



MISKOLCI EGYETEM
Gépészmérnöki és Informatikai Kar
Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszéke



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

SEBESSÉG- ÉS HŐMÉRSÉKLETMEZŐ EGYIDEJŰ MEGHATÁROZÁSA

TATÁR DÁVID

II. éves Energetikai mérnök Msc. szakos hallgató

MOLNÁR BENCE

I. éves Energetikai mérnök Msc. szakos hallgató

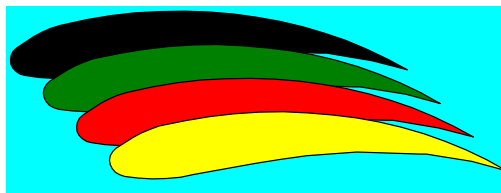
Konzulens:

BENCs PÉTER

Tanszékvezető:

PROF. DR. SZABÓ SZILÁRD

Miskolci Egyetem Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszéke



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA 2013

MISKOLCI EGYETEM

2013

TARTALOMJEGYZÉK:

1. Bevezetés	3
2. Részecske képen alapuló sebesség meghatározás [1]	4
2.1. A rendszer sajátosságai	4
2.2. PIV rendszer mérési elve	5
3. Schlieren technika	8
4. PIV és Schlieren rendszerek párhuzamos alkalmazása	10
5. Kiértékelés	15
6. Irodalomjegyzék.....	18

Mellékletek:

M1. Melléklet: A Schlieren képek kiértékelésére készített Matlab® program.

M2. Melléklet: A PIV adatok kiértékelésére készített Matlab® program.

1. Bevezetés

Tudományos Diákköri kutatómunkánk, illetve ezáltal a dolgozatunk témáját is egy szélcsatornában elhelyezett, fűtött, henger alakú rúd mögötti térrészben kialakuló hőmérséklet és sebességmező egyidejű vizsgálata adta. A vizsgálathoz esetünkben optikai méréstechnikai eszközöket alkalmaztunk, melyekkel a szükséges méréseket a Miskolci Egyetem Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszékének műhelycsarnokában végeztük el.

A mérési összeállításunk tárgyát képező jelenség a műszaki gyakorlatban is megjelenik, hiszen az áramlásba helyezett környezeti hőmérséklettől eltérő hőmérsékletű prizmatikus testekkel gyakran találkozhatunk. Jó példa ezekre az elektromos távvezetékek, fűtőpatronok, hőcserélők, gyárkémények, stb. Örök kérdés a fűtött prizmatikus testek hatása az örvényleválásra. Mi a hatása a fűtésnek az örvényleválás struktúrájára és az örvények helyzetére valamint a kényszerkonvekció hatása a test hővesztésére. Így nem meglepő hát, hogy a prizmatikus test körüli áramlás struktúrája régóta kutatott terület.

A mérések során fontos volt biztosítani a hőmérséklet- és az örvénymező mérésének egyidejűségét, ezért a felépített rendszerben párhuzamosan alkalmaztuk a Particle Image Velocimetry (PIV) és a Schlieren mérőberendezéseket. Munkánk fő specialitása az egyidejű mérés megvalósítása volt. A mérések pontos megismételhetősége végett a kísérleteket zárt Göttingen típusú szélcsatornában hajtottuk végre. Az eredményeinket a numerikus szimulációk validálására kívánjuk felhasználni.

A dolgozatunkban bemutatjuk a méréshez alkalmazott mérőberendezések működési elvét, sajátosságait, majd rátértünk a vizsgálatunkhoz felépített párhuzamos alkalmazás ismertetésére. Részletesen bemutatjuk a felépített mérőkört, annak működését, elrendezését. Végezetül a mérés során kapott adatokat és a kiértékelés eredményét ismertetjük, illetve említést teszünk a rendszer javításának, valamint továbbfejlesztésének lehetőségeiről, valamint a jelenleg zajló vizsgálatokról is.

2. Részecske képen alapuló sebesség meghatározás [1]

A részecske képen alapuló sebesség meghatározás, azaz Particle Image Velocimetry (PIV) alkalmazásával a teljes sebességtér egy adott síkjában kialakult időben változó sebességmező pillanatképe meghatározható.

Az egyszerű PIV rendszerrel képesek vagyunk a kívánt mérési keresztmetszetben a sebességek az adott síkba eső két komponensét is meghatározni. A bonyolultabb mérésekhez, ahol már az adott mérési keresztmetszetben a sebességek mindhárom komponensét szeretnénk meghatározni, ott a háromdimenziós mérési rendszert kell alkalmazni.

A sebességmező valós időben történő meghatározásához szükséges egy lézersíkot előállító berendezés, egy modern digitális kamera, továbbá egy megfelelő számítógépes rendszer.

2.1. A rendszer sajátosságai

A PIV mérési technika nagy előnye és főbb tulajdonsága, hogy beavatkozás mentes, de a méréshez mikron nagyságú részecskék szükségesek, amelyek az adott áramlással együtt mozognak. A mérés során az egyik legfontosabb tényező a részecskék nagysága és minősége, mivel a rendszer a részecskék követésével tudja meghatározni a mérni kívánt keresztmetszetben kialakult sebességmezőt.

A rendszer további tulajdonságai a következők:

