluss gibt eine niedrigere Brechzahl ein optisch dünneres Medium an [CHEMIE.DE]. Der Brechungsindex ist das Verhältnis zwischen der Vakuumgeschwindigkeit und der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts. Um so größer dieses Verhältnis ist, desto mehr Licht wird gestreut [SIGRIST PROCESS-PHOTOMETER]. Neben dem Brechungsindex spielen auch der Beobachtungswinkel sowie die Wellenlänge eine große Rolle.

Wenn kleine kugelförmige Partikel vorliegen mit einem Durchmesser, der ähnlich dem der Wellenlänge des eingestrahlteten Lichtes ist [BLUMRICH, 2009], kann die Mie-Streuung als physikalisches Modell für die Streuung des Lichtes verwendet werden. Für die Messung von Strömungsgeschwindigkeiten unter Anwendung der Particle Image Velocimetry wird häufig die Mie-Streuung benutzt [LAVISION, C].

Die Abbildung 2.2 stellt die Verteilung der Mie-Streuungsintensität für Ölpartikel in der Luft mit einer Wellenlänge von 532 nm dar [KOMPENHANS, 2007].

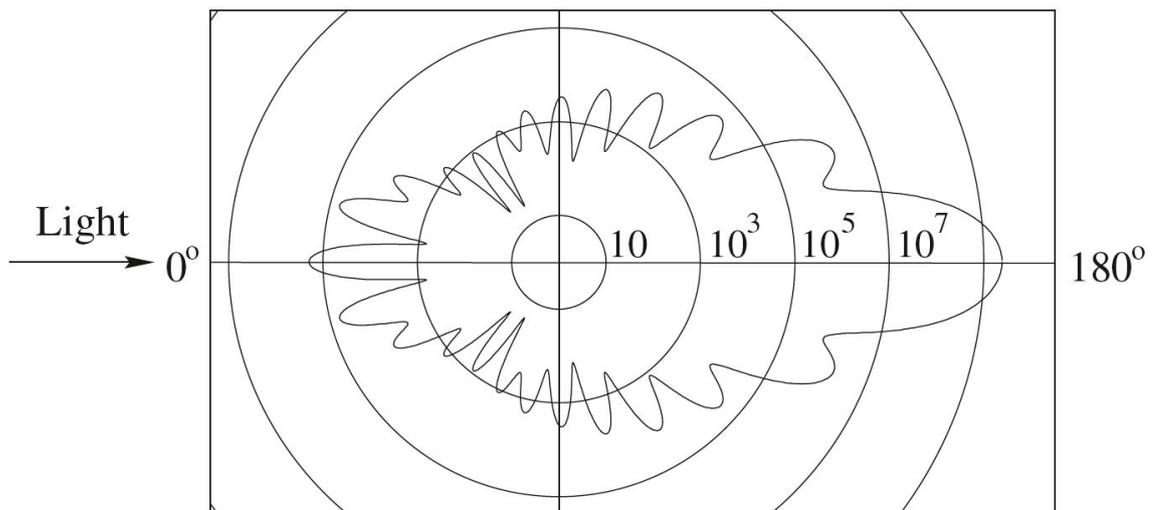


Abbildung 2.2: Streulichtverteilung eines Öltröpfchens in der Luft [KOMPENHANS, 2007]

Dieses Polardiagramm ist so aufgebaut, dass auf der x-Achse der Streuwinkel ange-
tragen ist. Da bei der Mie-Streuung speziell für kleine Teilchen eine starke Winkelab-
hängigkeit existiert, muss diese Abhängigkeit berücksichtigt werden, um erfolgreich
die Experimente durchführen zu können [LAVISION, C].

Die Intensitätsskalen sind logarithmisch skaliert und geplottet, sodass die Intensität
für benachbarte Kreise sich um einen Faktor 100 unterscheidet.

Die Lichtintensität lässt sich wie folgt berechnen: $q = \frac{\pi \cdot d}{\lambda}$ [KOMPENHANS, 2007].

Aus der Streulichtverteilung wird deutlich, dass die Beobachtung von Tracerparti-
keln unter einem Winkel von 90 Grad einige Nachteile mit sich bringt. Die Streuin-
tensität ist am größten, wenn das Licht mit einem Winkel von 180 Grad auftritt
[KOMPENHANS, 2007].

2.3.2 Laser

Die Beleuchtung der einzelnen Tracerpartikel wird in den meisten Fällen in der
PIV-Messtechnik mit einem Laser durchgeführt. Der Laser hat die Möglichkeit zwei
Impulse mit sehr hoher Energie auszustrahlen. Diese hohe Energie ist nötig, damit
die Tracerpartikel auch in der kurzen Zeit ausreichend beleuchtet werden [BREUER].
Andere Lichtquellen können diese Fähigkeit nicht aufweisen. Der Laser wird benutzt,
um einen Lichtschnitt zu erzeugen, dieser wird durch eine zylindrische Linse und zwei
Teleskoplinsen erzeugt. In Abbildung 2.3 sind die drei benötigten Linsen zu sehen.

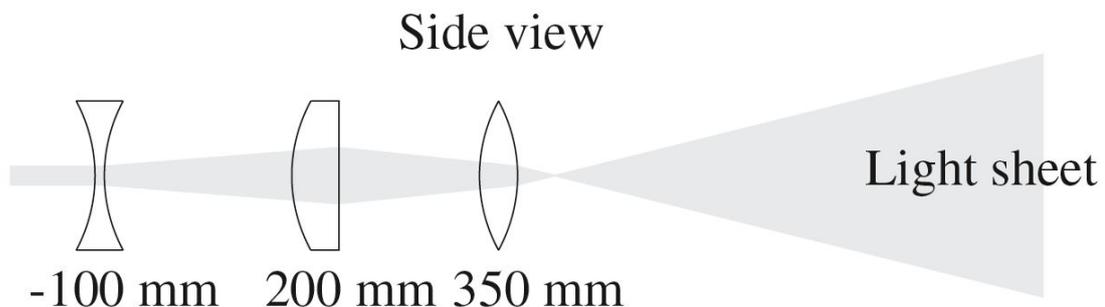


Abbildung 2.3: Benötigte Linsen für die Erzeugung eines Lichtschnittes [KOMPENHANS, 2007]

Eine Anforderung an den Lichtschnitt ist, dass er in allen Bereichen die gleiche Inten-
sität besitzt. Ein Lichtschnitt in der PIV-Messung ist notwendig, damit alle Partikel
angestrahlt werden. Dies ist mit einem einzelnen Strahl nicht möglich. Wichtig für
die Aufnahmen ist, dass der Lichtschnitt orthogonal zur CCD-Kamera liegt.

Die Wellenlänge für Laser in der PIV-Messtechnik liegt meistens bei 1064 Nano-
meter. Mit dieser Wellenlänge befindet sich der Laser schon im Infrarotbereich und
ist somit sehr gefährlich für den Menschen. Um Gefährdungen von Strahlungen zu
minimieren, wird mit einem Frequenzverdoppler die Wellenlänge auf 532 Nanometer
reduziert. Diese Wellenlänge liegt im sichtbaren grünen Bereich. Die Sichtbarkeit des

Laserstrahls vereinfacht somit zusätzlich die Justierung des Lasers.

In Abbildung 2.4 ist die Konstruktion eines Lasers zu sehen.

Es werden zwei Laserstrahlen zusammen gelegt, sodass sie dieselbe Richtung aufweisen. Dieser Strahl wird durch den Frequenzverdoppler geleitet und reduziert. Die restlichen Infrarotstrahlen werden mit Hilfe der Laserfalle absorbiert.[BREUER]

Um Laser klassifizieren zu können, werden sie in Gefährdungsklassen eingeteilt. Diese Klassen geben an, wie gefährlich der Strahl des Lasers für die Augen und die Haut ist [DOKU.NET].

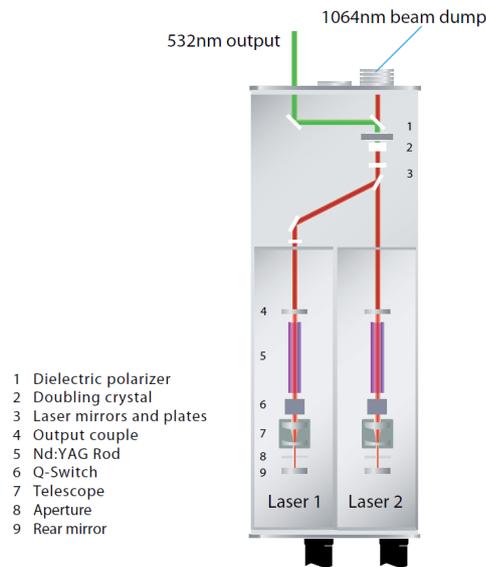


Abbildung 2.4: Aufbau eines Lasers[BREUER]

2.3.3 CCD-Kamera

In der modernen PIV-Messtechnik werden CCD-Kameras verwendet. Die Abkürzung CCD steht für charge-coupled-device. Der integrierte CCD-Sensor ermöglicht Aufnahmen mit kurzer Belichtungszeit, da diese Sensoren sehr lichtempfindlich sind.[BREUER]

Eine CCD-Kamera funktioniert aus diesem Grunde ähnlich wie eine analoge Kamera. Das Licht fällt durch eine Linse auf ein Fotomaterial und wird weiterverarbeitet zu einem Bild. Die CCD-Kamera verwendet allerdings kein Negativ, sondern einen Chip. Die Optik der Kamera fängt einen Teil des Lichtes ein und bildet diesen auf einer Bildebene ab. Die ankommenden Lichtteilchen werden pixelweise in die Bildebene integriert und in Ladungen umgewandelt. Sie werden in Form eines digitalen Bildes abgespeichert [KRIEGER].

Die Kamera nimmt in einem zeitlichen Abstand von 500-1300 Mikrosekunden zwei kurz hintereinander folgende Bilder auf. Eine entsprechende Schaltelektronik sorgt dafür, dass die Kamera ein Bild ablichtet, wenn der Laser die Partikel beleuchtet. Diese Aufnahmen werden digital an den PC gesendet. Da die einzelnen Aufnahmen in digitaler Form vorliegen, können die Bilder direkt ausgewertet werden.

2.4 Digitales Auswerteverfahren (Kreuzkorrelation)

Die Kreuzkorrelation ist eine numerische Methode. In der PIV-Technik wird diese eingesetzt, um einen Weg bzw. eine zurückgelegte Strecke zu bestimmen. Dieser Weg wird benötigt, um die Geschwindigkeit mit Hilfe der Zeitdifferenz zu berechnen. Da die Experimente nur zweidimensional ausgewertet werden, erläutert dieses Kapitel die zweidimensionale Kreuzkorrelation. In Abbildung 2.5 wird die Bestimmung des Verschiebungsvektors anhand zweier Bilder dargestellt.

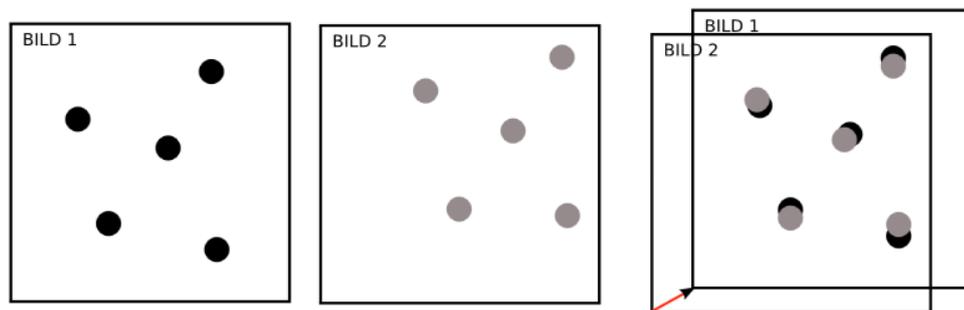


Abbildung 2.5: Bestimmung der Verschiebung zweier Bilder [BLUMRICH, 2009]

Für die Auswertung werden die Aufnahmen in kleine Bildbereiche aufgeteilt, sogenannte interrogation windows. Diese müssen quadratisch sein und die Kantenlänge, angegeben in Pixel, sollte eine gerade Zahl sein [KYKAL, 2010]. Die Bildbereiche werden mit Hilfe einer Computereinstellung vorgenommen und separat ausgewertet. Es wird immer ein Geschwindigkeitsvektor für einen Bereich ermittelt [KRIEGER]. In einem Bereich mit hoher Partikeldichte wird die Geschwindigkeit über alle sich darin befindenden Partikel gemittelt. Jedoch führt eine zu hohe Partikeldichte zu einer geringen Anzahl der Zuordnung einzelner Partikelpaare in einem Bildbereich [KYKAL, 2010].

3 Experimenteller Teil

3.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

3.1.1 Beschreibung des Versuchsaufbaus

Das Experiment findet in einer Laserbox statt, da hier mit einem gefährlichen Laser gearbeitet wird. Diese ist 3,00 m lang und 2,00 m breit. In dieser Laserbox steht eine Plexiglasbox (wie in Abbildung 3.1 zu sehen), in welche die Tracerpartikel eingebracht werden.

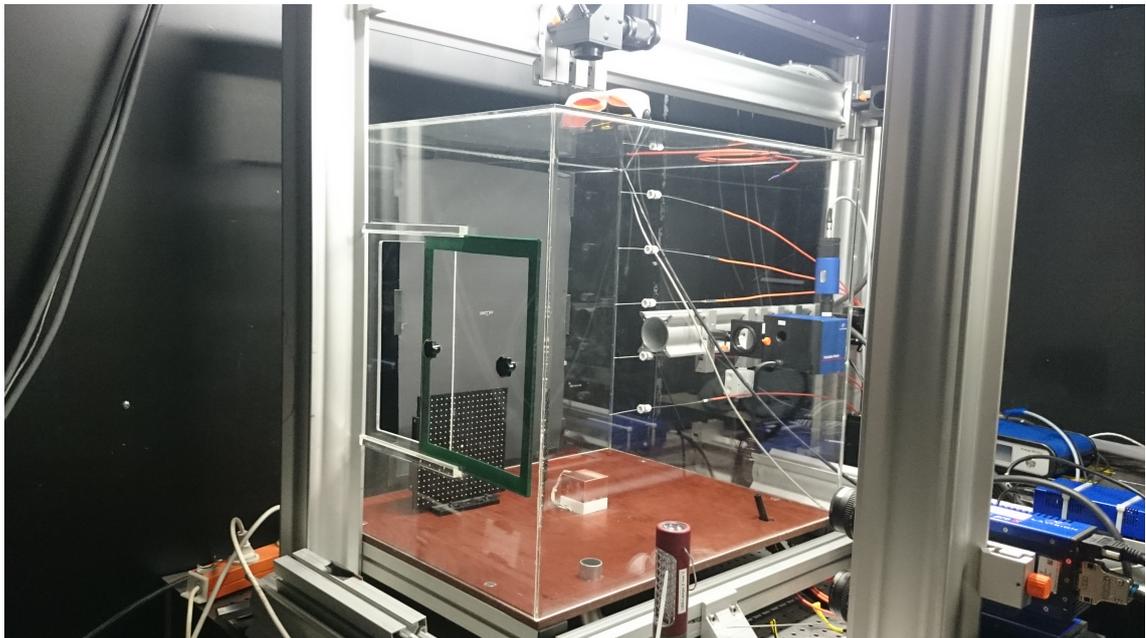


Abbildung 3.1: Versuchsaufbau

In dem folgenden Experiment werden als Tracerpartikel DEHS eingesetzt. DEHS ist die Abkürzung für Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat. Diese Flüssigkeit hat einen Brechungsindex von ca. 1,45 (Verhältnis zwischen der Vakuumgeschwindigkeit und der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes). Im Vergleich dazu hat Luft einen Index von

ca. 1,00. DEHS ist wasserunlöslich, farb- und geruchlos.

