

# Synthetic Schlieren Imaging Laborbericht

Emanuel Mondgenast  
Markus Gartmann

15. Dezember 2010

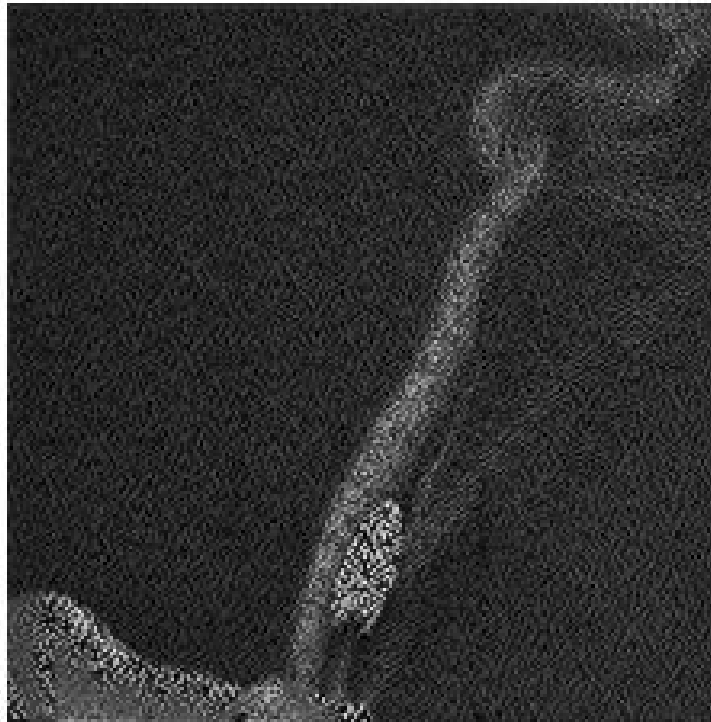


Abbildung 1: Dichteänderung verursacht durch die Flamme eines Feuerzeugs  
[3]

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1	Probleme der optischen Dichtemessung . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Schlieren Messungen</b>	<b>3</b>
2.1	Prinzip der synthetischen Schlieren-Methode . . . . .	3
2.2	Anwendungsbeispiele . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Aufbau</b>	<b>4</b>
3.1	Kamera . . . . .	4
3.2	Bezugsmuster . . . . .	4
3.3	Heisser Luftstrom . . . . .	5
3.4	Räumlicher Aufbau . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Beschreibung der Analysemethoden</b>	<b>5</b>
4.1	Pattern Matching . . . . .	5
4.2	Abel Inversion . . . . .	6
4.3	Berechnung der Temperaturen . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>6</b>
5.1	CO <sub>2</sub> -Ringe . . . . .	6
5.2	Keilprisma Experiment . . . . .	6
5.3	Heisser Luftstrom . . . . .	6
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Perspektive</b>	<b>8</b>
6.1	Mängel . . . . .	8
6.2	Mögliche Verbesserungen . . . . .	9
	<b>Literature</b>	<b>10</b>
<b>A</b>	<b>Nomenklatur</b>	<b>10</b>
<b>B</b>	<b>Selbstgeschriebener MATLAB code</b>	<b>10</b>

# 1 Einleitung

Dichteänderungen in Fluiden lassen sich nur schwer direkt messen. Die Tatsache, dass gleichzeitig auch andere Grössen beeinflusst werden, ermöglicht es uns jedoch auf die Dichte zu schliessen. Eine sehr einfache Anwendung ist die Schlieren-Methode, welche Änderungen des Brechungsindex der Luft sichtbar macht. Dieser hat einen Einfluss auf die Ablenkung der Lichtstrahlen, welche von einem zufällig angeordneten Hintergrund auf die Linse der Kamera treffen. Mittels einer anschliessenden Bildbearbeitung kann die Änderung sichtbar gemacht werden- in Echtzeit. Die Grösse des gemessenen Bereiches kann beinahe beliebig gross gewählt werden. So kann zum Beispiel das Verhalten der, von einem Hubschrauber verursachten Strömung, untersucht werden. Der Aufbau ist dabei ziemlich simpel und kostengünstig.