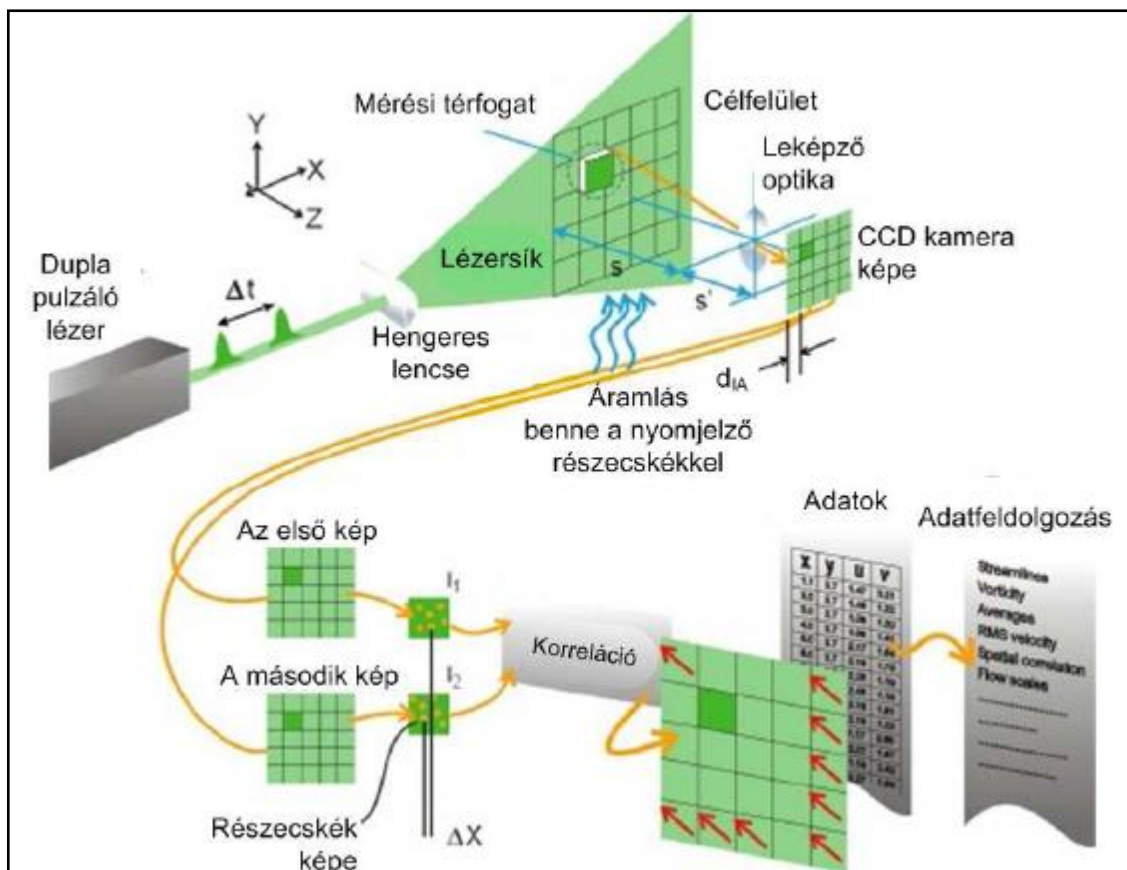
- Mérhető sebességtartomány: zéró sebességtől egészen szuperszonikus sebességig.
- Mérési keresztmetszetben kialakult változó sebességmező meghatározása.
- Mindhárom sebességkomponens meghatározásának lehetősége a háromdimenziós rendszer alkalmazása esetén.
- Sebességmezők sorozatának elemzési lehetősége: statisztika, térbeli korreláció és egyéb más jellemző adat elérhető a mérési eredményekből.

A PIV technikával elért mérési eredmények teljesen hasonlóak azokhoz az eredményekhez, amiket a kutatók számítógépes modellekkel, numerikus szimulációval határoznak meg (például: Large Eddy Simulation). A valós idejű

mérési lehetőség miatt az eredmények nagyon jó lehetőséget biztosítanak a kutatóknak az adott szimulációs eredmények ellenőrzésére.

2.2. A PIV rendszer mérési elve

A mérés elve az 1. ábra segítségével követhető. A PIV mérés esetén egy lézersík fényimpulzusokkal világítja meg a vizsgált $X \times Y$ [mm²] mérési területet. Az áramlásba helyezett részecskék megvilágításáról tehát e lézersík gondoskodik, amelyet egy dupla pulzáló lézer hoz létre.



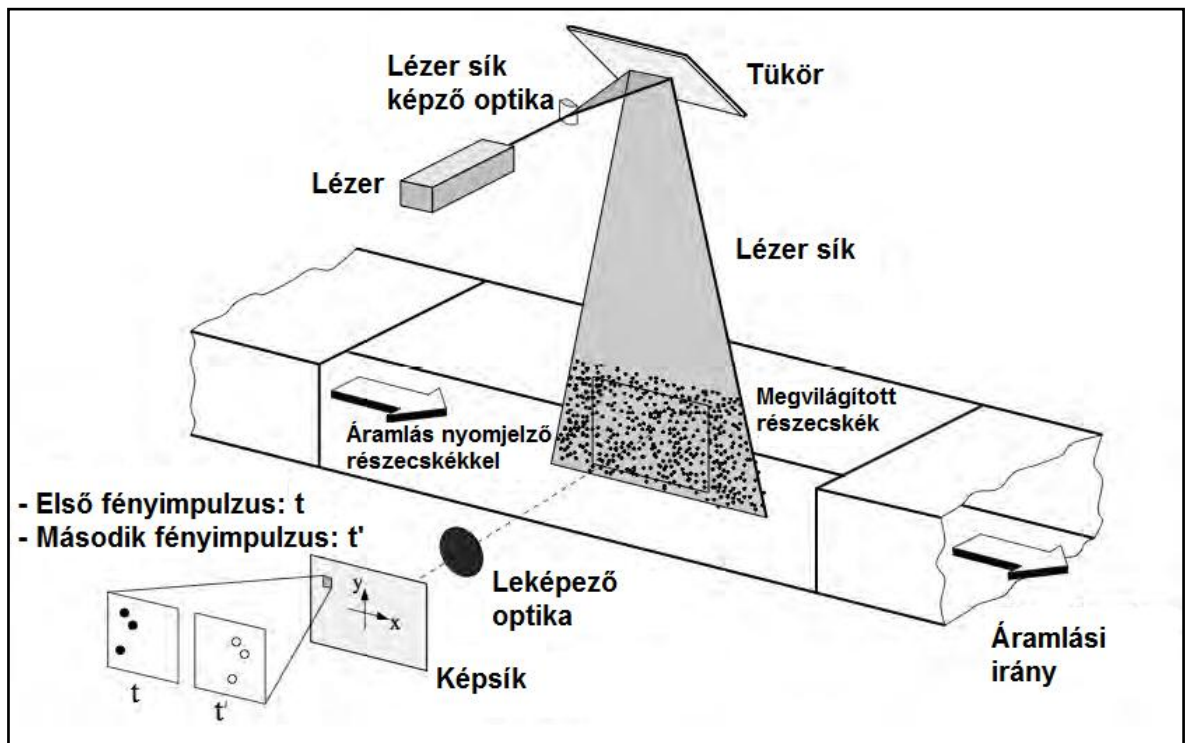
1. ábra: PIV rendszer működési és mérési elve [1]

Egy gyors kamera e megvilágított síkról két felvételt készít két egymást követő fényimpulzussal egy időben, miközben Δt idő telik el. Az áramlásba helyezett, azzal együtt mozgó egy részecske eközben Δx elmozdulást (Δx vektormennyiség) végez. A vizsgált részecske elmozdulását mérve két fénypulzus között, differenciálással megkapjuk a vonatkozó sebességvektort:

$$\vec{v} = \frac{\vec{\Delta x}}{\Delta t}$$

A mérési sorozat egy tagja a két fénypulzus által megvilágított két képet tartalmazza, amelyen az áramlásba helyezett részecskék sokasága látszik.

A 2. ábrán egy a PIV mérésnél alkalmazott standard felépítési módszer látható, mely jól szemlélteti a rendszer működési elvét.