Die Tracerpartikel werden häufig für optische Messverfahren eingesetzt. Ein Vorteil dieser Flüssigkeit ist, dass sie eine sehr lange Standzeit besitzt und nach einiger Zeit rückstandsfrei verdampft.

In diesem Experiment werden Tracerpartikel der Firma TOPAS verwendet. Die Partikelgröße liegt zwischen $0,2\ \mu\text{m}$ und $0,3\ \mu\text{m}$. Die Siedetemperatur liegt zwischen $232\ ^\circ\text{C}$ und $249\ ^\circ\text{C}$ [TOPAS GMBH].

Der Versuch wird bei einer Temperatur von höchstens $250\ ^\circ\text{C}$ durchgeführt. Die Luft, in der sich die Tracerpartikel befinden, heizt sich jedoch nur genau oberhalb des Heizblockes auf oben genannte Temperatur auf. Die Luft, die sich im oberen Bereich der Plexiglasbox befindet, heizt sich auf ca. $30\ ^\circ\text{C}$ auf. Jedoch ist nicht ganz klar, ob die Tracerpartikel über dem Heizblock verdampfen können.

Die verwendete Plexiglasbox ähnelt einer Käseglocke. Die Wände und die Decke bestehen aus Plexiglas und der Boden ist aus Holz. Durch ein kleines eingebautes Fenster in der Plexiglasbox können Einstellungen am Heizblock vorgenommen werden. Die Maße der Plexiglasbox belaufen sich auf eine Breite von $74,5\ \text{cm}$, eine Höhe von $65,4\ \text{cm}$ und eine Tiefe von $58,7\ \text{cm}$. Die Plexiglasdicke beträgt ca. $5\ \text{mm}$. Um eine bessere Händelbarkeit zu erreichen, steht die Box auf einem Tisch. In der Mitte im Inneren der Plexiglasbox befindet sich der Heizblock. Der Block ist $60\ \text{mm}$ breit, $40\ \text{mm}$ hoch und $60\ \text{mm}$ tief und besteht aus Kupfer. Der Heizblock (wie in Abbildung 3.2 zu sehen) soll der Ersatz für eine offene Flamme sein.



Abbildung 3.2: Verwendete Kupferheizblock

In diesem Experiment werden zwei Kameras der Firma LaVision verwendet. Die genaue Bezeichnung lautet Imager pro X 2M. Aufgrund der Praktikabilität und der Umsetzbarkeit werden die Kameras unter einem Winkel von 90 Grad zum Lichtschnitt aufgestellt, obwohl hiermit nicht die höchste Mie-Streuintensität erreicht wird.

Die Tabelle 3.1 zeigt einige technische Daten der CCD-Kamera.

Technische Daten	
Spektralbereich	290 - 1100 nm
Anzahl der Pixel	1600 x 1200 Pixel
Pixelgröße	7,4 μm x 7,4 μm
Speicher	4 GB
Größe des Kamerakopfes	84 mm x 66 mm x 175 mm

Tabelle 3.1: Technische Daten der CCD-Kamera [LAVISION, B]

Die Abbildung 3.3 zeigt die verwendeten zwei Kameras.

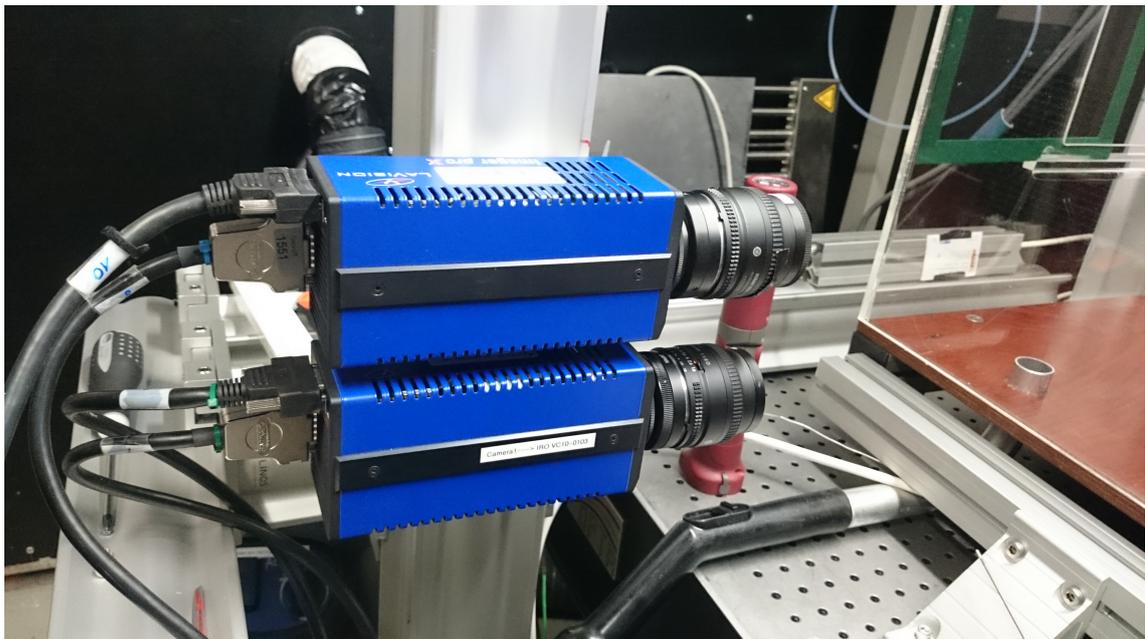


Abbildung 3.3: Imager pro X 2M

In diesem Experiment wird ein Laser der Firma Innolas verwendet. Die Bezeichnung des Lasers lautet Spotlight Compact 200. In Abbildung 3.4 wird der Laser dargestellt.



Abbildung 3.4: Laser Spitlight Compact 200 [INNOLAS]

Der verwendete Laser wird der Gefährdungsklasse vier zugeordnet. Gefährdungsklasse vier bedeutet, dass ein hohes Risiko vorliegt. Es liegt eine Gefährdung vor, wenn in den direkten Laserstrahl oder in den direkt reflektierten Laserstrahl hineinschaut wird. Von dem Laserstrahl kann eine ernsthafte Haut- und Augengefährdung sowie eine Brandgefährdung ausgehen [DOKU.NET]. Da dieser Laser gefährlich ist, muss bei der Verwendung eine Laserschutzbrille getragen werden.

Der Spitlight Compact 200 Laser eignet sich sehr gut für die PIV-Messungen, da dies ein blitzlampengepumpter Nd:YAG Laser ist und sehr hohe Energien freisetzen kann. Die Abkürzung Nd:YAG steht für Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser. Dieser Laser ist ein Festkörperlaser. Als Festkörperlaser werden Laser bezeichnet, die als verstärkendes Medium einen kristallinen oder glasartigen Festkörper besitzen [ENZYKLO.DE]. Der obengenannte Laser besitzt kompakte Laserköpfe und kleine Netzteile, sodass sie auch auf kleinem Raum nicht viel Platz einnehmen. Der Laserimpuls ist 5-7 Nanosekunden lang. Dies hat den Vorteil, dass die Tracerpartikel, die sich schnell in der Strömung bewegen, von der Kamera erfasst und somit zwei belichtete Aufnahmen erzeugt werden können. Diese kurzen Laserimpulse machen es möglich, dass den Tracerpartikeln der Weg zwischen den zwei Aufnahmen zugeordnet werden kann. Die Tabelle 3.2 zeigt einige technischen Daten des Lasers.

Technische Daten	
Energie	140 mJ
Wiederholrate	10 Hz
Energiestabilität	< 1,3 Prozent
Pulsdauer	5-7 ns
Strahldurchmesser	5 mm
Richtungsstabilität	< +- 50 mrad

Tabelle 3.2: Technische Daten des Lasers [INNOLAS]

Um die Strömung über dem Block, im sogenannten Plume, bei verschiedenen Temperaturen analysieren zu können, wird der Kupferblock unterschiedlich aufgeheizt. Es wird bei 50 °C begonnen und in fünfziger Schritten bis zu einer maximalen Temperatur von 250 °C erhöht. An der Unterseite des Kupferblocks befindet sich ein Gewinde, somit kann er mit einer Schraube am Holzboden fixiert werden. Eine weiße zementgebundene Calciumsilicat-Brandschutzplatte zwischen dem Boden und dem Kupferblock verhindert zusätzlich, dass die Wärme in den Boden transportiert wird (wie in Abbildung 3.2 zu sehen).

Das Laserlicht verursacht Störungen durch Reflexionen bei der Anstrahlung des Heizblockes. Diese Bereiche werden somit überbelichtet und weisen eine hohe Lichtsättigung auf. Aus diesem Grunde wird an der Plexiglasscheibe ein Stück Pappe befestigt (siehe Abbildung 3.1). Diese verhindert, dass die Kamera die überbelichteten Teile des Heizblockes sieht und somit die Pixel nicht zerstört werden.

Der Laserstrahl wird über drei Spiegel umgeleitet, sodass er oberhalb der Box ankommt. Mit Hilfe von drei Linsen, einer zylindrischen Linse und zwei Teleskoplinen, wird er zu einem Lichtschnitt geformt (wie in Abbildung 2.3 zu sehen). Dieser Lichtschnitt soll in der Mitte des Kupferblockes auftreffen.

Die Tracerpartikel werden mit einem Schlauch, der durch ein Loch in der Bodenplatte in die Plexiglasbox ragt, eingebracht. Mit einem Staubsaugerschlauch durch ein weiteres Loch können die Tracerpartikel evakuiert werden.

Da die Laserbox nicht groß ist, steht die Kamera sehr nahe an der Plexiglasbox. Sie steht in einem Abstand von 29 cm zu der Plexiglashülle. Um einen größeren Bildbereich erfassen zu können, müssen zwei Kameras vertikal zueinander angeordnet werden. Diese Kameras werden an einem Profil der Firma Linos befestigt. Um die gesamte Höhe der Box aufzunehmen, wird die zweite Kamera in ihrer Höhe verschoben. Diese Verschiebung erfolgt viermal. Dadurch ist gewährleistet, dass die komplette Höhe der Box aufgezeichnet werden kann.

Um die Verschiebung zu erfassen wird vor jeder Aufnahme ein Bild mit einem Zollstock angefertigt. So kann man jederzeit überprüfen, auf welcher Höhe die Kamera gerade steht und welche Überschneidung die einzelnen Bilder zueinander haben. Dies ist wichtig für die Erzeugung eines Gesamtbildes. In Abbildung 3.5 ist der Zollstock in der Plexiglasbox während einer Aufnahme zu sehen.

Bei den Aufnahmen bleibt die untere Kamera als Referenzpunkt immer am gleichen Platz befestigt. Die Aufnahmen sind orthogonal zu dem Lichtschnitt durchzuführen. Die erste Kamera wird so eingestellt, dass sie noch den Heizblock erfassen kann. Die zweite Kamera wird so justiert, dass das Ende des Bildes der ersten Kamera sich mit dem Anfang des Bildes der zweiten Kamera überschneidet.

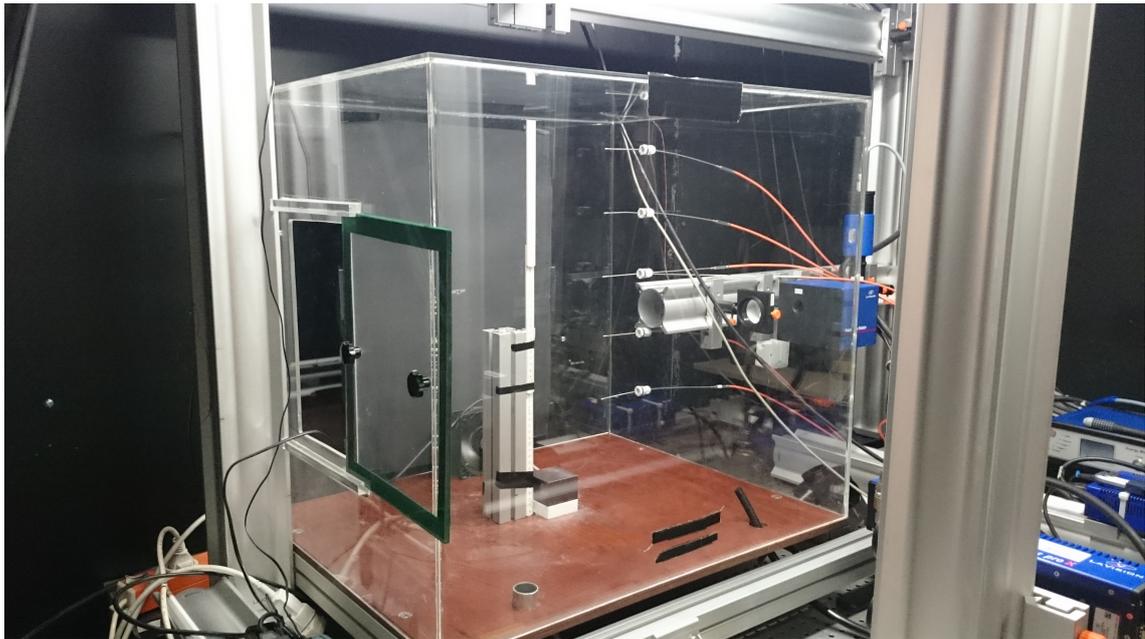


Abbildung 3.5: Aufnahme des Zollstockes

Die Kameras und der Laser werden außerhalb der Laserbox von einem Computer mit entsprechender Software gesteuert. In diesem Fall ist der Computer mit einer Software von LaVision ausgestattet.

Das Programm heißt DAVIS 8.0 [LAVISION, A].

Für den Überblick der Temperaturen in der Plexiglasbox, werden durch kleine Löcher Temperaturfühler (auch Thermoelemente PT 100 genannt) eingesetzt, welche die Temperatur an verschiedenen Stellen messen. Diese PT 100 sind in Abbildung 3.1 erkennbar. Es sind fünf Temperaturfühler angebracht, die jeweils zehn Zentimeter in die Box ragen und somit die Temperatur in der Plexiglasbox messen können. Ein weiterer Fühler befindet sich außen an der Decke der Box und misst die Temperatur der Plexiglasscheibe. Ein letzter siebter Temperaturfühler misst die Außentemperatur in der Laserbox. Durch das Messen mit den Thermoelementen kann kontrolliert werden, nach wie vielen Minuten die Temperatur in der Box nach entsprechender Einstellung des Heizblockes konstant bleibt. Wenn sich die Temperatur in der Plexiglasbox nicht mehr verändert, geht man von einem stationären Zustand aus.

3.1.2 Durchführung der Experimente

Zunächst muss sichergestellt werden, dass der Laser und die Kameras richtig justiert worden sind. Durch Drehen der Objektive wird das Bild der Kameras schärfer gestellt. Zur Kontrolle, ob diese ein scharfes Bild aufnehmen, kann an dem Computer ein Livestream eingestellt werden.