## 1.1 Probleme der optischen Dichtemessung

Diese Messmethode lässt es nicht zu, die Dichte in einem bestimmten Punkt darzustellen. Es wird die Summe der Änderungen über die ganze Distanz zwischen dem Bezugsmuster und der Kamera dargestellt. Dabei werden jegliche Störungen in der Luft, verursacht durch Temperaturunterschiede, sich bewegende Teile oder Ähnlichem, miteinbezogen. Durch Mittelung der Resultate kann dieser Einfluss zwar reduziert werden, ist aber je nach Messung trotzdem nicht vernachlässigbar.

# 2 Schlieren Messungen

## 2.1 Prinzip der synthetischen Schlieren-Methode

Der Brechungsindex der Luft ist proportional zur Dichte, welche durch Bewegung oder Temperaturunterschiede verändert wird.

$$n - 1 = K \cdot \rho \quad (1)$$

Der Einfluss des entstehenden Gradienten wird in Abbildung 2 deutlich. Der Brechungsindex verändert sich, wodurch der Lichtstrahl um  $\epsilon$  abgelenkt wird. Auf dem Sensor der Kamera wird er schliesslich mit der Verschiebung  $\delta$  registriert.

Die Ablenkung  $\epsilon$  lässt sich mit der Formel 2 und 3 berechnen.

$$\tan \epsilon_x \approx \frac{1}{n_0} \int_{z_0}^{z_1} \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial x} dz \quad (2)$$

$$\tan \epsilon_y \approx \frac{1}{n_0} \int_{z_0}^{z_1} \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial y} dz \quad (3)$$

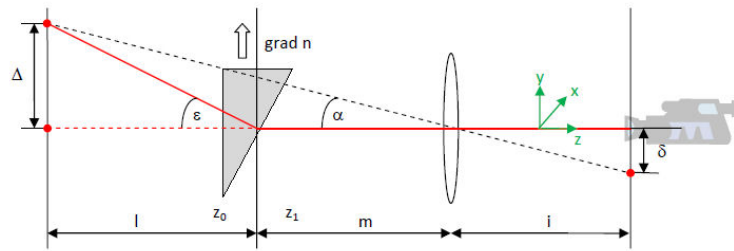


Abbildung 2: Ablenkung des Lichtstrahles um  $\epsilon$  [3]

## 2.2 Anwendungsbeispiele

Um zu untersuchen, wie eine Flugzeugnase durch die Luft schneidet, hängte man bei der NASA ein Flugzeugmodell in den Windkanal. Die Linien stellen Schockwellen dar, welche durch die Nase erzeugt werden [2].

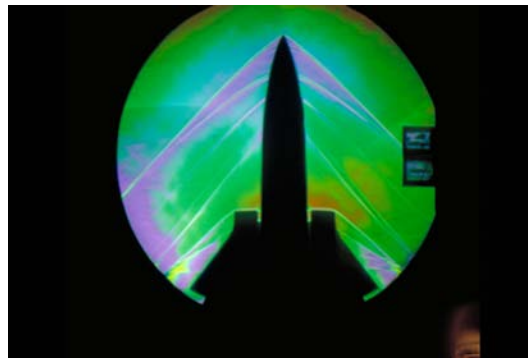


Abbildung 3: Schlieren Technik angewandt auf eine Flugzeugnase [1]

## 3 Aufbau

### 3.1 Kamera

Für den Versuch wird eine handelsübliche Digitalkamera (IDS uEye 2230SE) mit einer Auflösung von 1024x768 Pixel verwendet. Die Kamera hat eine Linse mit 50mm Brennweite und ist per Schnittstelle mit dem Computer verbunden.

### 3.2 Bezugsmuster

Als Hintergrund wird ein A0 Poster mit einem Muster aus weissen und schwarzen Punkten verwendet, welche zufällig verteilt sind.