2. ábra: A PIV rendszer egy általános (estünkben is alkalmazott) felépítési módszere [2]

A képek digitális kamerával készülnek, amely a mérési területet a kamera érzékenységeinek megfelelően, például $X_p \times Y_p = 1600 \times 1200$ db pixelre osztja. Egy-egy pixel a kamera fajtájától függően vagy különböző szürkeárnyalatokat, vagy különböző színeket érzékel. Ahol a részecskék éppen elhaladnak azt az árnyalat, vagy a szín megváltozása jelzi. A kamera által készített képeket a hozzá kapcsolt számítógépre telepített szoftver felnagyítja az eredeti $X \times Y$ [mm^2] méretre és kis elemzési ablakokra, úgynevezett IA iterációs területekre osztja. Egy iterációs terület nagysága úgy választható meg, hogy azon belül $p \times p$ darab pixel (18×18 , 32×32 , 64×64 , vagy 128×128 db.) legyen. Így az iterációs területek száma $X_i \times Y_i$, ahol

$$X_i = \frac{X_p}{p}, \quad Y_i = \frac{Y_p}{p}$$

Az iterációs területek felvehetők úgy, hogy teljesen, de átfedés nélkül fedik le a területet. A képfeldolgozás minősége javítható, ha az iterációs területeket némi átfedéssel vesszük fel.

Egy iterációs ablakról készült fényképpáron lévő azonos részecskéket kereszt korrelációval azonosítják és kapcsolják egymáshoz. A kereszt korrelációs eljárás során az iterációs terület két képe tekintetében minden pixel intenzitása (vagy színe) összehasonlítódik a másik kép minden pixeléével. Ennek a statisztikai összehasonlításnak (párosításnak) az eredményeképpen adódik az elmozdulás legvalószínűbb iránya és nagysága.

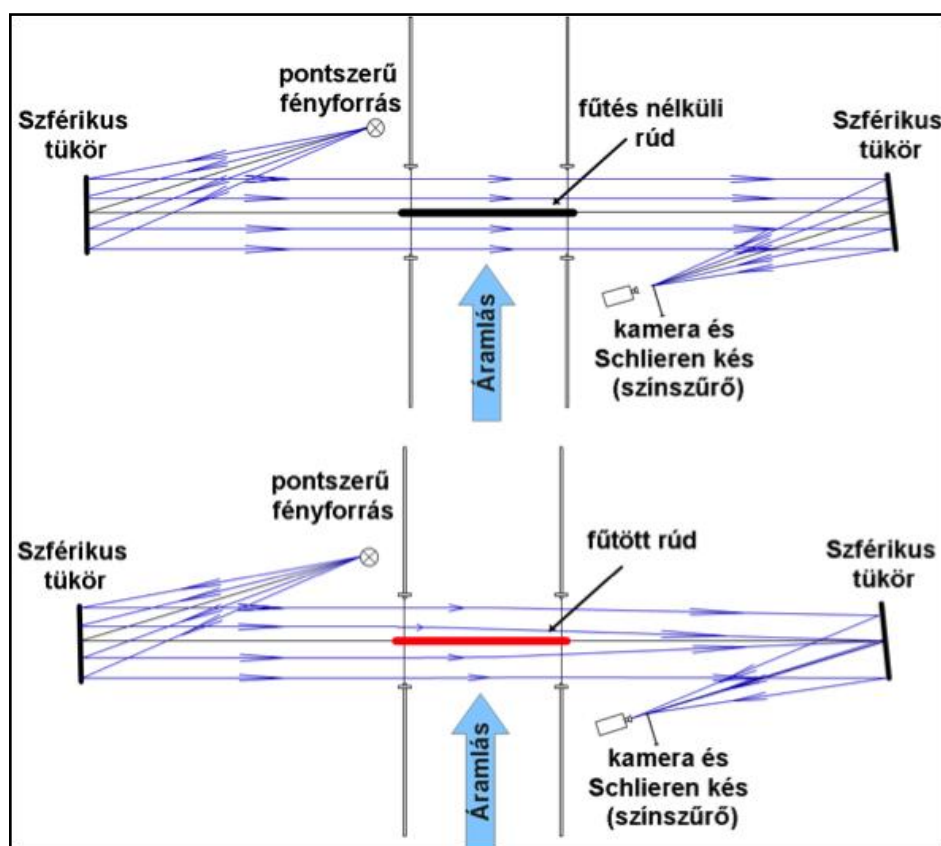
A korrelációs matematikai eljárás egy $R(\Delta x)$ csúcsjelet képez, ami meghatározza a két képen található azonos részecskék legvalószínűbb Δx elmozdulását. Ezt a szoftver megismétli minden iterációs területre. Az elmozdulás pontos méréséhez illetve azt követően a sebesség pontos meghatározáshoz a szoftver alkalmaz egy interpolációs eljárást a pixelek között. Ez az úgynevezett szubpixel interpoláció azt jelenti, hogy a pixeleken, mint diszkrét helyeken érzékelt intenzitás jelsorozatra interpolációs polinomot fektet, s a pixelek közötti értékeket is figyelembe veszi a keresztkorrelációnál. Ezzel javítja az eljárás pontosságát. Az eljárás pontos matematikai leírása fellelhető a szakirodalomban [1].

Az elemzéshez tehát két kép kell, melyből számítható az elmozdulás, azonban a felvételek jól megjelenítik az áramlás struktúráját is.

3. A Schlieren technika

„Schlieren” jelenség alatt optikai inhomogenitásokon áthaladó fénysugarak irányváltozását értjük. Az optikai inhomogenitás kialakulhat gáznemű közegeknél a sűrűség rohamos változása esetén, így az ezeken való áthaladás során az eltérülő fénysugarak miatt képtorzulás alakul ki. A jelenség összetett, de némely esetben jól leírható törvényszerűségek szerint megy végbe, ezért a Schlieren módszerek fizikai jelenségek megmutatására és számszerűsítésére is alkalmasak. A Schlieren mérési technikák tehát a sűrűségváltozás okozta fénytörési jelenségeken alapulnak. [3]

Ezen mérőrendszerek elsődlegesen kétdimenziós méréseknél használatosak, mivel a háromdimenziós alkalmazások során problémák adódnak. Többféle Schlieren mérő technológia használatos napjainkban (Background Oriented Schlieren, Z- típusú). Ezek közül esetünkben az úgynevezett Z-típusú technológiát alkalmaztuk, mely mérőrendszer alap felépítése a 3. ábrán látható.