Der Laser ist richtig justiert, wenn der Lichtschnitt in der Mitte des Heizblockes zu sehen ist und beide Laserimpulse übereinander liegen. Damit das Programm die richtigen Einstellungen vornimmt, wird auf den Heizblock ein sogenanntes Target (wie in Abbildung 3.6 zu sehen) gestellt.

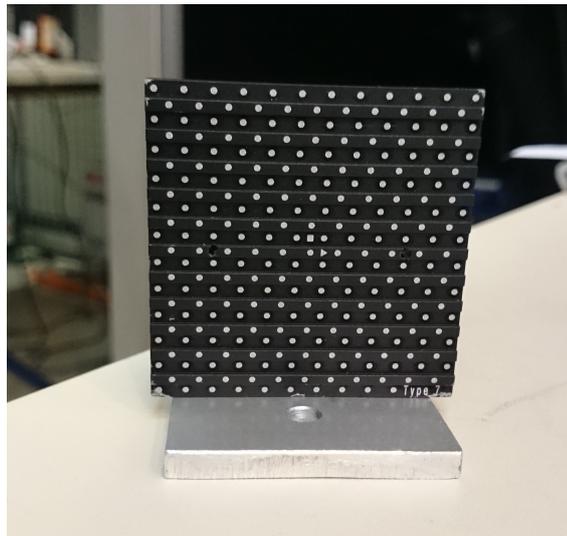


Abbildung 3.6: Aufnahme eines Targets

Das Target ist eine quadratische Platte, die ein dreidimensionales Punkteraster besitzt. Die Kalibrierungsplatte (Target) ist 5,8 cm im Quadrat. Durch die Kalibrierung werden die zwei Raumdimensionen (X und Y) eindeutig zugeordnet. Das Target steht für die Kalibrierung der Kameras auf dem Heizblock. Unter dem Punkt Calibration im Auswerteprogramm wird mit jeder Kamera ein Bild vom Target aufgenommen. Diese Aufnahmen sind notwendig, damit das Programm beiden Kameras dasselbe Koordinatensystem zuordnet. In der Kalibrierung müssen auf dem Bild drei Punkte des Targets ausgewählt werden, um das Koordinatensystem zu definieren. Der erste Punkt wird willkürlich in der Mitte vom Target gewählt, der zweite Punkt muss rechts neben dem ersten Punkt liegen und der dritte Punkt sollte über dem ersten Punkt liegen. Diese drei Punkte wählt man zunächst auf dem Bild der ersten Kamera aus und anschließend exakt die gleichen Punkte auf dem Bild der zweiten Kamera. Wenn diese Einstellungen vorgenommen worden sind, kalibriert sich das Programm selbständig. Diese Kalibrierung wird nur einmal vor Beginn des Experimentes durchgeführt, da das Programm die entsprechenden Einstellungen speichert. In der Abbildung 3.7 wird eine Aufnahme von dem Target gemacht, wie dieses auf dem Heizblock positioniert wurde.

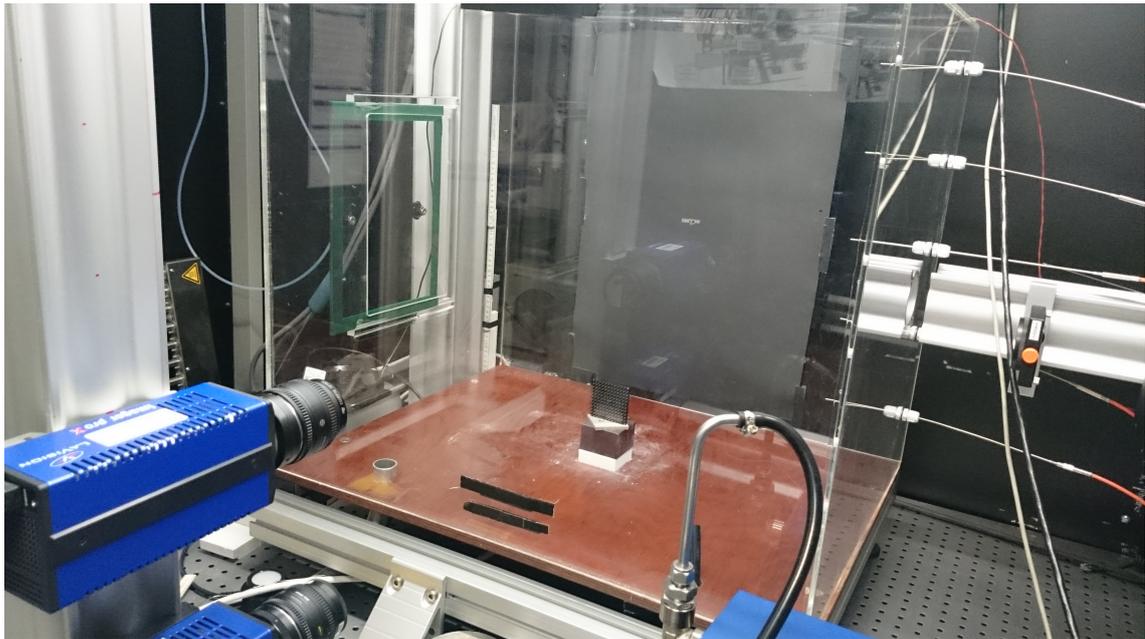


Abbildung 3.7: Bildaufnahme des Targets

Nach Fertigstellung der Kalibrierung wird die entsprechende Temperatur am Heizblock eingestellt. Wie bereits beschrieben wird bei einer Temperatur von 50 °C gestartet und in fünfziger Schritten bis auf 250 °C erhöht. Die erste Kamera bleibt unten an ihrem Fixpunkt stehen. Die zweite Kamera beginnt mit ihren Aufnahmen kurz oberhalb der Ersten, sodass die Bilder sich um wenige Zentimeter überschneiden. Als nächsten Schritt wird ein Zollstock neben den Heizblock gestellt (wie in Abbildung 3.5 zu sehen). In der Plexiglasbox befinden sich noch keine Partikel. Eine Aufnahme von beiden Kameras wird gestartet. Diese Aufnahme wird ohne Laserlicht durchgeführt. Die Filter die auf die Kameras geschraubt worden sind, werden vorerst entfernt. Sie schützen die Kameras, sodass sie nicht vom Lichtschnitt beschädigt werden. Die Aufnahmen des Zollstockes werden zur Höhenkontrolle der Kameras benötigt damit im späteren Verlauf eine fehlerhafte Zusammensetzung der Bilder vermieden wird.

Die Abbildung 3.8 zeigt die entstandenen zwei Aufnahmen von dem Zollstock, der mit beiden Kameras aufgenommen worden ist. Das linke Bild wurde von der unteren feststehenden Kamera aufgenommen, das rechte Bild von der oberen zweiten Kamera. Im Vergleich der beiden Aufnahmen, sind die Überschneidungen dieser Bilder gut zu erkennen. In diesen beispielhaften Aufnahmen überschneiden sich die Bilder in dem Bereich von 48,2 cm bis 52,8 cm.

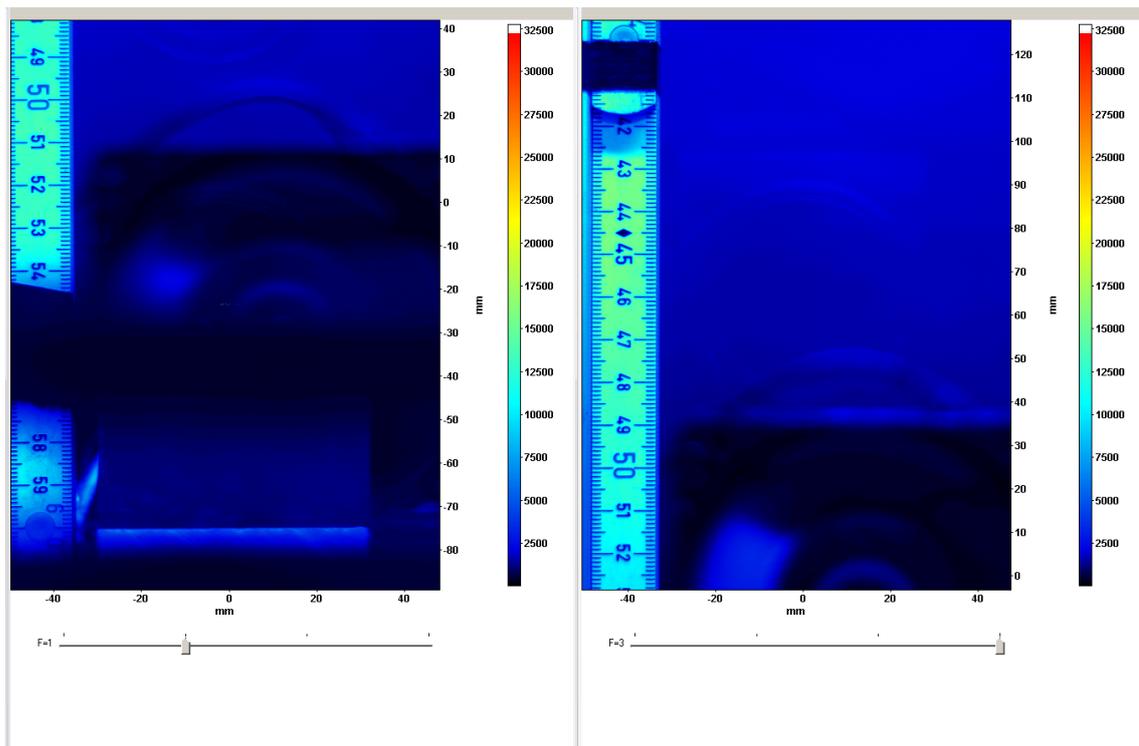


Abbildung 3.8: Beispielhafte Aufnahme des Zollstockes aus der Sicht von beiden Kameras

Nachdem der Zollstock wieder entfernt worden ist, können die DEHS Partikel durch den Schlauch eingebracht werden. Es sollte darauf geachtet werden, dass nicht zu viele Partikel in die Box gelangen. Wenn dies der Fall ist, wäre die Anzahl der Fehler in den Auswertungen zu groß. Diese Fehler entstehen z.B. dadurch, dass die Partikel nicht richtig verfolgt werden können. Nach einigen Minuten wird eine optimale Verteilung der Partikel in der Box gewährleistet. Ein stationärer Zustand der Partikelströmung stellt sich nach etwa fünfzehn Minuten ein.

Eine Kontrolle der Temperatur in der Plexiglasbox und in der Laserbox ist wichtig, damit die Messungen bei gleicher Temperatur aber unterschiedlicher Kamerahöhe durchgeführt werden können. Hiermit ist sichergestellt, dass sich ein stationärer Zustand in der Plexiglasbox eingestellt hat und vergleichbare Ergebnisse erzielt werden können.

Im weiteren Verlauf werden die nächsten Einstellungen außerhalb der Laserbox am Computer bearbeitet. Als erstes wird unter dem Punkt Recording der Laser angeschaltet. Unter dieser Einstellung wird die Anzahl der Bilder festgelegt, welche die beiden Kameras aufnehmen sollen. Die Bilder sind sogenannte Double frames. Desweiteren wird unter dem Punkt Processing das entsprechende Δt ausgewählt. In diesem Experiment sind für alle Temperaturen ein Δt von $1300 \mu\text{s}$ eingetragen worden.

Hier werden 100 Aufnahmen mit je zwei zugehörigen Bildern hintereinander erstellt. Diese 100 Double Frames werden innerhalb von zehn Sekunden aufgenommen. Der

Laser und die Kameras müssen aufeinander abgestimmt werden, damit keine schwarzen Bilder entstehen. Dies wird gewährleistet, wenn die Triggerrate und die Recordingrate jeweils auf 10 Hz steht.

Das Programm speichert die Aufnahmen von beiden Kameras zunächst in einem Ordner ab. Allerdings müssen diese für die Auswertung getrennt in zwei verschiedenen Ordnern abgespeichert werden. Die Sortierung wird unter dem Punkt Processing eingestellt. Nach der Sortierung wird ein Hintergrundbild erzeugt, welches in der Abbildung 3.9 zu sehen ist.

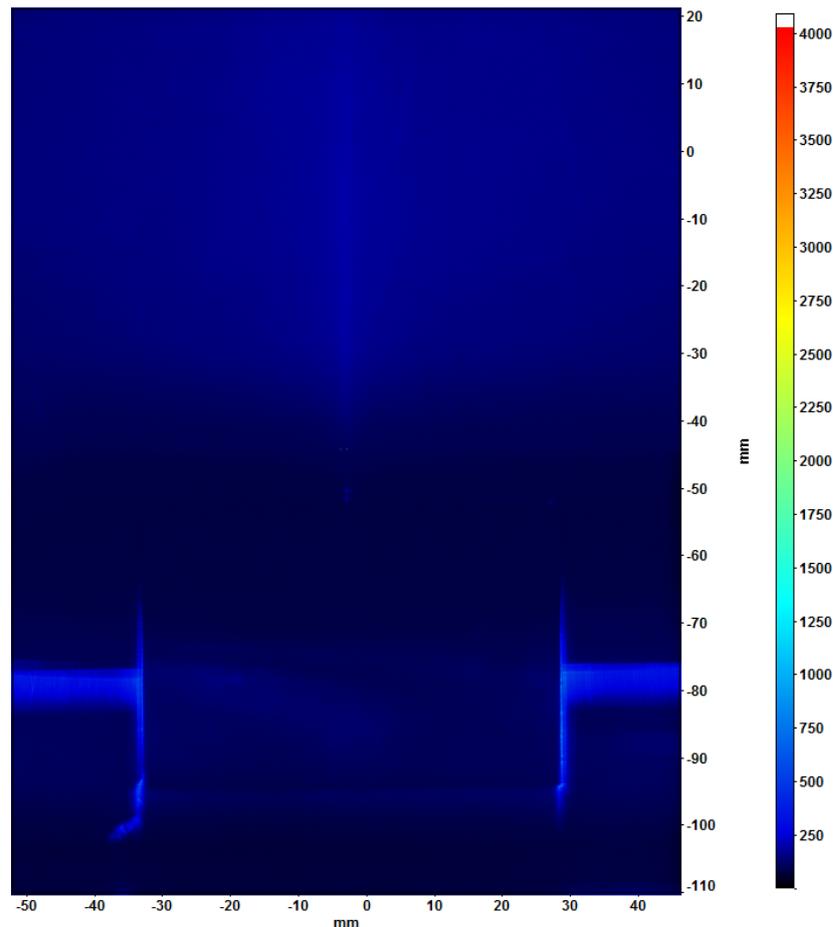


Abbildung 3.9: Hintergrundbild

Im Programm wird reguliert, dass ein Minimum aus allen Bildern erzeugt wird, so bleiben nur die entstandenen Reflexionen übrig. Dieses Hintergrundbild muss für beide Kameras gebildet werden. Wenn dies fertig gestellt ist, wird jeweils das entsprechende Hintergrundbild von den dazugehörigen 100 Aufnahmen abgezogen. Diese Hintergrundsubtraktion ermöglicht, dass die Reflexionen ausgelöst durch den Laser, gemindert werden. Die Reflexionen, die durch den Heizblock entstanden sind, hat zu Beginn der Einsatz der Pappe minimiert. Allerdings entstehen auch Reflexionen durch die Spiegelung des Plexiglasses. In den einzelnen Aufnahmen ist die Kamera zu erkennen, die sich widerspiegelt.