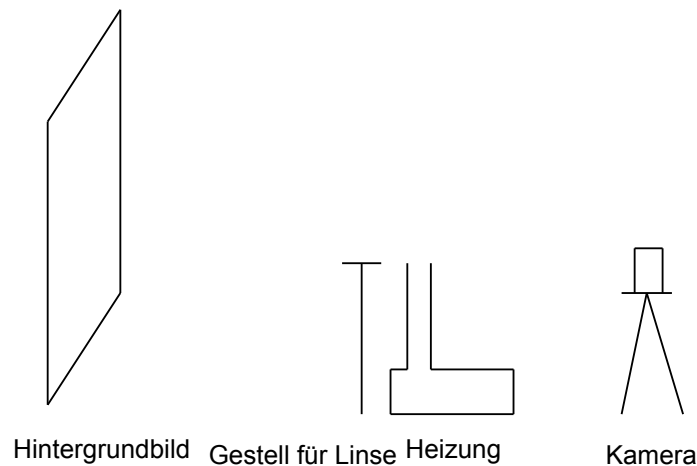


Abbildung 4: Versuchsanordnung

### 3.3 Heisser Luftstrom

Der Luftstrom durchläuft eine Keramikheizung und wird dort erwärmt. Für den Versuch wird der Luftstrahl wahlweise auf  $40^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$  oder  $120^{\circ}\text{C}$  erhitzt und über eine Röhre senkrecht nach oben ausgestossen.

### 3.4 Räumlicher Aufbau

Das Plakat hängt an der Wand. Direkt hinter dem Auslassrohr der Heizung befindet sich ein Gestell, auf welches eine Linse befestigt werden kann, um die Einrichtung zu kalibrieren. Die Kamera ist ungefähr 10m von der Wand entfernt und liegt auf der optischen Achse des Bildes. Dies wird in Abbildung 4 dargestellt.

## 4 Beschreibung der Analysemethoden

### 4.1 Pattern Matching

In MATLAB wird das aufgenommene Bild mit dem Referenzmuster verglichen. Die Verschiebung verursacht durch die geringere Dichte der Luft wird gemessen indem die Korrelation zwischen den beiden Aufnahmen bestimmt wird.

Um daraus die Ablenkung zu berechnen, muss der Aufbau geeicht werden. Dies geschieht mittels einer Linse, mit einem bekannten Ablenkungswinkel.

## 4.2 Abel Inversion

Um die dreidimensionale Verteilung des Brechungsindex  $n$  zu erhalten reicht ein einzelnes Kamerabild nicht aus. Man braucht mehrere Aufnahmen, um daraus die Daten zu berechnen.

Für den Fall einer axialsymmetrischen Dichteverteilung ist es jedoch möglich mittels der Abel Inversion die dreidimensionalen Werte herzuleiten.

## 4.3 Berechnung der Temperaturen

Da der Brechungsindex proportional zur Dichte ist und die Dichte linear von der Temperatur abhängt, gibt es einen sehr einfachen Weg die Kalibration der Verschiebungsdaten vorzunehmen. Die Raumtemperatur und die des heissen Luftstrahls ist bekannt. Nun müssen der Maximal- und Minimalwert aus der Abel Inversion der Raumtemperatur, respektive der Austrittstemperatur des Luftstrahls entsprechen. Um die restlichen Werte auszurechnen wird linear interpoliert.

# 5 Diskussion

## 5.1 $CO_2$ -Ringe

Kohlendioxyd hat mit  $1.98 \frac{kg}{m^3}$  bei Standardbedingungen eine grössere Dichte als Luft und damit auch einen höheren Brechungsindex. Dadurch werden die  $CO_2$  Ringe mit der Schlierenmethode sichtbar.

## 5.2 Keilprisma Experiment

Mit der Korrelation berechnet sich eine Verschiebung von 128.8449 Pixel für das Prisma. Auch das um  $90^\circ$  gedrehte Prisma ergibt eine gleiche Verschiebung. Dies muss so sein, da in beiden Fällen die Lichtstrahlen genau gleich abgelenkt werden. Lediglich die Richtung ist unterschiedlich. Da das Prisma eine Ablenkung von einem Grad verursacht, entspricht die Verschiebung der Sensitivität.