3. ábra: Z-típusú Schlieren rendszer [5]

Az Z- típusú Schlieren rendszer- a megfelelő minőségű felvételek érdekében- pontbéli forrást alkalmaz. A fényforrásból induló fénysugár különböző eltérülését a különböző sűrűségű közegben történő áthaladás során a sűrűségváltozás miatt fellépő fénytörés index-változása okozza. A pontbéli fényforrás lencsékkel/tükrökkel fókuszálható egy úgynevezett késélre vagy színszűrőre. A különböző sűrűségű közegeken áthaladó sugarak különböző eltérülése miatt, késél esetén eltérő fényerősséggel világítják meg a késél mögött elhelyezett kamera CCD chipjét, míg színszűrő esetén az eltérülés mértékétől függően más színek érkeznek be a chipbe. Megfelelő kalibrálási eljárást alkalmazva a hőmérsékletmező színárnyalataihoz számszerű értékek is rendelhetők. [4]

Az Áramlás és- Hőtechnikai Gépek Tanszékének műhelycsarnokában megtalálható z- típusú Schlieren mérőrendszer a 4. ábrán látható.

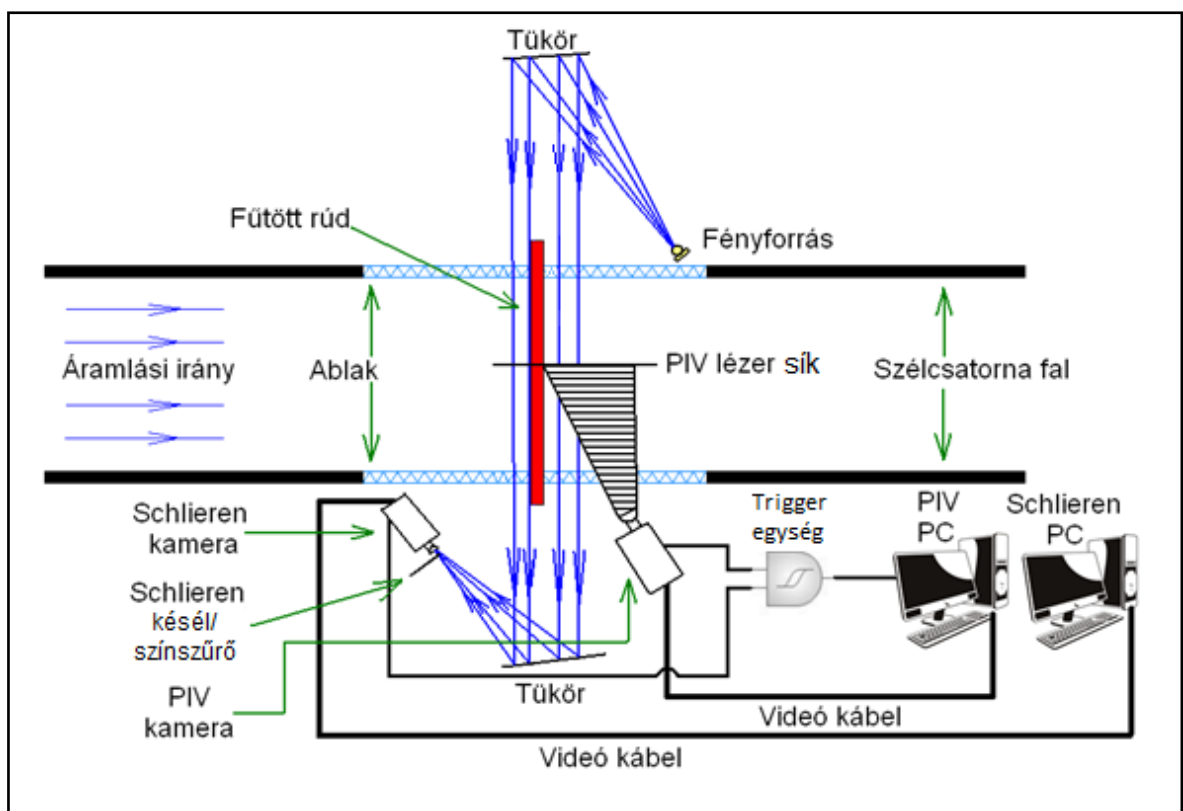


4. ábra: Z- típusú Schlieren mérőrendszer [5]

Esetünkben nem késélt, hanem színszűrőt használtunk, mely az úgynevezett rainbow , azaz „szivárvány” Schlieren technológia.

4. PIV és Schlieren rendszerek párhuzamos alkalmazása

Ahogy azt a bevezetésben említettük, a munkánk során, egy szélcsatornában elhelyezett fűtött rúd mögötti térrészben kialakuló sebesség-és hőmérsékletmező egyidejű meghatározására, PIV, valamint Z- típusú Schlieren mérés technika párhuzamosan került alkalmazásra. Vizsgálataink központjában a két technika együttes alkalmazásának megteremtése állt. A kísérletünket egy zárt rendszerű Göttingen-típusú szélcsatornában történt. Feladatunk részét képezte a rendszer összeállítása konzulensünk segítségével. A 5. ábrán látható a megvalósított mérési elrendezés sematikus ábrája.