Nach dem Abziehen des Hintergrundbildes kann die Auswertung der Bilder unter dem Punkt Processing gestartet werden. Zur Abdeckung des Heizblockes wird in diesem Programmpunkt eine Maske eingestellt. Da das Programm neben dem Heizblock fehlerhafte Vektoren berechnet, führt dies im Zuge dessen zu falsch gemittelten Vektorbildern. Bei der Auswertung werden Verschiebungsvektoren erzeugt, sie erfolgt digital. Es wird für alle 100 Aufnahmen jeweils ein Verschiebungsbild erzeugt. Wenn die Vektoren erzeugt worden sind, erfolgt eine Mittelung über alle 100 Vektorfelder.

Nach der ersten Aufnahme kann die Temperatur des Heizblockes um 50 °C erhöht werden. Die Kameras bleiben solange auf der gleichen Höhe stehen, bis alle Aufnahmen zu einer Temperatur von 250 °C durchgeführt worden sind. Nach dem Abschluss aller Aufnahmen wird die zweite Kamera höher geschoben. Wichtig an der Verschiebung der Kamera ist, dass sich sowohl das neue wie auch das vorherige Bild überschneidet. Im Anschluss daran werden Bilder mit allen Temperaturen (50 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C und 250 °C) aufgenommen. Diese Verschiebung wird viermal durchgeführt und jedes Mal werden die Bilder mit den verschiedenen Temperaturen aufgezeichnet. Die vorher erklärte Auswertung muss für jede Aufnahme erstellt werden.

4 Ergebnisanalyse

4.1 Erklärung des benötigten Python Skriptes

In der Versuchsdurchführung ist beschrieben worden, dass durch eine Vertikalverschiebung der Kamera nach oben viele Einzelbilder erzeugt werden. Diese Einzelbilder müssen zu einem Gesamtbild zusammengefügt werden. Somit entsteht eine Aufnahme der gesamten Plexiglasbox. Mit Hilfe des im Anhang A zu sehenden Python Skripts werden die Einzelbilder zusammengesetzt, sowie die Geschwindigkeitskurven in y-Richtung erzeugt. Die Geschwindigkeitskurven werden mittig in den Einzelbildern zwei bis sechs erstellt.

Das Skript besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil erzeugt das Gesamtbild aus den sechs Einzelbildern und der Zweite erzeugt die Geschwindigkeitskurven.

Zunächst wird der erste Teil des Skriptes erläutert. Dabei werden die Auswertungen, welche mit dem Programm Davis durchgeführt worden sind, exportiert. Für die bessere Verarbeitung wurden in diesem Fall ASCII-Daten verwendet. Diese Textdatei beinhaltet sowohl die x-Komponenten, als auch die y-Komponenten sowie die Geschwindigkeiten in x- und y-Richtung (v_x und v_y) der einzelnen erfassten Partikel. Das Zusammenfügen der Einzelbilder ist mit dem Python Skript „Zusammensetzung.py“ (dem Anhang A zu entnehmen) durchgeführt worden. Die Aufgabe des Skriptes ist, sechs Dateien zu einer Datei zusammenzufügen und diese anschließend zu plotten. Die x-Achse des zusammengesetzten Bildes soll die Breite des Plumes und die y-Achse die Höhe des Plumes in Millimetern angeben. Um ein Gesamtbild zu erzeugen, werden zuerst die Verschiebungen der Einzelbilder manuell mit Hilfe der Aufnahmen, die vom Zollstock aufgenommen worden sind, eingegeben. Anschließend werden die sechs Dateien in die benötigte Form umgewandelt. Das bedeutet, dass in der ersten Spalte die x-Komponente, in der zweiten Spalte die y-Komponente, in der dritten Spalte die Geschwindigkeit in x-Richtung und in der vierten Spalte die Geschwindigkeit in y-Richtung stehen. Zusätzlich müssen die Kommata der Dezimalbrüche durch einen Punkt ersetzt werden. Für die Weiterverarbeitung sind die vier erzeugten Spalten vier verschiedenen Listen angehängt, diese werden anschließend in Arrays umgewandelt. Die Anpassung und Umwandlung wird in einer entsprechenden Funktion ausgeführt. Die zweite Funktion soll die absolute Geschwindigkeit für jeden Partikel berechnen.

Im Anschluss der Funktion werden für ein globales Koordinatensystem, welches für

alle Einzelbilder dienen soll, vier verschiedene leere Listen erzeugt. In einer dafür programmierten Schleife werden die Abstände der Aufnahmen aufsummiert, sodass die Bilder übereinander liegen. Die aufsummierten y -Werte, benötigt für ein globales Koordinatensystem, werden einer der vorher beschriebenen leeren Liste angehängen. Die x -Werte und die beiden Geschwindigkeiten sind drei anderen verschiedenen leeren Listen hinzugefügt worden. Ein Wertebereich in x - und y -Richtung wird angegeben und ein Gitter über das gesamte Bild gelegt. In diesem Gitter sollen die Geschwindigkeiten in jeder einzelnen Zelle dargestellt werden.

Der zweite Teil des Skriptes erstellt die Geschwindigkeitskurven. In diesen Grafiken soll die x -Achse die Breite in Millimetern und die y -Achse die Geschwindigkeit in y -Richtung in Metern pro Sekunde angeben. Die daraus entstehenden Kurven sollen die Daten aus der Mitte eines Einzelbildes enthalten.

Zuerst wird eine Funktion erstellt, die genau wie im ersten Teil die eingelesenen Daten in die richtige Form bringt. In erzeugten leeren Listen können später die benötigten Daten gespeichert werden. Hierzu wird mit Hilfe einer Schleife alle gleichen y -Werte, die dazu gehörigen x -Werte und Geschwindigkeiten in einer Liste gespeichert. Das Programm soll den mittleren y -Wert ermitteln und im Anschluss das Integral unter jeder Kurve berechnen. Zum Abschluss wird der Plot erstellt, indem auf der linken Seite das zusammengesetzte Bild und auf der rechten Seite die fünf Geschwindigkeitskurven geplottet werden.

4.2 Auswertung der entstandenen Daten

Die folgenden Grafiken 4.1 bis 4.5 zeigen auf der linken Seite die zu einem Gesamtbild zusammengeführten Einzelbilder (für jede Temperatur existiert ein separates Gesamtbild). Die einzelnen Gesamtbilder sind mit einem Python Skript erstellt worden, welches die Geschwindigkeiten in einem dafür angelegten Raster darstellt. In diesen Abbildungen ist eine Verschiebung vom ersten zum zweiten Bild in x-Richtung zu erkennen. Dies liegt an der Kalibrierung der beiden Kameras. In den übrigen Bildern tritt diese Verschiebung nicht mehr auf, da alle Aufnahmen mit der zweiten Kamera aufgenommen worden sind. Auf der rechten Seite sind die dazugehörigen Geschwindigkeitskurven in y-Richtung zu sehen. Die jeweiligen Stellen an denen die Kurven geplottet werden, sind mit einem Strich markiert. In dem Plot der Geschwindigkeitskurven stehen oben die dazugehörigen Flächeninhalte in Quadratmetern pro Sekunde. Im Brandschutz wird der Volumenstrom als quantitative Kenngröße verwendet. Der Volumenstrom gibt an, wie viel Volumen eines Gases in einer bestimmten Zeitspanne durch ein Medium strömt [SCHLOBACH]. Im hier behandelten Fall handelt es sich um einen „Flächenstrom“, da die Messdaten nur im zweidimensionalen Bereich vorliegen.

In der Mitte der Einzelbilder zwei bis sechs ist eine Geschwindigkeitskurve erstellt worden. Das erste Einzelbild wurde ausgelassen, da die Geschwindigkeiten in der Mitte des Bildes Null betragen. Die vorher erwähnte Maske verursacht, dass keine Messdaten vorliegen. Die Grafiken 4.1 bis 4.5 sind mit dem Python Skript, welches dem Anhang A entnommen werden kann, erstellt worden.

In dem linken Bild gibt die x-Achse die Breite des Plumes an, wobei der Ursprung in der Mitte des Heizblockes liegt. Die y-Achse gibt die Höhe des Plumes an und beginnt an der Oberkante des Heizblockes. Beide Achsen führen die Einheit Millimeter. Die dazugehörige Farbleiste zeigt Geschwindigkeiten in Metern pro Sekunde. Die x-Achse in den rechten Grafiken gibt ebenfalls die Breite, die y-Achse jedoch die Geschwindigkeit in y-Richtung in Metern pro Sekunde an.

Die gesamten Abbildungen zeigen die Geschwindigkeitsverteilungen der Tracerpartikel in der Plexiglasbox bei verschiedenen Temperaturen. Der Plume wandert bei den meisten Messungen entlang der x-Achse. Dies wird sehr gut an den einzelnen Geschwindigkeitskurven deutlich. Das Maximum dieser Grafiken liegt auf der x-Achse nicht bei Null, sondern verschoben in den positiven Bereich der x-Achse. Eine mögliche Ursache kann darin liegen, dass die Tür und die Belüftungsanlage der Laserbox auf der linken Seite liegen. Hier können Windzüge entstehen, welche den Plume beeinflussen.

Desweiteren passen nicht alle Einzelbilder zu einem Gesamtbild zusammen. Dies lässt sich an dem Plume erkennen, der nicht in einer Achse liegt und nicht die gleiche Breite zeigt. Ein möglicher Grund dafür ist, dass die Aufnahmen der verschiedenen Höhen an unterschiedlichen Tagen durchgeführt wurden und somit unterschiedliche Umgebungsfaktoren die Messungen beeinflussen konnten.

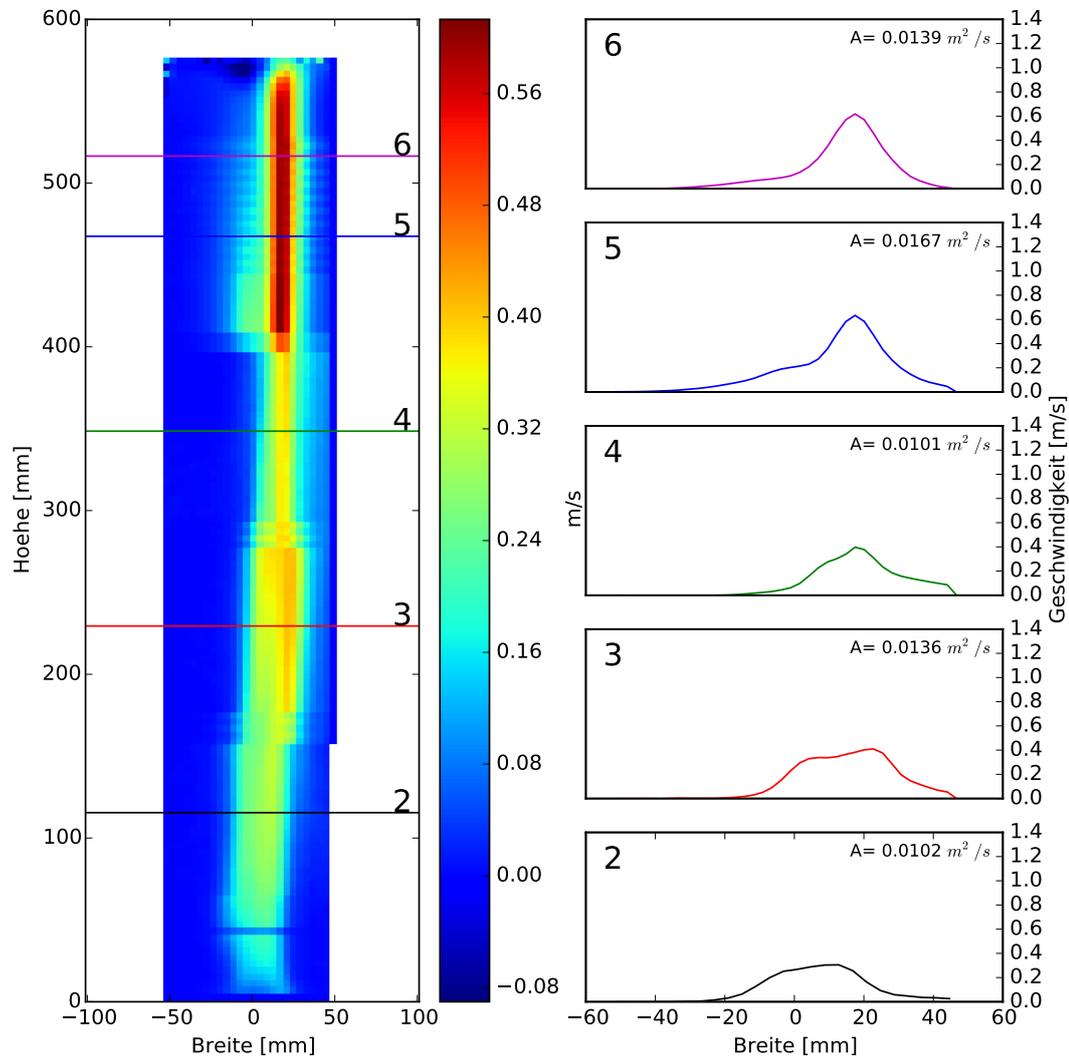


Abbildung 4.1: Abbildungen der Ergebnisse für die Messung bei 50 °C

Die Abbildung 4.1 zeigt die zusammengesetzten Einzelbilder und die dazugehörigen Geschwindigkeitkurven, die bei einer Temperatur von 50 °C gemessen worden sind. In dieser Abbildung passt der Plume an den meisten Stellen übereinander. Bei einer Temperatur von 50 °C treten noch keine erkennbaren Wirbel auf. Dies lässt sich erkennen, da ein gerader Plume vorhanden ist und dieser sich in x-Richtung nicht sehr stark ausbreitet. Die Partikel mit einer hohen Geschwindigkeit treten nicht direkt über dem Heizblock auf, sondern erst in einer Höhe von ca. 400 mm. Der Auslöser dafür kann sein, dass die warme Luft nach oben steigt und sich dort die Partikel am schnellsten bewegen.

Die Abbildungen auf der rechten Seite zeigen, dass sich der Plume entlang der x-Achse in den positiven Bereich bewegt. Das Maximum der Geschwindigkeitskurven liegt ca. in der Mitte im Nullpunkt und somit auch in der Mitte des Plumes. Das Maximum wird größer, je höher sich die Kamera befindet. An den Seiten konvergiert die Kurve gegen Null. Das bedeutet, dass die Partikel, die sich am Rande sowie außerhalb des Plumes befinden am langsamsten sind. Die maximale Geschwindigkeitskomponente bei 50 °C liegt bei 0,56 m/s.