## 5.3 Heisser Luftstrom

In der Visualisierung des Temperaturgradienten in Abbildung 5 wird ersichtlich, dass die Verteilung nicht ganz axialsymmetrisch ist. Die Darstellung 5 stellt nur qualitativ die Temperaturunterschiede dar, lässt jedoch noch nicht direkt auf die Temperaturen schliessen. Hierzu wurden die Daten mit der Abel Inversion transferiert und anschliessend kalibriert, woraus Abbildung 6 folgt.

Die Bedingung um die Abel Inversion anzuwenden ist Axialsymmetrie. Aus diesem Grund sind die Daten nach der Umrechnung leicht verfälscht, da der

Luftstrom nun symmetrisch erscheint wie Abbildung 6 zeigt. Vergleicht man

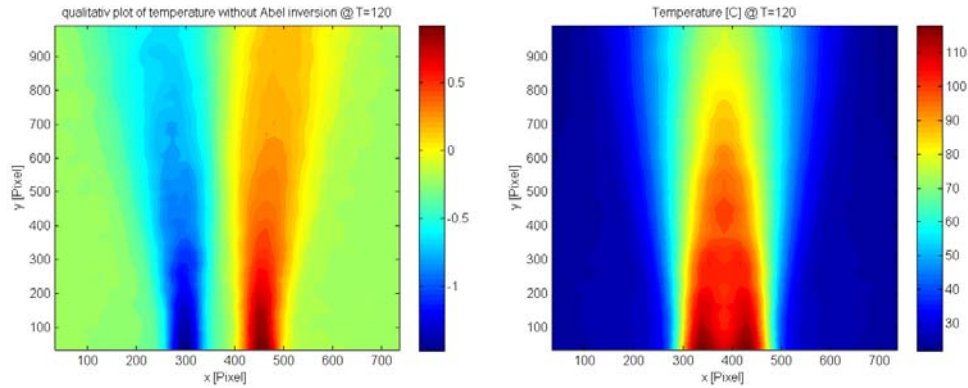


Abbildung 5: Visualisierung der berechneten Temperaturverteilung in einem 120° heißen Luftstrom

Abbildung 6: Luftstrom bei 120° nach der Abel Inversion

Abbildung 7 und Abbildung 8 welche den Luftstrom bei einer Heiztemperatur von 40°C beziehungsweise 60°C darstellen, so wird ersichtlich, dass der radiale Gradient grösser wird. Dieser Effekt zeigt sich noch stärker bei höheren Temperaturen. Interessanterweise stellt man fest, dass die Temperatur am Austritt bei hohen Temperaturen nicht flammenförmig aussieht, sondern in der Mitte kleiner als am Rand ist.