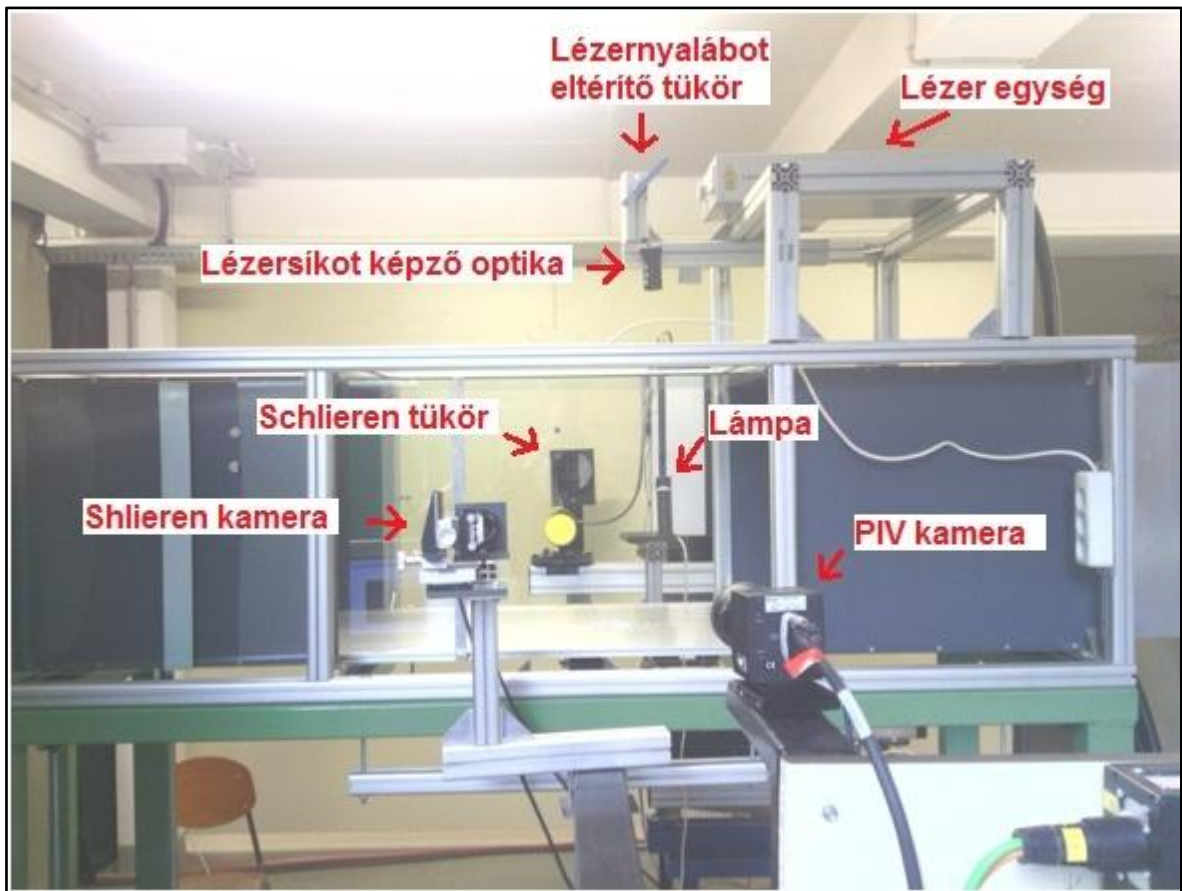


5. ábra: A mérési rendszer sematikus elrendezése felülnézetből[2]

A mérési elrendezés ábráján látható, hogy a fűtött henger az áramlásra merőlegesen van rögzítve vízszintes síkban a szélcsatorna 500x500 mm keresztmetszetű mérőszakaszában. A szélcsatorna két oldalán, a mérőszakaszon, átlátszó üvegfelület van elhelyezve (6. ábra), melyeknek a közepén furatok találhatók a fűtött rúd rögzítésére. A rúd átmérője $d=10\text{ mm}$, hossza 500 mm. A rúd villamos fűtését toroid transzformátor közbeiktatásával valósítottuk meg, ahol a rúd átlaghőmérsékletét a mérés során 300 °C- ra választottuk, mert ekkor már a

környezettől jelentős mértékben eltérő hőmérséklet miatt a vizsgált jelenség kellő intenzitással jelentkezik.

A 6. ábrán a megvalósított mérési összeállítás fényképe látható.



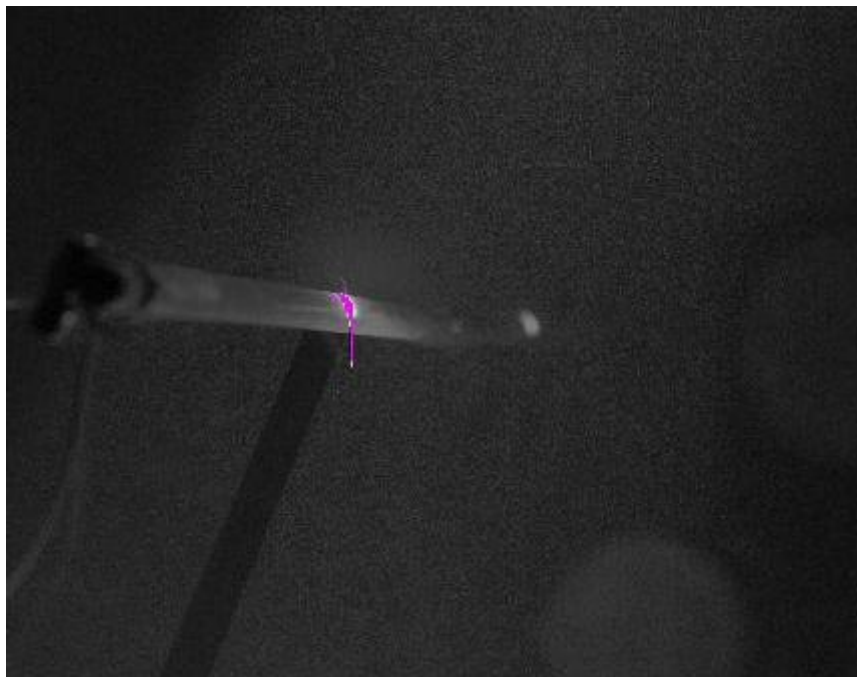
6. ábra: A megvalósított mérési elrendezés [saját fénykép]

A sebességmező meghatározása tehát PIV technikával történt, szinte a 2. ábrán bemutatott elrendezésnek megfelelően. Ehhez a hengerre merőleges lézersíkot egy dupla pulzáló lézer-egység állítja elő, amely a 6. ábrán a szélcsatorna felett látható. A lézer egység által előállított sugarat egy tükör segítségével 90°-kal eltérítettük, majd síkoptikák segítségével létrehoztuk a lézer síkot. A lézersíkkal megvilágított felületen kialakuló áramlás mozgásjellemzőit a síkra merőlegesen elhelyezett kamera felvételeinek kiértékelésével nyertük.

Az alapáramlás átlagsebességét, egy frekvencia szabályozott axiális ventillátor segítségével $v = 0,3 \text{ m/s}$ -ra állítottuk be, ami a szélcsatornában minimálisan előállítható stabil alapáramlás. A sebesség ilyen alacsonyra állításra azért volt szükség, mert a sebességmező mennyiségi vizsgálatát lehetővé tevő mérési módszer (PIV) egy jól meghatározott kétdimenziós áramlást igényel. Ezért egy

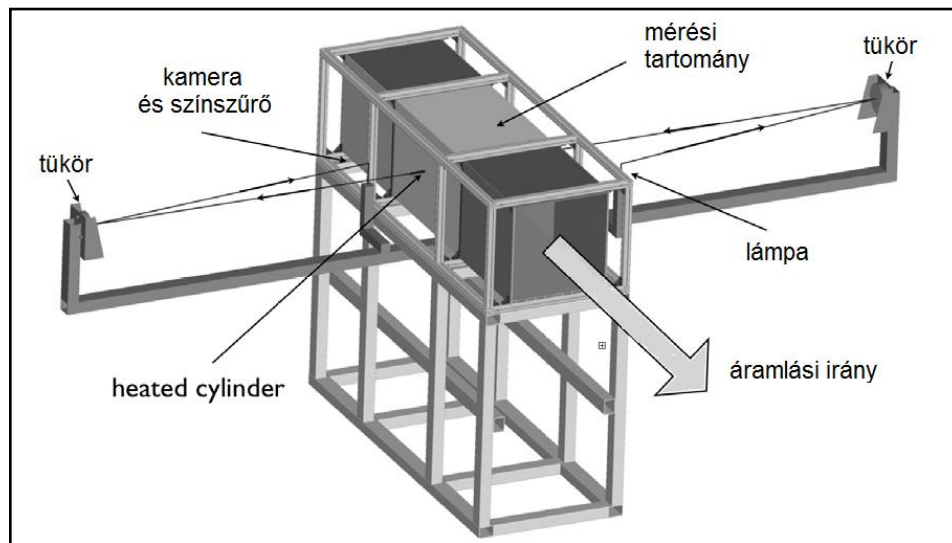
alacsony Reynolds számú áramlást kellett figyelembe venni, ahol az áramlás közelítőleg kétdimenziós. Mivel a részecske képen alapuló (PIV) mérés technika kétdimenziós áramlások során megbízhatóan alkalmazható, ezért a kísérletünket alacsony, $Re < 200$ számnál végeztük el, így a fűtött rúdra merőleges síkokban az áramlás közel azonos volt, vagyis az áramlás nem változik számottevően a rúd tengelye mentén. (Ez a Schlieren technikánál alapkövetelmény).