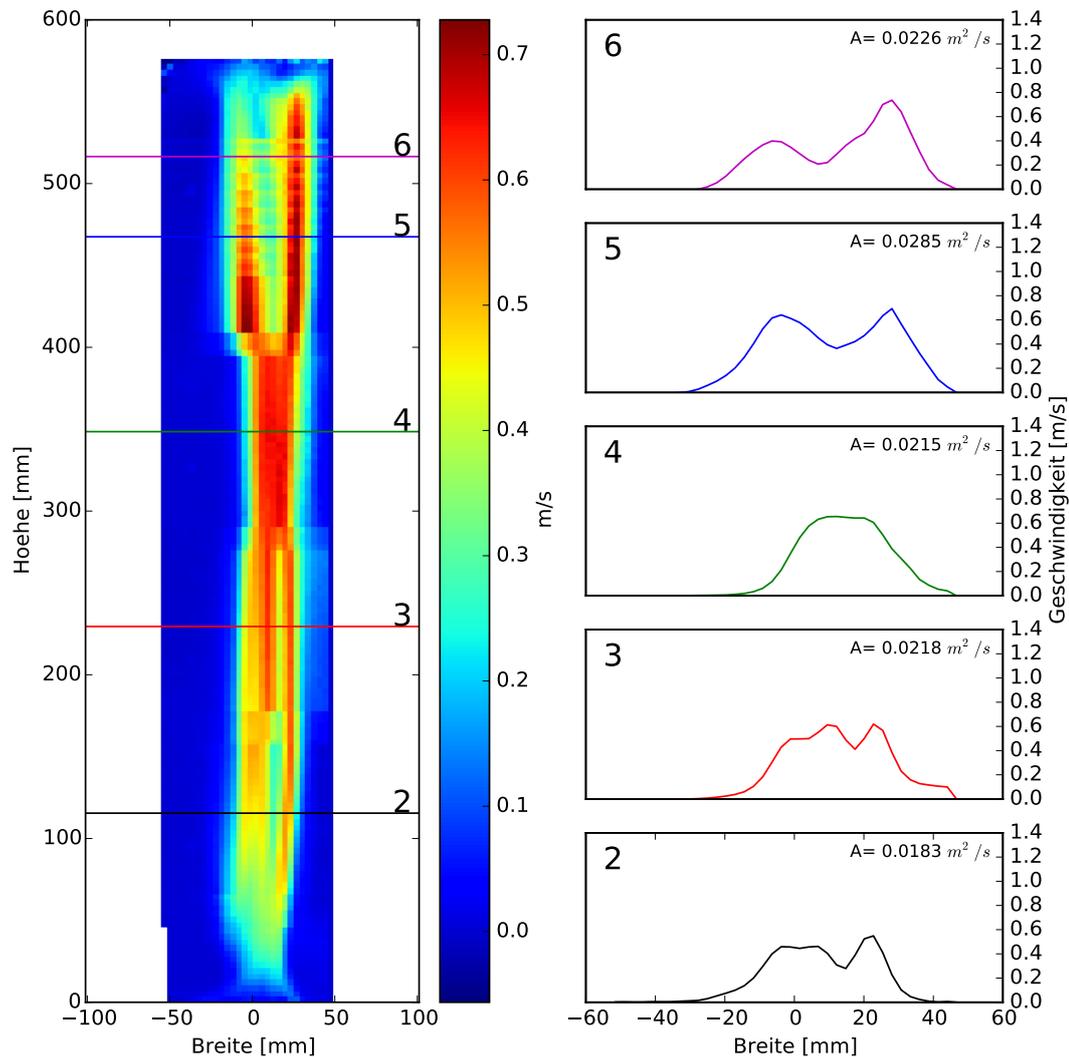


Abbildung 4.2: Abbildungen der Ergebnisse für die Messung bei 100 °C

Die Abbildung 4.2 stellt die zusammengesetzten Aufnahmen und die entsprechenden Geschwindigkeitskurven für eine Temperatur von 100 °C dar. In der rechten Abbildung ist zu sehen, dass die Einzelbilder an manchen Stellen nicht gut zusammen passen. Wie zum Beispiel auf der Höhe von ca. 400 mm, das ist der Übergang vom vierten ins fünfte Einzelbild. Dort bildet sich aus einem einzelnen Strahl ein „Doppelstrahl“. Mit einem „Doppelstrahl“ ist gemeint, dass zwei nebeneinander entstandene Plumes zu sehen sind. Zwei Bereiche, die schnelle Tracerpartikel aufweisen. Unklar ist, wie dieser „Doppelstrahl“ entsteht und warum er nur in manchen Einzelbildern erscheint. Dieses Phänomen ist auch in einer Höhe von ca. 80 mm bis 250 mm zu erkennen, jedoch prägt sich der zweite Strahl nicht so stark aus. Dieser sogenannte „Doppelstrahl“ ist auch in den Geschwindigkeitskurven wiederzufinden. In den Grafiken sind zwei Maxima vorhanden, im Gegenteil zu der Messung bei 50 °C. Hier existiert nur ein Maximum. In den Grafiken bei 100 °C ist erkennbar, dass der Plume nach rechts wandert, da die Mitte des Plumes nicht an der Stelle $x = 0$ ist. Aus den Geschwindigkeitskurven lässt sich ablesen, dass die maximale Geschwindigkeit im oberen Bereich auftritt.

Bei dieser Temperatur breitet sich der Plume weiter zu x-Achse aus. Bei einer Temperatur von 100 °C liegt die maximale Geschwindigkeitskomponente bei 0,70 m/s.

Die Abbildung 4.3 zeigt das Gesamtbild und die Geschwindigkeitskurven, welche bei einer Temperatur von 150 °C gemessen worden sind. In dieser Messung wandert der Plume nicht sehr weit entlang der x-Achse in den positiven Bereich. Der Plume bei einer Temperatur von 150 °C erscheint nicht mehr geradlinig wie bei 50 °C. Das Phänomen des „Doppelstrahls“ ist bei dieser Temperatur in einer Höhe von 120 mm bis 380 mm nur schwach zu erkennen. Als Erinnerung war der „Doppelstrahl“ bei einer Messung von 100 °C ausgeprägter.

Auffällig in den zusammengesetzten Einzelbildern bei 150 °C ist, dass sich die maximale Geschwindigkeitskomponente auf einer Höhe von ca. 420 mm befindet. Aus diesem Grunde hat auch die fünfte Geschwindigkeitskurve das höchste Maximum vorzuweisen. Die maximale Geschwindigkeitskomponente liegt bei 1,20 m/s.

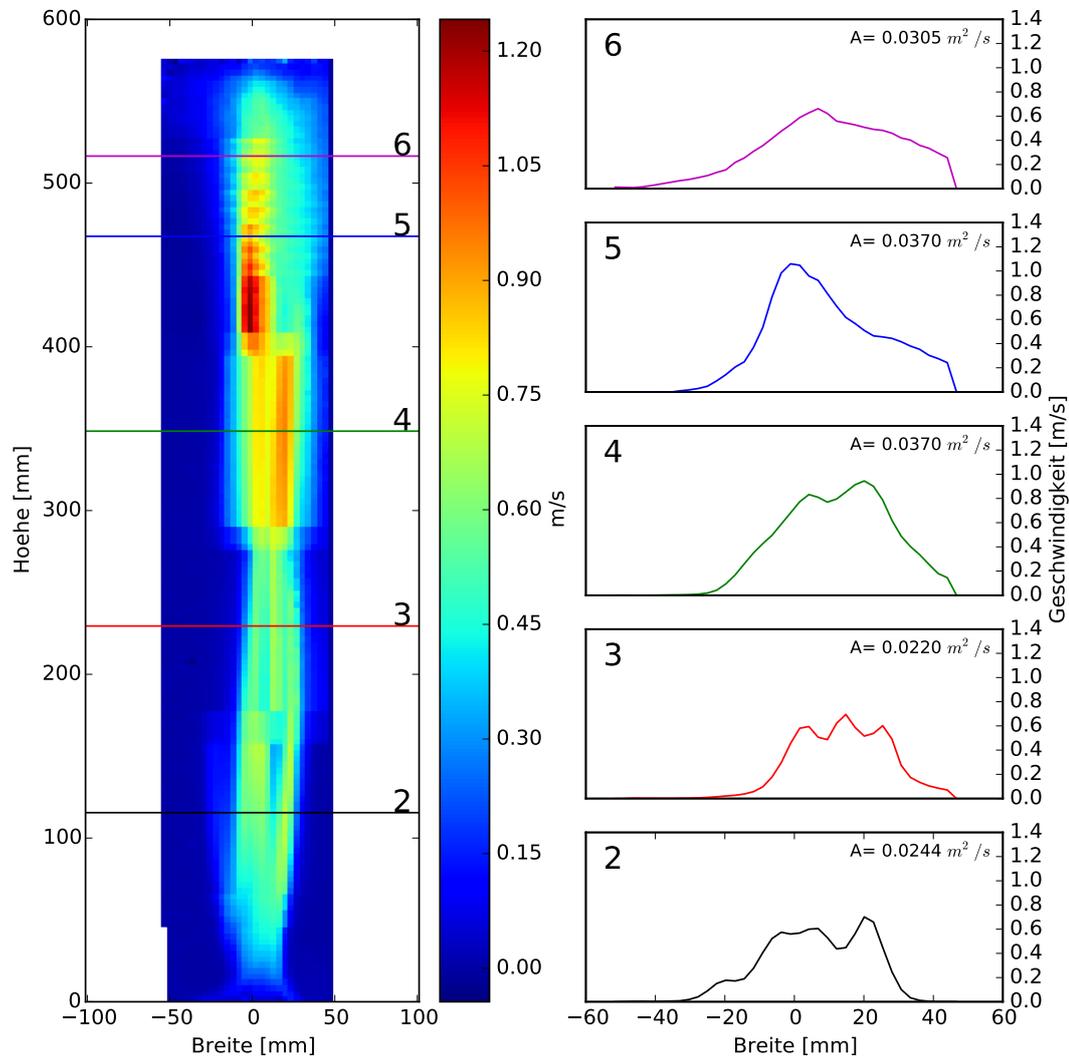


Abbildung 4.3: Abbildungen der Ergebnisse für die Messung bei 150 °C

Die nachfolgende Abbildung 4.4 zeigt das Gesamtbild und die dazugehörigen Geschwindigkeitskurven, welche bei einer Temperatur von 200 °C aufgenommen worden sind. Der Plume ist in den meisten Einzelbildern mittig. Das Maximum der Geschwindigkeitskurven liegt ungefähr auf der x-Achse bei Null. Jedoch fällt das vierte Einzelbild, welches sich in einer Höhe von ca. 280 bis 400 mm befindet, aus der Reihe. Auffällig ist hier, dass der Plume beim Übergang vom vierten ins fünfte Einzelbild (auf einer Höhe von ca. 400 mm) seine Breite verändert. Die Vermutung liegt nahe, dass auch in diesem Fall die Umgebungseinflüsse beeinflussend wirkten, weil die Messungen an unterschiedlichen Tagen stattgefunden haben.

In dem Gesamtbild ist kein eindeutiger „Doppelstrahl“ vorzufinden. Die Schwankungen in den Geschwindigkeiten sind nur an Hand der Geschwindigkeitskurven erkennbar, wie zum Beispiel in der dritten und vierten Geschwindigkeitskurve. Die maximale Geschwindigkeitskomponente liegt bei über 1,20 m/s.