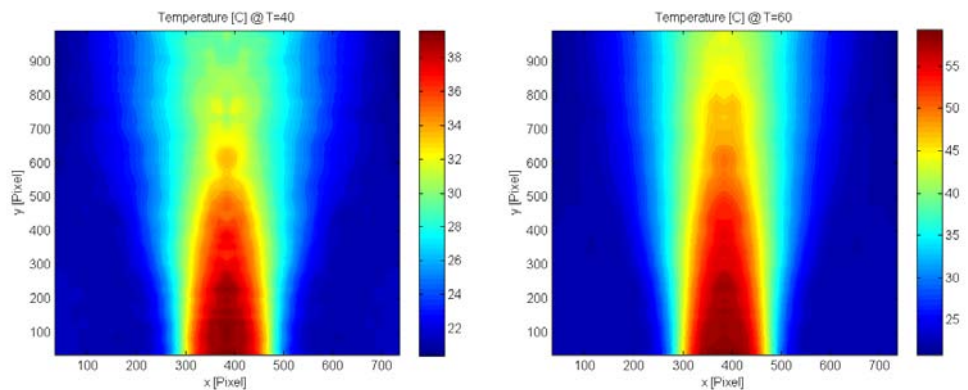


Abbildung 7: Luftstrom bei 40°C

Abbildung 8: Luftstrom bei 60°C

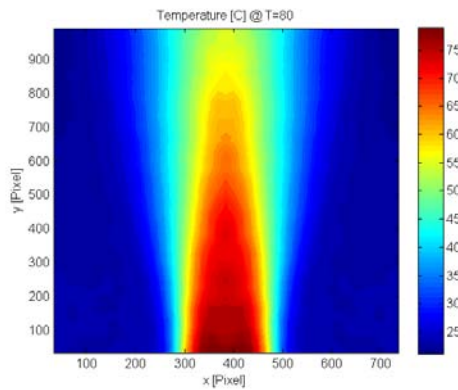


Abbildung 9: Luftstrom bei 80°C

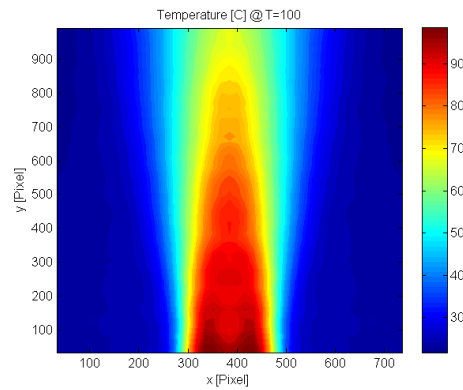


Abbildung 10: Luftstrom bei 100°C

## 6 Zusammenfassung und Perspektive

Über Dichteunterschiede in der Luft welche durch einen heissen Luftstrom verursacht wurde über die Ablenkung des Lichtes die Temperatur gemessen. Als weitere Anwendung wurde ein  $CO_2$ -Ring sichtbar gemacht, da dieser eine höhere Dichte als die umgebende Luft aufweist. Die Auswertung wurde in Matlab gemacht, mit welchem die Ablenkung der Lichtstrahlen berechnet wurde. Anschliessend berechneten wir mit der Abel Inversion die Temperaturen des Luftstroms. Die Schlierenmethode ist eine sehr simple Methode um Temperaturverläufe in einem Fluid sichtbar zu machen. Aufbau wie auch Auswertung erweisen sich als kostengünstig und einfach. Der Einfluss von Störungen konnte durch mitteln der Bilder ziemlich gut minimiert werden. Ein wesentlicher Vorteil dieser Technik ist die Datenerfassung über eine ganze Fläche oder innerhalb eines Volumens.

### 6.1 Mängel

Diese Messmethode lässt zwar eine grobe Abschätzung des Temperaturverlaufes innerhalb eines Fluides zu, jedoch nicht an einem gewissen Punkt. In simplen Anwendungen, wie derjenigen eines Luftjets, reicht sie völlig aus. Sind jedoch präzise Messungen erforderlich, sollte eine andere Methode gewählt werden, welche punktuell Daten ermittelt.

Ebenso ist es problematisch, dass Störungen in der Luft einen Einfluss auf die Messung haben und die Resultate verfälschen. Ein weiterer Nachteil ist der benötigte Hintergrund. Je nach Aufbau kann es schwierig werden, ein zufällig angeordnetes Bild zu platzieren. Nimmt man die Umgebung als Referenz, kann es vorkommen, dass die Korrelation nicht mehr eindeutig ist und dadurch Fehler in der Auswertung entstehen.



## 6.2 Mögliche Verbesserungen

Für die Raumtemperatur wurde nur ein Wert angenommen. Dies führt zu Ungenauigkeiten, da dieser in der Berechnung benutzt wird.

Des Weiteren wurde die Annahme einer symmetrischen Dichteverteilung getroffen. Ob dies wirklich der Fall war, hätte genauer untersucht werden müssen. Und bei grossen Abweichungen hätte mit Hilfe einer weiteren Kamera ein zusätzliches Bild aufgenommen werden müssen, um aus der Kombination auf die Temperaturverteilung zu schliessen.

## Literatur

- [1] F-14D model Schlieren. <http://ails.arc.nasa.gov/ails/GetHRES.php?fn=AC86-0439-14.jpg>; visited on December 15th 2010.
- [2] Schlieren photography. <http://www.explainthatstuff.com/how-schlieren-photography-works.html>; visited on December 15th 2010.
- [3] Prof. Dr. Roesgen. Synthetic schlieren imaging. 1.3:7, 21.10.2010.