A mérés, ahogy már említettük egy zárt Göttingen típusú szélcsatornában zajlott, ahova ködgenerátor segítségével porlasztott olívaolajat juttatunk be nyomjelzőanyagként. Levegő vizsgálata esetén az alkalmazott részecske általában 0,3 mikron átmérőjű olaj csepp. A lézerrel megvilágított olajköd jól mutatja az áramlás struktúráját is (7. ábra). A részecskék száma az áramlásban fontos tényező a mérések kiértékelése közben, mivel megfelelő mennyiségű részecske szükséges a kereszt korreláció esetén a csúcs jel megtalálásához. Az alapszabály, hogy minden iterációs területben 10 és 25 db között kell lennie részecskéknek. Az iterációs terület nagyságát (hány pixelt tartalmazzon) és a részecskék mennyiségét ezen alapszabály alapján kell megválasztani. Így tehát ügyelnünk kellett a bejuttatott porlasztott olaj mennyiségére, ugyanis ha túl keveset juttatunk volna a rendszerbe, akkor a PIV mérésnél nem kapunk megfelelő képet, viszont ha túl sűrű lett volna a köd, akkor a Schlieren képpel lettek volna gondok.



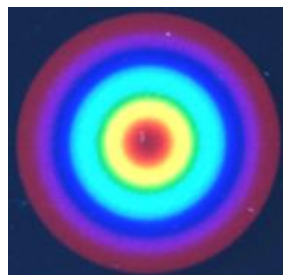
7. ábra Nyers PIV kép

A Z- típusú Schlieren rendszer esetünkben megvalósított elrendezése a 8. ábrán látható.



8. ábra: A Z- típusú Schlieren mérőrendszer elrendezése [2]

A Schlieren mérésnél a mérési tér megvilágítása egy hagyományos izzóval nyert pont fényforrással valósítottuk meg, mely a 8. ábrán láthatóan a szélcsatorna egyik oldalán található, míg a Schlieren kamera értelem szerűen a túloldalán helyezkedik el. A Z- típushoz szükséges két tükör, egy zárt szelvényen lett rögzítve, ahol a köztük lévő távolság 4500 mm . A második tükörről a színszűrőn (9. ábra) keresztül érkezik a fény a Schlieren optikába. Mivel a méréshez esetünkben egy direkt erre a célra készített színszűrőt használtunk, mely megfelel a HUE színskálának, így a mérés előtt nem igényel a rendszer olyan jellegű kalibrációt, mint késél esetében. Itt a rendszer egy más jellegű kalibrációt igényel, mely a későbbiekben a kiértékelés folyamán történt meg. A Schlieren rendszer pontossága elsősorban a háttér fényzajától függ, ezért a méréseket sötét szobában végeztük.



9. ábra: Alkalmazott színszűrő

A PIV és Schlieren mérések során, ahogyan az 5. és 6. ábrán is látható két különböző kamera került alkalmazásra. A trigger egység (TSI® szinkronizációs egység) végzi a szinkronizálását a PIV lézernek, a PIV kamerának és a Schlieren kamerának, hogy a mérések egy időben történjenek.

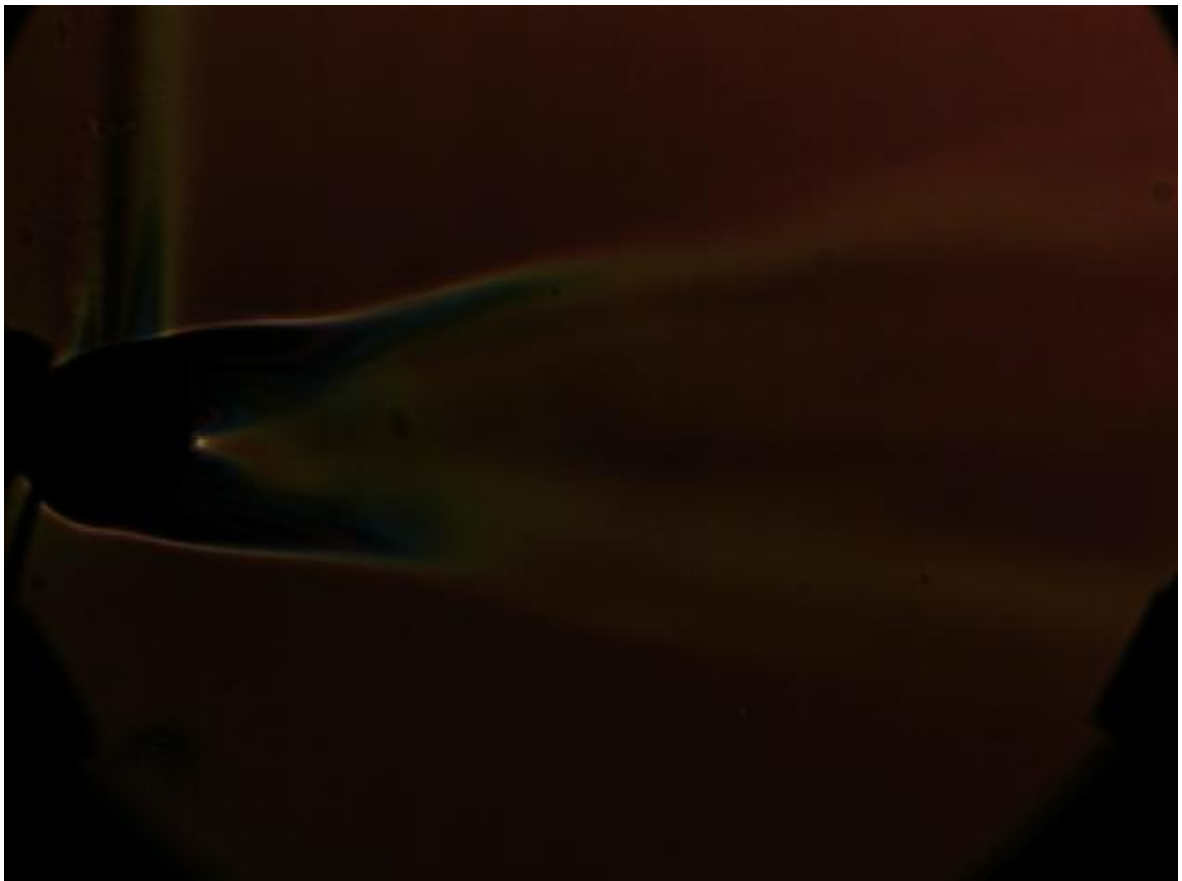
A PIV kamera pixel/mm tényező beállítása és a torzítás beállítása egy kalibráló tábla segítségével történt. A kalibrációs tábla a mérési síkba került beállításra a vizsgálati térben. A kamera optikáját a kalibrációs lemezre kellett fókuszálni, majd a rekesztértéket, mely meghatározza az érzékelőre jutó fény mennyiségét, F4-es értékre állítottuk be.