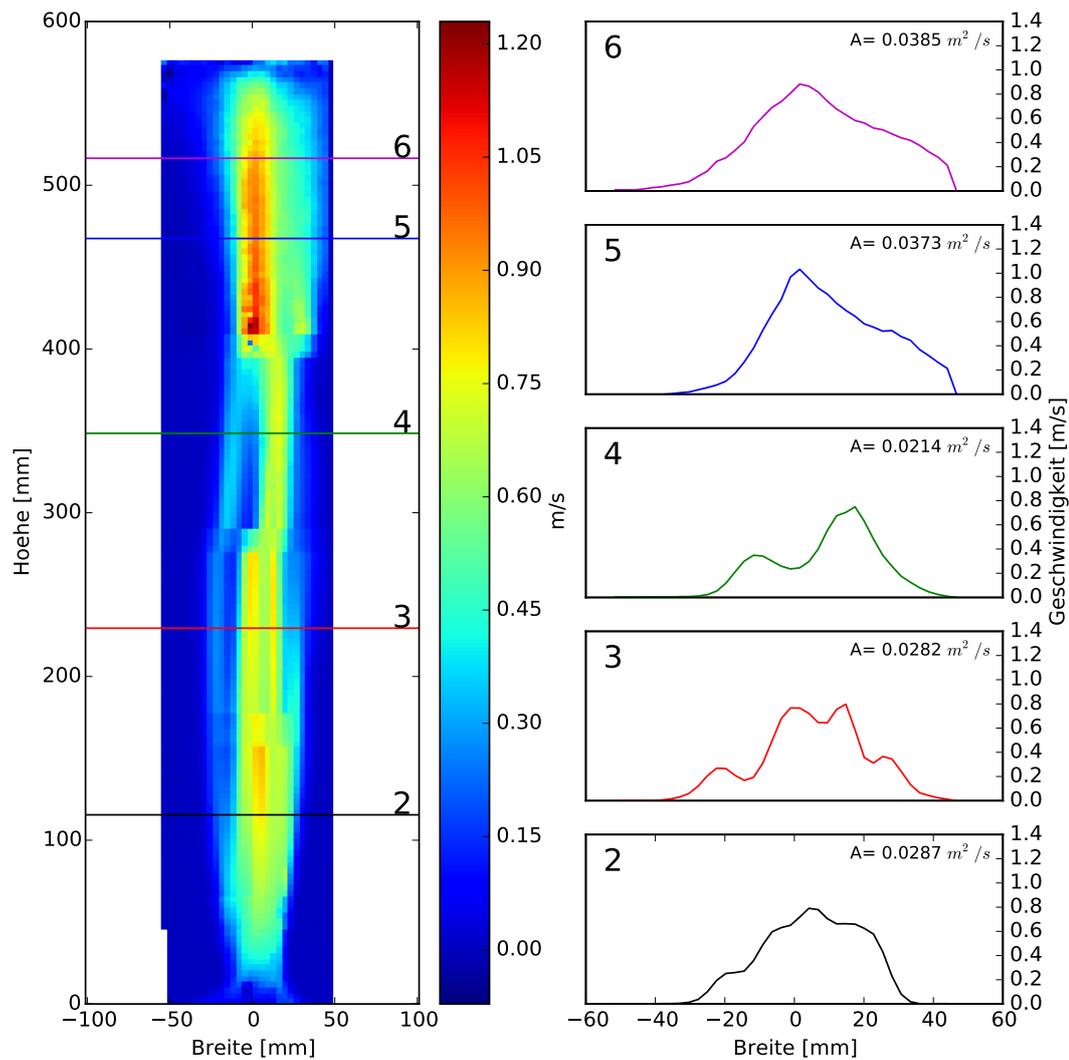


Abbildung 4.4: Abbildungen der Ergebnisse für die Messung bei 200 °C

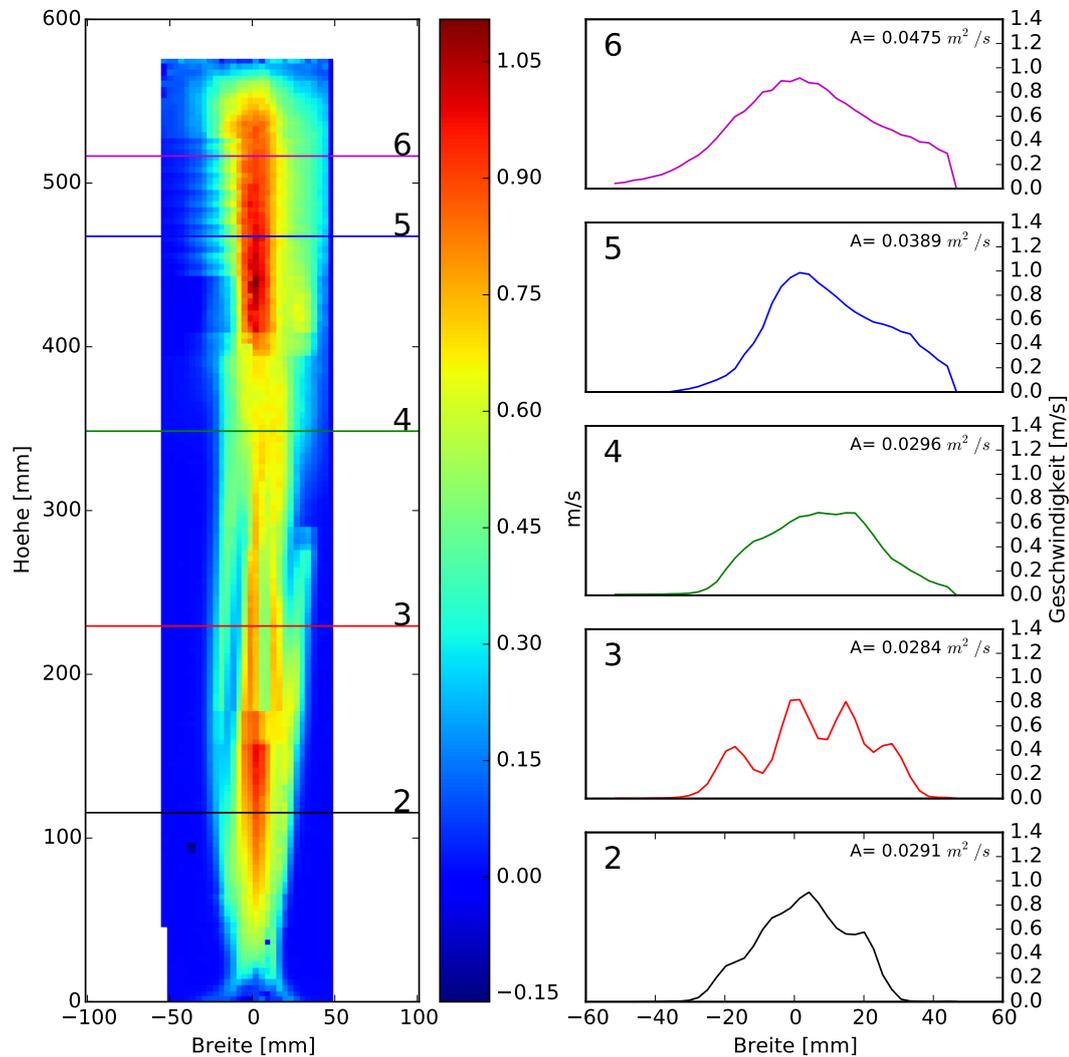


Abbildung 4.5: Abbildungen der Ergebnisse für die Messung bei 250 °C

Die letzte Abbildung 4.5 wurde mit einer Temperatur von 250 °C aufgenommen. In der rechten Grafik sind die Übergänge der Einzelbilder zueinander nicht fließend. In dieser Aufnahme ist keine Abweichung des Plumens zu dem Nullpunkt der x-Achse zu erkennen, wie bei anderen Temperaturen. Das Maximum der Kurven liegt auf der x-Achse bei Null. Die Breite des Plumens verändert sich stark in den letzten beiden Einzelbildern ab einer Höhe von 400 mm. Dies kann ein Anzeichen dafür sein, dass Wirbel aufgetreten sind. Im oberen Bereich ab 400 mm befinden sich die schnellsten Partikel, dort sind die dazugehörigen Geschwindigkeitskurven am größten. Ab einer Höhe von 180 mm kann man einen „Doppelstrahl“ erkennen. Nach

der Geschwindigkeitskurve treten dort noch mehrere Maxima auf als vermutet. Bei einer Temperatur von 250 °C liegt die maximale Geschwindigkeitskomponente bei 1,05 m/s.

In allen fünf Grafiken ist erkennbar, dass die dritte Geschwindigkeitskurve immer mehrere Maxima aufweist. Auffällig ist außerdem, dass die maximale Geschwindigkeitskomponente immer im oberen Bereich vorzufinden ist. Dies kann an der aufsteigenden warmen Luft liegen.

4.3 Fehlerbetrachtung

Die sechs Einzelbilder passten bei der Darstellung der Strömung nicht exakt zusammen. Hier ergab sich ein Problem beim Zusammensetzen der Bilder. Die Ursache kann in der Durchführung der Experimente gefunden werden. Es sind zunächst für alle einzelnen Temperaturen (50 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C und 250 °C) Messungen auf einer konstanten Höhe durchgeführt worden. Durch das Aufheizen des Heizblockes entstanden immer wieder natürliche Wartezeiten zwischen den einzelnen Messungen. Im weiteren Verlauf wurde die Höhe der Kamera verstellt, sodass der Heizblock von 250 °C auf 50 °C abkühlen musste. Auch hier entstanden wiederholt lange Wartezeiten. Wie bereits im Kapitel 3.1.2 erwähnt, wird ein Zollstock zur Höhenkontrolle der Kamera benötigt. Für das Aufstellen des Zollstockes ist es notwendig vorab die Tracerpartikel aus der Box abzusaugen. Nach der Zollstockaufnahme müssen für das Experiment die Tracerpartikel wieder der Box zugeführt werden. Hieraus ergibt sich eine weitere Fehlerquelle, da die Anzahl der vorher ausgesaugten Tracerpartikel mit denen der neu eingebrachten variieren kann.

Weitere Probleme ergeben sich durch das Öffnen der Laserboxtür, hier kann ein Windzug entstehen oder eine eintretende Person könnte die herrschende Temperatur beeinflussen. Ein unveränderbarer negativer Einfluss stellt die Lüftungsanlage der Laserbox auf der linken Seite dar. Sie könnte dauerhaft Veränderungen im Plume verursachen.

Da sich nach einigen Stunden die Partikelanzahl verringert hat, führt dies zu Problemen beim Zusammensetzen der Einzelbilder. Eine Erklärung hierfür kann sein, dass bei höheren Temperaturen die Tracerpartikel sieden können. Jedoch können nur die Partikel sieden, die sich über dem Heizblock befinden, da sonst an anderen Stellen die Luft in der Plexiglasbox nicht heiß genug wird. Diese Aussage lässt sich durch die Temperaturmessungen mit den PT100 bestätigen. Wenn der Heizblock auf eine Temperatur von 250 °C aufgeheizt worden ist, ist die Temperatur an bestimmten Stellen in der Laserbox nur auf etwa 30 °C angestiegen.

Für die Messungen und die Auswertungen wäre es aber wichtig, immer gleich viele Partikel in die Plexiglasbox einzubringen. Im jetzigen Verlauf der Experimente ist das nicht möglich, da kein Messinstrument vorhanden ist, welches die Menge des DEHS bestimmen kann.

Die Einbringung des DEHS erfolgt im Moment nur augenscheinlich.

Eine weiterer Fehlerquelle der durchgeführten Messungen stellt dar, dass alle Temperaturen mit dem selben Zeitabstand Δt gemessen worden sind. Zur Erinnerung, das Δt gibt den Zeitabstand an, in dem die zwei schnell aufeinander folgenden Aufnahmen angefertigt worden sind. Jedoch sind nicht alle Partikel bei unterschiedlichen Temperaturen gleich schnell. Mit Hilfe des Programmes kann ein optimales Δt für jede Temperatur berechnen werden. Für eine Temperatur von 50 °C ist das optimale Δt 1000 μs , für 100 °C ist das Δt 700 μs , für 150 °C ist das Δt 600 μs , für 200 °C ist das Δt 400 μs und für 250 °C ist das Δt 350 μs . Die ausgewerteten Messungen sind alle mit einem Δt von 1300 μs durchgeführt worden. Dies bedeutet, dass das Δt für alle Temperaturen zu groß gewählt worden ist. Wenn der Zeitabstand zu groß gewählt wird, kann die Kamera die Tracerpartikel nicht mehr verfolgen. Das Programm legt über das entstandene Bild ein Raster und versucht ein Partikel über einen kleinen Bildbereich zu verfolgen. Wenn der Partikel in den nächsten kleineren Bildbereich wandert, kann die Kamera diesen nicht mehr zuordnen.

Im Allgemeinen sei noch darauf hingewiesen, dass manche Messungen an unterschiedlichen Tagen stattgefunden haben und entsprechenden Umgebungseinflüssen ausgesetzt waren.

4.4 Vergleichsmessungen zur Fehleroptimierung

Es sind Messungen angefertigt worden, bei denen die Temperatur konstant blieb und nur die Höhe der Kamera verändert wurde. Somit sollte ein Vergleich mit den vorher fehlerbehafteten Messungen erstrebt werden.

In Abbildung 4.6 ist eine Komplettmessung bei 200 °C dargestellt.

Die Abbildung 4.4 ist vergleichbar mit der Abbildung 4.6, da beide Aufnahmen mit dem selben Δt durchgeführt worden sind.

Um eine der Hauptfehlerquellen, den Windzug durch die Laserboxtür, bei den Messungen zu vermeiden, verblieb eine Person über den gesamten Verlauf in der Laserbox und stellte die Höhen der Kamera manuell ein. So konnte man sichergehen, dass diese Fehlerquelle keinen Einfluss auf die Messungen haben wird.

In der Abbildung 4.6 ist deutlich erkennbar, dass die Einzelbilder sehr gut zusammen passen. Der Plume verläuft durch die Bilder einheitlich mittig. Die Breite des Plumes springt nicht wie bei der Abbildung 4.4 immer entlang der x-Achse. Zu erkennen ist dies im Übergang vom dritten Einzelbild ins vierte Einzelbild. Der Plume in Abbildung 4.6 verbreitert sich konstant laufend über alle Bilder.

Wenn man diese beiden Grafiken vergleicht, fällt auf, dass die maximale Geschwindigkeitskomponente der zwei Aufnahmen deutlich unterschiedlich ist. Die maximale Geschwindigkeitskomponente der Abbildung 4.4 liegt bei 1,20 m/s und die der Abbildung 4.6 liegt bei 0,90 m/s. Eine Auffälligkeit besteht darin, dass die beiden Aufnahmen mit der gleichen Temperatur gemessen worden sind und keine gravierende Unterschiede erwartet worden sind. Eine Person in der Laserbox lässt eigentlich er-

warten, dass die Temperatur in der Box ansteigt und somit die Partikel sich schneller bewegen. Dies ist entgegen der Erwartungen nicht eingetreten. Eine Ursache kann wiederum darin liegen, dass die Messungen an unterschiedlichen Tagen durchgeführt worden sind und die Umgebungstemperaturen die Experimente beeinflusst haben.

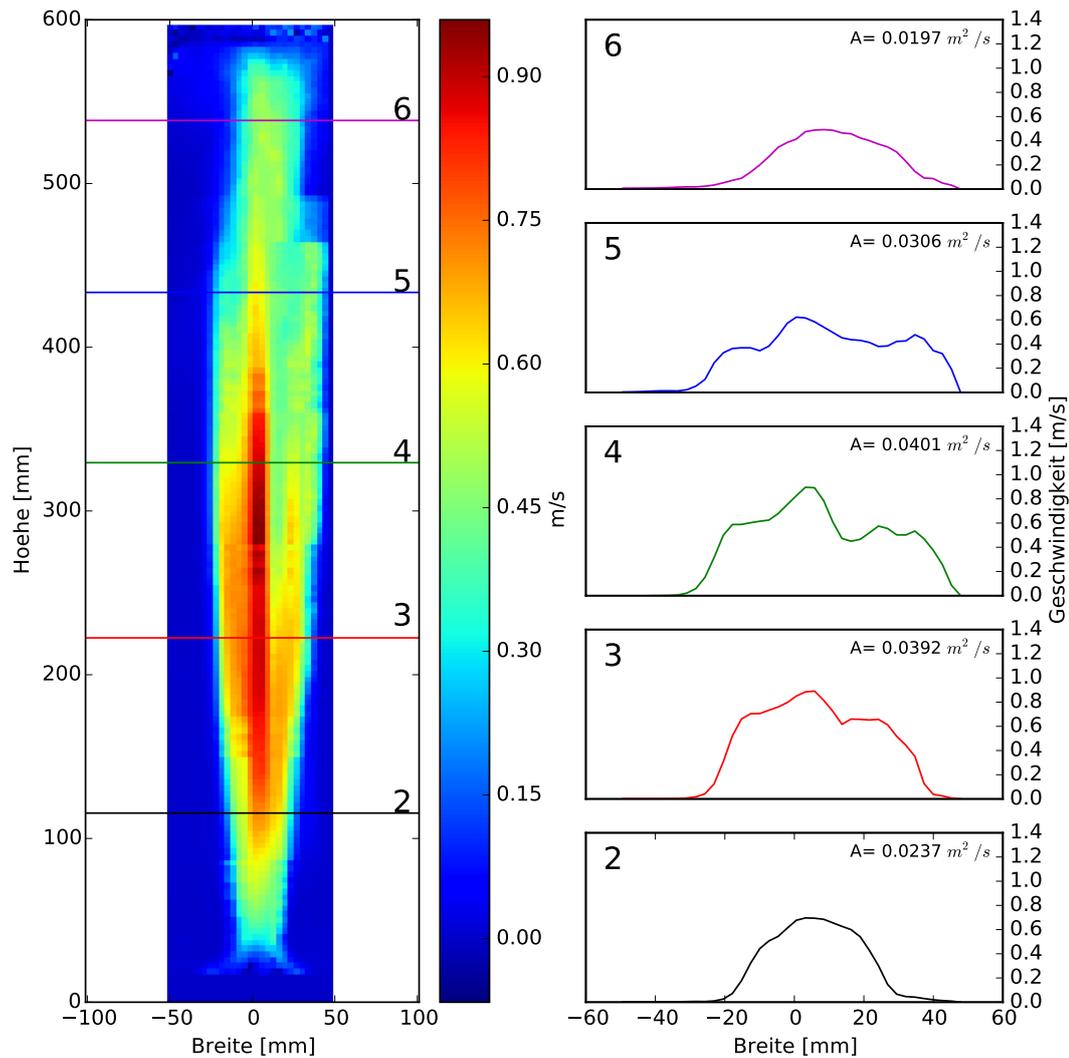


Abbildung 4.6: Abbildung der Ergebnisse für die Komplettmessung bei 200 °C mit einem Δt von 1300 μs

Um zu vergleichen, welchen Einfluss das Δt in den Messungen besitzt, wurde mit dem Programm ein optimales Δt von 639 μs berechnet.

Um die Aufnahmen mit den unterschiedlichen Δt zu vergleichen, ist eine Aufnahme

über die gesamte Höhe mit einem Δt von $639 \mu\text{s}$ und einer Temperatur von $200 \text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt worden. Die entstandene Grafik ist in Abbildung 4.7 zu sehen.