## A Nomenklatur

- $n$ :  $= \frac{c_0}{c}$
- $c_0$ : Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
- $c$ : Lichtgeschwindigkeit im untersuchten Medium
- $\rho$ : Dichte
- $K$ : Gladstone Dale Konstante

## B Selbstgeschriebener MATLAB code

```
% Schlieren calculations

clear all
close all
clc

wedge=load('wedge');

% figure(1);
% imshow(wedge.shift1)
% figure(2);
% imshow(wedge.shift2)

% test=imcrop(wedge.shift1,[372 265 50 50])
% imshow(test)

% Linse 1
figure(1)
imshow(wedge.ref)
i_1=imcrop(wedge.shift1,[372 265 50 50]);
r_1=normxcorr2(i_1,wedge.ref);
imshow(r_1)

% Linse 90 grad gedreht
figure(2)
i_2=imcrop(wedge.shift2,[372 265 50 50]);
r_2=normxcorr2(i_2,wedge.ref);
imshow(r_2)

% Ursprungsort
figure(3)
figure(6)
i_3=imcrop(wedge.ref,[372 265 50 50]);
r_3=normxcorr2(i_3,wedge.ref);
imshow(r_3)

% gemessene Positionen
fig_1=[387, 439];
fig_2=[546, 350];
fig_3=[422, 315];

% Verschiebung
sigma_1=sqrt((fig_1(1)-fig_3(1))^2+(fig_1(2)-fig_3(2))^2)
sigma_2=sqrt((fig_2(1)-fig_3(1))^2+(fig_2(2)-fig_3(2))^2)

%-----%
% Analyse
%-----%

% figures for abel bos
figure(4)
figure(5)

T_0=20;
```

```
% 120 Grad Celsius
piv_120=load('piv_120');
T_max=120;

plotten(piv_120.x,piv_120.y,piv_120.u,piv_120.v,T_max,T_0)

% 100 Grad Celsius
piv_100=load('piv_100');
T_max=100;

plotten(piv_100.x,piv_100.y,piv_100.u,piv_100.v,T_max,T_0)

% 80 Grad Celsius
piv_80=load('piv_80');
T_max=80;

plotten(piv_80.x,piv_80.y,piv_80.u,piv_80.v,T_max,T_0)

% 60 Grad Celsius
piv_60=load('piv_60');
T_max=60;

plotten(piv_60.x,piv_60.y,piv_60.u,piv_60.v,T_max,T_0)

% 40 Grad Celsius
piv_40=load('piv_40');
T_max=40;

plotten(piv_40.x,piv_40.y,piv_40.u,piv_40.v,T_max,T_0)
```

```

bfunction profile= plotten(x,y,u,v,T_max,T_0,temp);

% Temperature distribution
temp=num2str(T_max);
Titel_1=['qualitativ plot of temperature without Abel inversion @ T=' temp];
Titel_2=['Temperature [C] @ T=' temp];

% figures without abel inversion
figure
contourf(x,y,u,50)
hold on
contour(x,y,u,50)
title(Titel_1)
xlabel('x [Pixel]')
ylabel('y [Pixel]')
colorbar

figure
contourf(x,y,v,50)
hold on
contour(x,y,v,50)
title(Titel_1)
xlabel('x [Pixel]')
ylabel('y [Pixel]')
colorbar

% Abel
u=Abel_BOS (u);
v=Abel_BOS (v);
p_0=1.013*10^5;
R=287;

% u direction
u=T_0+(T_max-T_0)*(u-max(max(u)))/(min(min(u))-max(max(u)));
figure
contourf(x,y,u,50)
hold on
contour(x,y,u,50)
title(Titel_2)
xlabel('x [Pixel]')
ylabel('y [Pixel]')
colorbar

% v direction
v=T_0+(T_max-T_0)*(v-max(max(v)))/(min(min(v))-max(max(v)));
figure
contourf(x,y,v,50)
hold on
contour(x,y,v,50)
title(Titel_2)
xlabel('x [Pixel]')
ylabel('y [Pixel]')
colorbar

```