Az adatgyűjtésre és feldolgozásra alkalmazott szoftver a kereskedelmi INSIGHT3G™ PIV szoftver volt a TSI cégtől. A PIV által kapott adatok feldolgozásával megtörténik a sebességmező kiszámítása, valamint az átméretezett képeken kereszt korreláció alkalmazása 32x32 pixeles területen, 50%-os átfedéssel. Végül tartomány validáció kerül alkalmazásra a vektor mezőre a vektorhibák kiküszöbölésének érdekében. Az eredményül kapott vektoros térkép exportálása ezután ASCII fájlba történik a későbbi Matlab® programmal történő megjelenítéshez. Mindkét módszer által rögzített képek feldolgozhatók a TSI® és a Matlab® kereskedelmi szoftverekkel.

5. Kiértékelés

A mérés során kapott Schlieren adatokat, képeket (10. ábra), amelyekből kiindulva a fűtött rúd mögötti hőmérsékletmezőt határoztuk meg, a Matlab® kereskedelmi szoftver segítségével egy általunk fejlesztett programkód segítségével értékeltük ki (M1.). Ebben, első lépésben a színszűrő miatt a HUE színskála segítségével egy kalibrációs görbét kellett létrehozni, melyből megkaptuk egy-egy pontban az fény eltérülésének mértékét, majd ebből számolta tovább a megírt program a hőmérséklet-eloszlást.

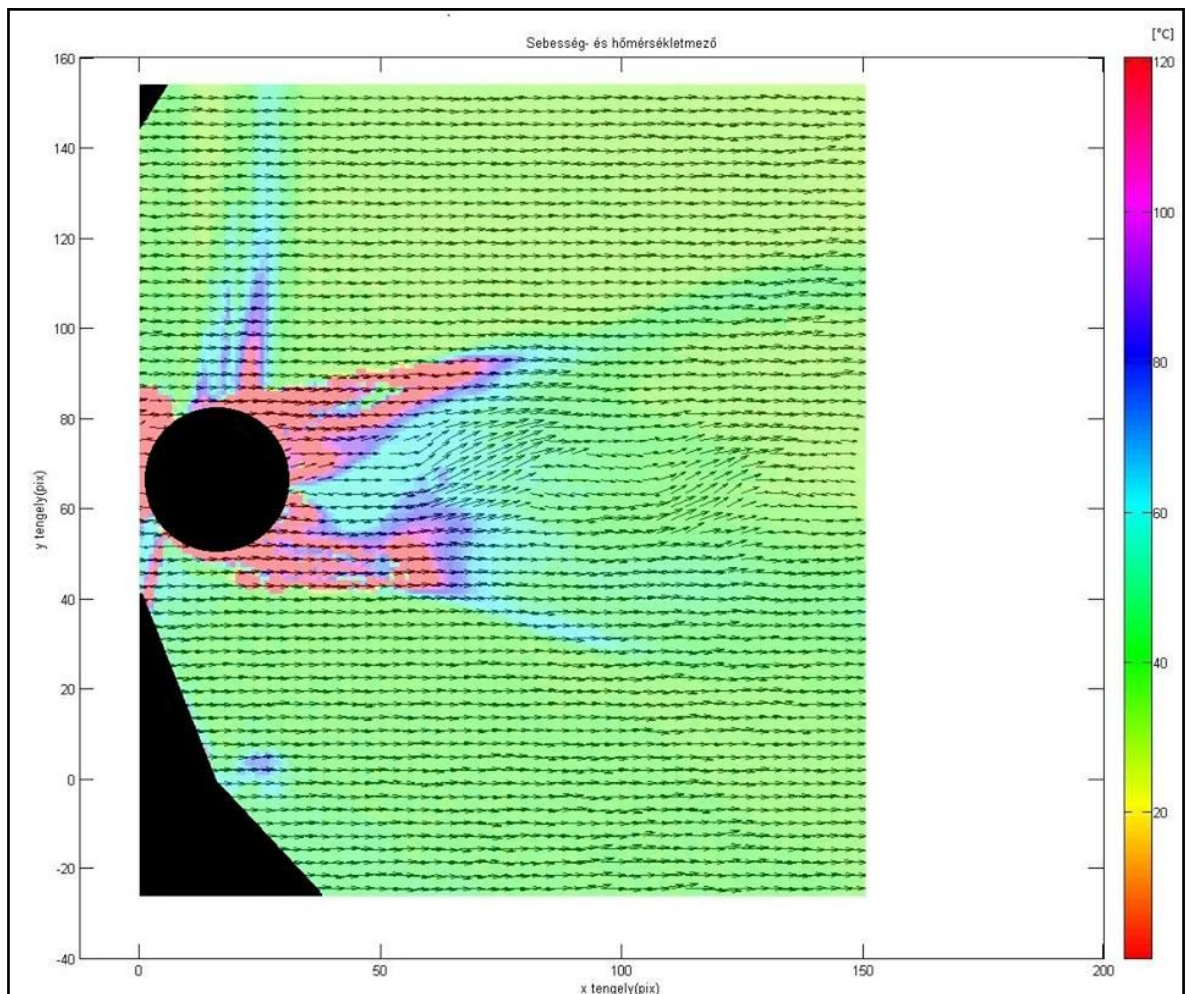
A 10. ábra a mérés során készült nyers Schlieren kép látható, amely a mérés után feldolgozásra került Matlab® szoftverrel.