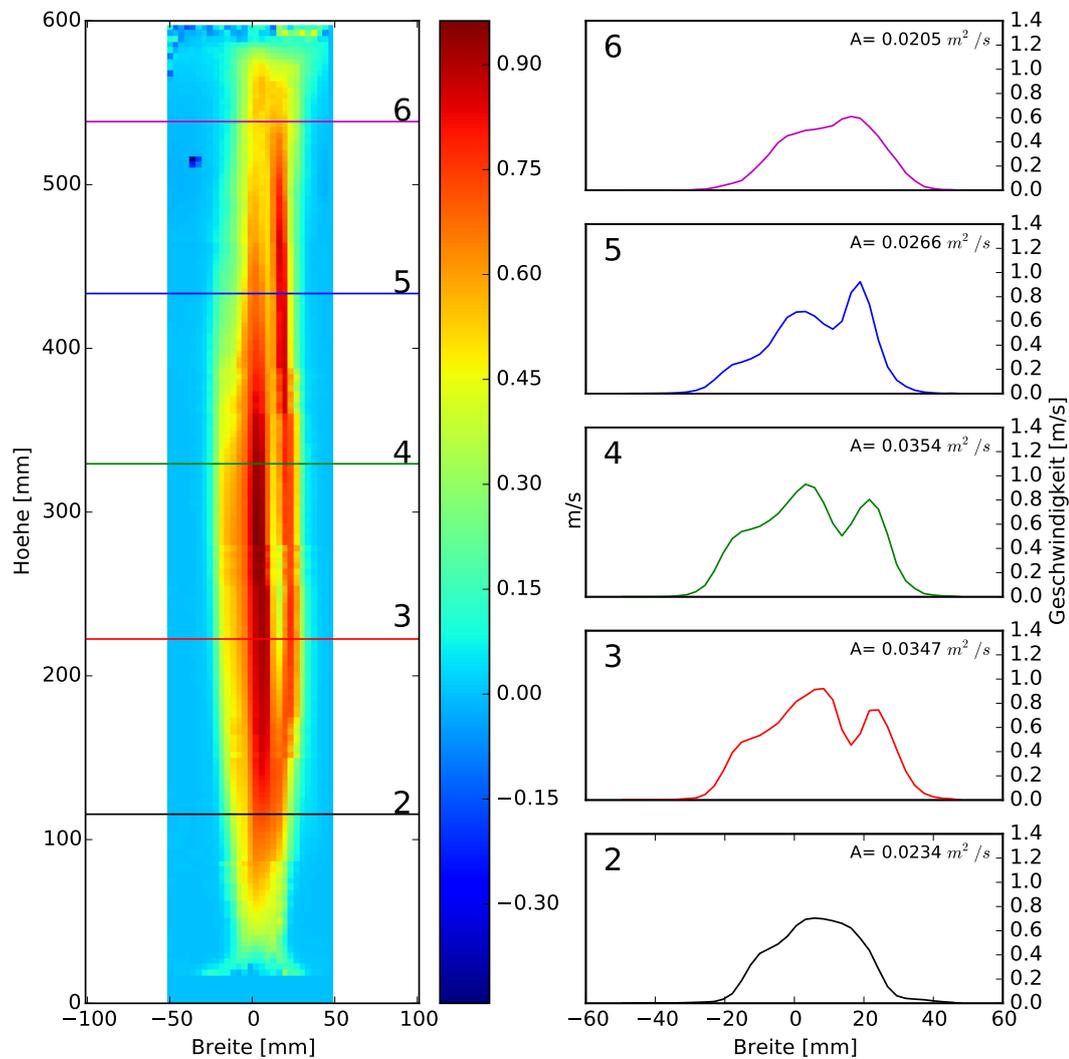


Abbildung 4.7: Abbildung der Ergebnisse für die Komplettmessung bei $200 \text{ }^\circ\text{C}$ mit einem Δt von $639 \mu\text{s}$

Der Plume in der Messung mit einem Δt von $639 \mu\text{s}$ ist schmäler als der Plume in Abbildung 4.6, welcher mit einem größerem Δt von $1300 \mu\text{s}$ gemessen worden ist. Die Abbildung 4.7 zeigt, wie die vorherigen Messungen an verschiedenen Tagen durchgeführt, einen „Doppelstrahl“ auf. Dies lässt sich auch an den rechten Geschwindigkeitskurven erkennen, dort sind zwei Maxima vorhanden. Auffällig an dieser Messung ist, dass sich die maximale Geschwindigkeitskomponente in der dritten,

vierten und fünften Kurve wiederfindet. Im Unterschied zu den anderen Messungen, bei denen sich die Geschwindigkeit von Kurve zu Kurve steigert.

Die schnellen Partikel verteilen sich in Abbildung 4.7 über alle Höhen. Der „Flächenstrom“ der einzelnen Kurven passt im Vergleich zu den anderen beiden Abbildungen zusammen. Die Flächen der Kurven sind ungefähr gleich groß. Das Maximum der Kurven liegt auch hier bei 0,90 m/s und passt nicht zu der Messung in Abbildung 4.4, obwohl auch hier die Messungen mit der gleichen Temperatur gemessen worden sind.

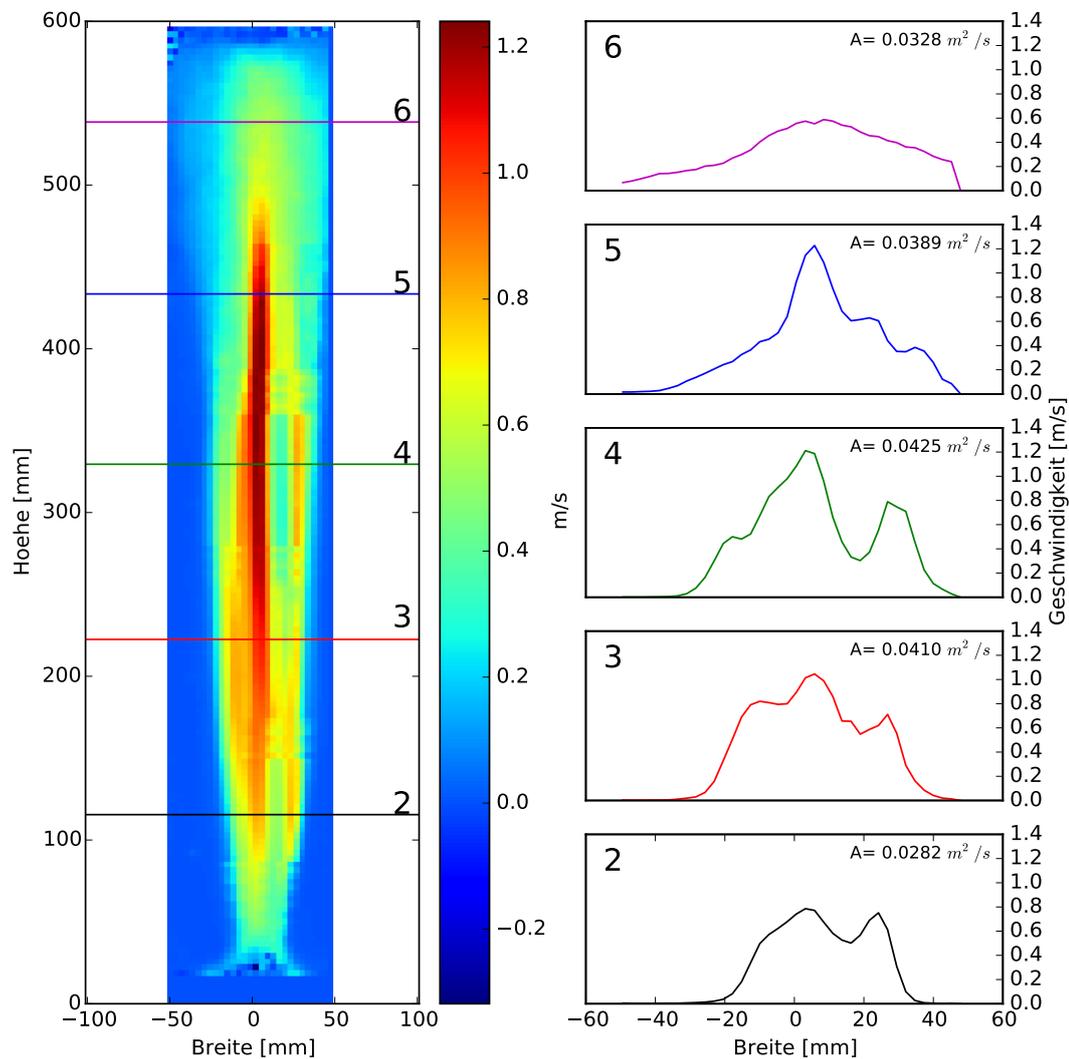


Abbildung 4.8: Abbildung der Ergebnisse für die Komplettmessung bei 250 °C mit einem Δt von 497 μs

Um zu vergleichen, welchen Einfluss das Δt bei einer Temperatur von 250 °C besitzt, wurde eine Messung mit einem Δt von 497 μs durchgeführt. Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 4.8 zu sehen.

In diesem Gesamtbild sind die schnellsten Partikel nicht, wie in Abbildung 4.5 im letzten Einzelbild vorzufinden, sondern schon ab dem dritten Bild. Auffällig ist weiterhin, dass die maximale Geschwindigkeitskomponente nicht gleich ist, obwohl die Messungen bei der selben Temperatur durchgeführt worden sind. In Abbildung 4.5 liegt sie bei 1,05 m/s und in der Abbildung 4.8 bei 1,20 m/s.

In beiden Grafiken weist die dritte Geschwindigkeitskurve mehrere Maxima auf. Bei der Messung in Abbildung 4.5 prägt sich dies jedoch noch deutlicher aus.

Durch den Vergleich der vierten Geschwindigkeitskurve der beiden Messungen, wird deutlich wie abhängig die Messungen von der dazwischen liegenden Zeit sind. In der einen Kurve erkennt man deutlich einen „Doppelstrahl“, welcher in der anderen Kurve nicht vorzufinden ist. Auffällig an der vierten Kurve ist außerdem, dass der „Flächenstrom“ in Abbildung 4.8 doppelt so groß ist wie in Abbildung 4.5.

Dieses Phänomen ist auch in dem Vergleich der dritten Kurven zu sehen.

Wie in Abbildung 4.5 verbreitert sich auch hier der Plume entlang der x-Achse in der sechsten Geschwindigkeitskurve. Jedoch ist das Maximum in Abbildung 4.5 deutlich größer. Das bedeutet, dass dort schnellere Partikel erkennbar sind.

5 Schlussbetrachtung

5.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit ist die Messtechnik der Particle Image Velocimetry, kurz auch PIV genannt, vorgestellt worden. Diese Messtechnik wird für Experimente im Modellmaßstab eingesetzt und soll im späteren Verlauf zielgerichtet zur Erforschung von U-Bahnbränden dienen. PIV ist ein berührungsloses, optisches Verfahren, welches für die Geschwindigkeitsmessungen von Partikeln eingesetzt wird. Im Bereich des Brandschutzes ist diese Messtechnik relativ unbekannt.

In diesem Experiment geht es darum, die Messtechnik der Particle Image Velocimetry kennenzulernen. Weiterhin sollen Anregungen geschaffen werden, die Erkenntnisse des PIVs in der Brandbekämpfung qualifiziert einzusetzen.

Zur Vereinfachung der Experimente wird kein Nachbau eines U-Bahnhofs, sondern eine rechteckige Plexiglasbox verwendet. In der Box soll die durch einen Kupferblock erwärmte Luft experimentell betrachtet werden. Mit Hilfe von sogenannten Tracerpartikeln wird die Geschwindigkeit der erwärmten Luft indirekt berechnet. Diese Tracerpartikel werden in die Plexiglasbox eingebracht und mittels eines Lasers angestrahlt. Das Licht wird von den Tracerpartikeln gestreut und anschließend von einer CCD-Kamera aufgenommen. Um den Weg eines Partikels zu bestimmen, werden zwei schnell hintereinander folgende Bilder aufgenommen. Das entsprechende Programm kann aus diesen Aufnahmen den Weg des Partikels berechnen.

Damit die gesamte Höhe der Plexiglasbox erfassen wird, werden sechs Aufnahmen in unterschiedlichen Höhen ausgeführt.

Diese sechs Einzelbilder sind anschließend mit einem dafür geschriebenen Python Skript zu einem Gesamtbild zusammengesetzt.

Das Ergebnis der Auswertung zeigt, dass die gemessenen Strömungen auf den Einzelbilder nicht exakt zusammenpassten. Die Messungen der Einzelbilder wurden an verschiedenen Tagen vorgenommen. In diesem Umstand könnte eine mögliche Ursache erklärt werden. Ebenfalls auffällig war, dass sich an manchen Stellen ein „Doppelstrahl“ in den Bildern ausgeprägt hat. In einem „Doppelstrahl“ gibt es zwei Bereiche in denen sich schnelle Partikel befinden. Erwartet in diesem Experiment wurde eigentlich Hauptstrahl in der Mitte.

Um die Ursache für die nicht passenden Einzelbilder zu ermitteln, sind im Verlauf des Experimentes ergänzende Messungen angefertigt worden. In diesen Messungen

blieb die Temperatur konstant und nur die Höhe der Kamera wurde verändert. Die Auswertung dieser Aufnahmen hat ergeben, dass der Übergang der Einzelbilder fließender ist. Die schnellen Partikel wurden in jedem nächsten Einzelbild wiedergefunden. Im Gegensatz zu den vorab gemachten Aufnahmen, hier springen die gemessenen Geschwindigkeiten der Partikel von Einzelbild zu Einzelbild.

5.2 Fazit und Ausblick

Diese Experimente haben viele Informationen über die Anwendung und Durchführung der Particle Image Velocimetry Messtechnik erzeugt.

Es wäre von Vorteil, wenn in der Zukunft noch weitere Experimente zur Optimierung durchgeführt werden könnten.

Um Fehlerquellen bei den Messungen zu minimieren sollte eine Traversiereinheit die Kameras elektrisch in ihrer Höhe verstellen. Mit dieser Traversiereinheit könnten die Bilder mit dem Zollstock entfallen. Durch den Einsatz dieser Einheit müsste die Laserbox während der Experimente nicht mehr betreten werden und der ständige Austausch der Partikel würde ausbleiben.

Für die Zukunft wäre es wünschenswert, wenn durch weitere Experimente die Ursachen für den auftretenden „Doppelstrahl“ geklärt werden könnten.

Literaturverzeichnis

- Frederik Blumrich. *Optische korrelationsbasierte Messtechnik mittels zufälliger Punktemuster*. PhD thesis, Universität Stuttgart, 2009.
- M. Breuer. Particle-Image-Velocimetry. URL [HTTP://WWW.HSU-HH.DE/DOWNLOAD-1.5.1.PHP?BRICK_ID=2GGA3QMCVTWZTMLJ](http://www.hsu-hh.de/download-1.5.1.php?brick_id=2GGA3QMCVTWZTMLJ). Vertiefungspraktikum Strömungsmechanik - Helmut Schmidt Universität, Zugriff: 4. Februar 2015.
- Rodney A. Bryant. The application of stereoscopic PIV to measure the flow of air into an enclosure containing a fire, April 2009. URL [HTTP://LINK.SPRINGER.COM/ARTICLE/10.1007/S00348-009-0656-Z](http://link.springer.com/article/10.1007/s00348-009-0656-z). Zugriff: 09. März 2015.
- Chemie.de. Brechzahl. URL [HTTP://WWW.CHEMIE.DE/LEXIKON/BRECHZAHL.HTML](http://www.chemie.de/lexikon/brechzahl.html). Zugriff: 21. Januar 2015.
- Lukas Deimling. Farbcodierte Particle-Image-Velocimetry (PIV) zur Diagnose von schnellen Flammen, Oktober 1999. Wissenschaftliche Schriftreihe des Fraunhofer ICT - Band 28.
- Doku.net. Definition der Laserklassen. URL [HTTP://WWW.DOKU.NET/UNTERARTIK/DEFINITION.HTM](http://www.doku.net/unterartikel/definition.htm). Zugriff: 3. Februar 2015.
- Enzyklo.de. Festkörperlaser. URL [HTTP://WWW.ENZYKLO.DE/BEGRIFF/FESTK%C3%B6RPERLASER](http://www.enzyklo.de/begriff/festk%C3%B6rperlaser). Zugriff: 3. Februar 2015.
- InnoLas. SpitLight Compact 200: Flash lamp-pumped ND : YAG - Laser. URL [HTTP://WWW.INNOLAS-LASER.DE/INDEX.PHP/DE/WISSENSCHAFTLICHE-LASER/BLITZLAMPEN/SPITLIGHT-COMPACT-200.HTML](http://www.innolas-laser.de/index.php/de/wissenschaftliche-laser/blitzlampen/spitlight-compact-200.html). Zugriff: 3. Februar 2015.
- M. Raffel; C. Willert; S. Wereley; J. Kompenhans. *Particle Image Velocimetry - A Practical Guide*. Springer, 2007.
- Dominik Jaeger; Lars Krieger. Protokoll zum Versuch - PIV. URL [HTTP://WWW.PHYSIK.UNI-FREIBURG.DE/~DOJAEGER/PIV/PIV-ENDG%C3%BCLTIG.PDF](http://www.physik.uni-freiburg.de/~dojaeger/PIV/PIV-ENDG%C3%BCLTIG.PDF). Zugriff: 22. Januar 2015.
- Dipl. Met. Carsten Kykal. *Einsatz der Photo-Thermophorese zur Aerosolcharakterisierung*. PhD thesis, Technische Universität München, 2010.

- LaVision. DaVis - Die Komplettsoftwarelösung für intelligente Imaging Applikationen, a. URL [HTTP://WWW.LAVISION.DE/DE/PRODUCTS/DAVIS.PHP](http://www.lavision.de/de/products/davis.php). Zugriff: 30. Januar 2015.
- LaVision. PIV Kameras, b. URL [HTTP://WWW.LAVISION.DE/DE/PRODUCTS/CAMERAS/PIV_CAMERAS.PHP](http://www.lavision.de/de/products/cameras/piv_cameras.php). Zugriff: 30. Januar 2015.
- LaVision. Mie Streuung, c. URL [HTTP://WWW.LAVISION.DE/DE/TECHNIQUES/MIE-SCATTERING.PHP](http://www.lavision.de/de/techniques/mie-scattering.php). Zugriff: 19. Februar 2015.
- Martin Schlobach. Volumenstrom und Strömungsgeschwindigkeit. URL [HTTP://WWW.HAUSTECHNIKVERSTEHEN.DE/VOLUMENSTROM-UND-STROEMUNGSGESCHWINDIGKEIT/](http://www.haustechnikverstehen.de/volumenstrom-und-stroemungsgeschwindigkeit/). Zugriff: 2. März 2015.
- Sigrist Process-Photometer. Brechungsindex. URL [HTTP://WWW.PHOTOMETER.COM/DE/ABC/SHOW.HTML?Q=BRECHUNGSINDEX](http://www.photometer.com/de/abc/show.html?q=brechungsindex). Zugriff: 3. Februar 2015.
- Spektrum. Brechzahl. URL [HTTP://WWW.SPEKTRUM.DE/LEXIKON/PHYSIK/BRECHZAHL/1958](http://www.spektrum.de/lexikon/physik/brechzahl/1958). Zugriff: 3. Februar 2015.
- I. Nakaya; T. Tanaka; M. Yoshida; K. Stechler. Fire Safety Journal, May 1986. URL [HTTP://WWW.SCIENCEDIRECT.COM/SCIENCE/JOURNAL/03797112/10/3](http://www.sciencedirect.com/science/journal/03797112/10/3). Zugriff: 09. März 2015.
- Topas GmbH. Datenblatt DEHS. URL [HTTP://WWW.TOPAS-GMBH.DE/DATEIEN/PROSPEKT/DEHS_PRSPD.PDF](http://www.topas-gmbh.de/dateien/prospekt/dehs_prspd.pdf). Zugriff: 3. Februar 2015.
- Alexandros Zachos. *Entwicklung und Einsatz der Particle Image Velocimetry zur Untersuchung der Strömungsbedingungen bei der Flotation*. PhD thesis, Universität Gesamthochschule Essen, 1993. Verlag Shaker.
- K. Zähringer. Messtechnik - Optische Messverfahren [2/3]. Vorlesungsfolien von der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Zugriff: 4. Februar 2015.

A Python Skript

A.1 Erstellung eines Gesamtbildes und dazugehörigen Geschwindigkeitskurven

Dieses Python Skript dient für die Zusammensetzung der Einzelbilder und die dazugehörigen Geschwindigkeitskurven.

Listing A.1: Python Skript

```
2 #Bibliotheken einladen
4 import numpy as np
6 import matplotlib.pyplot as plt
8 import matplotlib.gridspec as gridspec
10 #Einzulesende Daten definieren
11 data1=('50_1H_1K.txt')
12 data2=('50_1H_2K.txt')
13 data3=('50_2H_2K.txt')
14 data4=('50_3H_2K.txt')
15 data5=('50_4H_2K.txt')
16 data6=('50_5H_2K.txt')
18 #Verschiebung der einzelnen Bilder untereinander festlegen
20 y_shift=[50, 50, 164, 283, 402, 451]
23 datafiles = [data1,data2,data3,data4,data5,data6]
25 #Funktion zum Einlesen der Daten
27 def ReadFile(File, From=1, To=-1):
28     dataFile = open(File)
29     dataFile.readline()
30     dataSet = dataFile.readlines()
32 #Listen fuer Datenreihen erstellen
34     X = []
35     Y = []
36     VX = []
37     VY = []
39 #Schleife zum Loeschen von '\n',umwandeln von Komma in einem Punkt
```

```
40 #und trennen der Zeilen nach '\t'
42     for data in dataSet:
43         data = data.replace('\n','')
44         data = data.replace(',','.')
45         entry = data.split('\t')
47 #Umgewandelte Daten den neuen Listen anhaengen
49     X.append(float(entry[0]))
50     Y.append(float(entry[1]))
51     VX.append(float(entry[2]))
52     VY.append(float(entry[3]))
54 #Listen in Arrays umwandeln
56     X = np.array(X)
57     Y = np.array(Y)
58     VX = np.array(VX)
59     VY = np.array(VY)
62 #Funktion Readfile() soll die Arrays ausgeben
64     return X,Y,VX,VY
67 #Funktion erstellen fuer die Berechnung der absoluten
68 #Geschwindigkeit
70 def Colorarray(vx_neu,vy_neu):
72 #Berechnung der absoluten Geschwindigkeit
74     colorarray=np.sqrt(vx_neu**2+vy_neu**2)
76     return colorarray
78 #Erzeugen leerer Listen fuer die globalen Werte
80 global_x = []
81 global_y = []
82 global_vx = []
83 global_vy = []
85 #Schleife erstellen um Bilder uebereinander zusammenzufuegen
87 for j in range(len(datafiles)):
88     X,Y,VX,VY = ReadFile(datafiles[j])
89     Y = Y + y_shift[j]
90     VY[np.abs(VY) > 2] = 0.0
91     global_x.append(X)
92     global_y.append(Y)
93     global_vx.append(VX)
94     global_vy.append(VY)
96 #Definieren der Wertebereiche des Gitters fuer das zu erzeugende
97 #Bild
99 x_min = -90.0
100 x_max = 90.0
101 y_min = -150.0
102 y_max = 600.0
104 #Abstand der Gitterlinien
106 dx = 4.0
```

```
107 dy = 4.0
109 #Erstellen des Rasters
111 sx=np.arange(x_min, x_max, dx)
112 sy=np.arange(y_min, y_max, dy)
114 #Erstellen der Gitterpunkte
116 gx, gy = np.meshgrid(sx, sy)
118 gvz = gx * 0.0
119 gvz_n = gx * 0.0
122 #Schleife, um aus jeder Datei die Werte zu lesen
124 for j in range(len(datafiles)):
126     for i in range(len(global_x[j])):
127         x = global_x[j][i]
128         y = global_y[j][i]
129         vy = global_vy[j][i]
131 #Pruefen, in welche Gitterzelle befinden sich die einzelnen
132 #Datenpunkte
134         ix = (x-x_min) / dx
135         iy = (y-y_min) / dy
139         gvz_n[-iy, ix] += 1
140         gvz[-iy, ix] += vy
142 #Mittlung
143 gvz /= gvz_n
145 #Funktion fuer das Oeffnen der einzelnen Dateien
147 def readFile(File,From=1, To=-1):
148     dataFile = open(File)
149     dataFile.readline()
150     dataSet = dataFile.readlines()
153 #Listen fuer Datenreihen erstellen
155     X = []
156     Y = []
157     VY = []
160 #Schleife zum Loeschen von '\n',umwandeln von Komma in einem Punkt
161 #und trennen der Zeilen nach '\t'
163     for data in dataSet:
164         data = data.replace('\n','')
165         data = data.replace(',','.')
166         entry = data.split('\t')
169 #Umgewandelte Daten den Listen anhaengen
171         X.append(float(entry[0]))
172         Y.append(float(entry[1]))
173         VY.append(float(entry[3]))
```

```
175 #Erstellen von leeren Listen
177     vy=[]
178     all_vy = []
179     all_y = []
182 #geht die Liste von Y durch und durchsucht welche Y-Werte gleich
183 #sind und packt sie in die vy Liste. Wenn die Y-Werte nicht mehr
184 #gleich sind, packt er die alten Y-Werte in eine neue Liste all_y.
185 #Dann wird die vy Liste geloescht fuer die naechsten Y-Werte
187     yact = Y[0]
188     for i in range(len(VY)-1):
189         if Y[i] == yact:
190             vy.append(VY[i])
191         else:
192             all_vy.append(vy)
193             all_y.append(yact)
194             vy = []
195             vy.append(VY[i])
196             yact = Y[i+1]
199 #raussuchen der dazugehoerigen X-Werte
201     x = X[:len(all_vy[0])]
204 #Sucht den Y-Wert heraus, der in der Mitte steht
206     yi_med = int(len(all_y) / 2)
209     #Berechnet das Integral zu der Geschwindigkeitskurve
211     a= np.sum(all_vy[yi_med]) * ((x[1]-x[0])*10**(-3))
213     return yi_med,x,all_vy,all_y,a
215 A=[]
217 for i in range(1,len(datafiles)):
218     A.append(readFile(datafiles[i])[4])
219 print A
221 #Groesse des Gesamtbildes
223 plt.figure(figsize = (20,10))
225 #Erstellen eines Gesamtbildes aus dem zusammengesetzten Bildern und
226 #den Geschwindigkeitskurven
228 gs1=gridspec.GridSpec(5, 4)
229 ax1=plt.subplot(gs1[:, 0])
231 #Plotten der Linken zusammengesetzten Grafik
233 plt.imshow(gvx,extent=(x_min,x_max,y_min,y_max),interpolation='nearest')
236 y2_med,x2,all_vy2,all_y2,a=readFile(data2)
237 y3_med,x3,all_vy3,all_y3,a=readFile(data3)
238 y4_med,x4,all_vy4,all_y4,a=readFile(data4)
239 y5_med,x5,all_vy5,all_y5,a=readFile(data5)
240 y6_med,x6,all_vy6,all_y6,a=readFile(data6)
```

```
242 all_vy2[y2_med]=np.array(all_vy2[y2_med])
243 all_vy3[y3_med]=np.array(all_vy3[y3_med])

246 #linkes zusammengesetztes Bild
247 ax1.axhline(50+65.5, color = 'k')
248 ax1.text(85,116,'2',fontsize='18')
249 ax1.axhline(229.5, color = 'r')
250 ax1.text(85,230,'3',fontsize='18')
251 ax1.axhline(348.5, color = 'g')
252 ax1.text(85,349,'4',fontsize='18')
253 ax1.axhline(467.5, color = 'b')
254 ax1.text(85,468,'5',fontsize='18')
255 ax1.axhline(516.5, color = 'm')
256 ax1.text(85,517,'6',fontsize='18')
257 ax1.axis('equal')
258 plt.xlabel("Breite [mm]")
259 plt.ylabel("Hoehe [mm]")
260 ax1.set_ylim(0,600)
261 cb=plt.colorbar()
262 cb.set_label('m/s')

264 #erste Geschwindigkeitkurve auf der rechten Seite
265 ax2=plt.subplot(gs1[4,1:2])
266 ax2.set_yticks([])
267 ax2_2 = ax2.twinx()
268 ax2_2.plot(x2,all_vy2[y2_med], color = 'k')
269 ax2_2.text(-55,1.1,'2',fontsize = '18')
270 string='A= %.4f $m^2/s$'%A[0]
271 ax2_2.text(16,1.2,string,fontsize = '10')
272 ax2.set_xlabel('Breite[mm]')
273 ax2_2.set_ylim(0,1.4)

275 #zweite Geschwindigkeitkurve auf der rechten Seite
276 ax3=plt.subplot(gs1[3, 1:2])
277 ax3.set_yticks([])
278 ax3_2 = ax3.twinx()
279 ax3_2.plot(x3, all_vy3[y3_med], color = 'r')
280 ax3_2.text(-55,1.1,'3',fontsize = '18')
281 string='A= %.4f $m^2/s$'%A[1]
282 ax3_2.text(16,1.2,string,fontsize = '10')
283 ax3_2.set_xticks([])
284 ax3_2.set_ylim(0,1.4)

286 #dritte Geschwindigkeitkurve auf der rechten Seite
287 ax4=plt.subplot(gs1[2, 1:2])
288 ax4.set_yticks([])
289 ax4_2 = ax4.twinx()
290 ax4_2.plot(x4, all_vy4[y4_med], color = 'g')
291 ax4_2.text(-55,1.1,'4',fontsize = '18')
292 string='A= %.4f $m^2/s$'%A[2]
293 ax4_2.text(16,1.2,string,fontsize = '10')
294 ax4_2.set_ylabel('Geschwindigkeit [m/s]')
295 ax4_2.set_xticks([])
296 ax4_2.set_ylim(0,1.4)

298 #vierte Geschwindigkeitkurve auf der rechten Seite
299 ax5=plt.subplot(gs1[1, 1:2])
300 ax5.set_yticks([])
301 ax5_2 = ax5.twinx()
302 ax5_2.plot(x5, all_vy5[y5_med], color = 'b')
303 ax5_2.text(-55,1.1,'5',fontsize = '18')
304 string='A= %.4f $m^2/s$'%A[3]
305 ax5_2.text(16,1.2,string,fontsize = '10')
306 ax5_2.set_xticks([])
307 ax5_2.set_ylim(0,1.4)
```

```
309 #fuenfte Geschwindigkeitkurve auf der rechten Seite
310 ax6=plt.subplot(gsl[0, 1:2])
311 ax6.set_yticks([])
312 ax6_2=ax6.twinx()
313 ax6_2.plot(x6, all_vy6[y6_med],color = 'm')
314 ax6_2.text(-55,1.1,'6',fontsize = '18')
315 string='A= %.4f $m^2/s$'%A[4]
316 ax6_2.text(16,1.2,string,fontsize = '10')
317 ax6.grid(axis = 'x')
318 ax6_2.set_xticks([])
319 ax6_2.set_ylim(0,1.4)
320 ax6.grid(axis='both')

322 #Erstellen eines PDF-Dokumentes
323 string = 'Geschwindigkeit_50grad.pdf'
324 plt.savefig(string)

326 # Plot anzeigen
327 plt.show()
```