10. ábra: A Schlieren mérés által kapott nyers kép

A PIV mérés eredményeként nyert képeket (7. ábra), amelyek segítségével a sebességmezőt határoztuk meg, először a PIV rendszer saját szoftvere az INSIGHT3G™ értékelte ki, majd az így kapott adatokat ugyancsak a Matlab® szoftverben írt kód (M2.) segítségével elemeztük ki. Ezt követően a két eredményt

egy képen ábrázolva kaptuk meg a fűtött rúd mögött kialakult hőmérséklet- és sebességmezőt, mely a 11. ábrán látható.



11. ábra: A fűtött rúd (300 °C) mögött kialakuló hőmérséklet- és sebességmező megjelenítése

Az 11. ábrán látható, hogy az örvényleválás és a hőcsomagok leszakadása a rúdról együtt történik. Megfigyelhető, hogy a fűtött henger mögött kialakuló örvények a hőmérséklet hatására nem szimmetrikusan helyezkednek el a rúd középvonalához képest, hanem a kényszer konvekció mellett jelenlévő szabad konvekció hatására némileg felfelé eltolódnak.

A célunkat munkánkkal elértük, hiszen a rendszer összeállítása után annak működőképességét bizonyítottuk. A PIV és a Schlieren rendszerek párhuzamos alkalmazása eredményes volt. A két mérési rendszert tehát alkalmas a hőmérséklet- és sebességmező egyidejű meghatározására, azonban, ahhoz, hogy jobban kiértékelhető, pontosabb eredményeket kapjunk a rendszer fejlesztésére, további kísérletekre van szükség.

A továbblépéshez a kapott hőmérsékletértékek validációja elengedhetetlen a hibák csökkentése és a pontosság növelése érdekében. Ez más nagy pontosságú módszerekkel, például CTA (Constant Temperature Anemometry) szondával meghatározott hőmérsékletértékekkel való összehasonlítás segítségével történhet. Ez újabb megoldandó problémát vet fel, hiszen ebben az esetben meg kell oldani a CTA szonda a PIV és Schlieren rendszerekhez történő szinkronizációját is.

A Schlieren mérőrendszer is pontosabb beállítást igényel, amely lehet más színszűrők alkalmazásával történő kísérletezés, esetleg prizma beépítése a rendszerbe.

6. Irodalomjegyzék

[1] Prof. Dr. Paripás Béla, Prof. Dr. Szabó Szilárd, Kocsisné Dr. Baán Mária, Dr. Tolvaj Béláné, Bencs Péter: Lézeres mérési- és megmunkálási eljárások a gépészetben,

http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0001_1A_G4_04_ebook_lezeres_meresi_es_megmunkalasi_eljarasok_a_gepeszetben_video/adatok.html

[2] P. Bencs, Sz. Szabó, D. Oertel: Simultaneous measurement of velocity and temperature field downstream of a heated cylinder, *Proc. International Conference on Innovative Technologies, IN-TECH 2012, Rijeka, Croatia (2012)*, pp. 205-209. (ISBN:978-953-6326-77-8)

[3] <http://remotelab.energia.bme.hu/index.php?page=schlieren&lang=hu>

[4] Bencs Péter, dr. Szabó Szilárd: Instacionárius léghőmérsékletmező mérési lehetőségeinek fejlesztése, *GÉP (ISSN: 0016-8572) LXIII.: (1.) pp. 27-30. (2012)*

[5] <http://www.aht.uni-miskolc.hu/a-tanszek-bemutatasa/a-tanszek-oktato-kutato-berendezesei-eszkozei/>

M1. Melléklet: A Schlieren képek kiértékelésére készített Matlab® program

HUE_calibration

```
clc; clear all;
```

```
D=imread('H:\Matlab_filters\Photo\scan 2_2_2.tif');
```

```
% atmero=8,1 mm
```

```
D1=rgb2hsv(D);
```

```
D_HUE=D1(:,:,1);
```

```
%contourf(D_HUE)
```

```
% kozep=D_HUE(405,431)
```

```
plot(D_HUE(458,:)); % itt a data cursor-al meghatarozható a két csúcspont -> a  
keprol tudjuk, h ennyi távolság pl.: 8,1 mm!!!
```

```
x=0:(4.05/171):4.05; %annyi pontnak kell lennie, mint az y-ban!
```

```
y=D_HUE(458,424:595); %középső rész az előző ábrából kiválasztva
```

```
plot(x,y);
```

```
%% eddig csak a közepétől a színskala széleig ábrázoltuk, de nekünk csak a piros  
rész szeletét kellene az értékek, így az
```

```
% ábrából meghatározható az újabb határok!!!
```

```
x1=x(28:172);
```

```
y1=y(28:172);
```

```
y1(1)=min(y); %HUE max érték-től kezdjük a skálát!!!
```

```
cftool(x1,y1); %görbe fektetés (interpolant -> .... neighbor) -> Fit (menu) sav to  
workspace
```

Schlieren kiértékelés

```
clc; clear all; close all;
```

```

% kép beolvasása

place=('H:\Schlieren képek 2013_06_21\proba_');

PIC=imread([place num2str('01.bmp')]);

% RGB-ből HSV-re konvertálás

k=rgb2hsv(PIC);

% H mint hue, a  $0 < H < 1$ ,

H=k(:, :, 1);

% a hsv szerint színezi a megjelenített képet, a 200 a skála legnagyobb

% értéke

% megjelenítés

imshow(H);

% színskála megjelenítése

colorbar;

%paraméterek

f2=1524; % focal length of the mirrors in mm

c=10; % thickness of the inhomogeneous medium under test in mm, diameter of
the cylinder

K=0.00025; % Gladstone Dale constant in  $\text{m}^3/\text{kg}$ ,  $K=(n - 1)/\rho$ 

Tc=300; % Temperatur of the cylinder

T0=28; % Temperature of ambient

% choose appropriate air density in  $\text{kg}/\text{m}^3$  (VDI Waermeatlas)

%  $\rho_0=1.2306$ ; %  $10^\circ\text{C}$ 

%  $\rho_0=1.1885$ ; %  $20^\circ\text{C}$ 

%  $\rho_0=1.16885$ ; %  $25^\circ\text{C}$ 

```

% rho 0=1.16492; % 26?oC

rho0=1.16099; % 27?oC

% rho 0=1.1492; % 30?oC

% rho 0=0.6075; % 300?oC

%thomfelso=200;

% a szűrőre fektetett görbe adatai fittedmodel nélkül-eleje

%a szűrő értékeire fektetett görbe adatai

p1 = 253.3;

p2 = -691.3;

p3 = 684.7;

p4 = -294.9;

p5 = 53.12;

p6 = -0.05644;

p7 = 0.02647;

%a szűrő értékeire fektetett görbe adatai

$$dx = p1 \cdot H.^6 + p2 \cdot H.^5 + p3 \cdot H.^4 + p4 \cdot H.^3 + p5 \cdot H.^2 + p6 \cdot H + p7;$$

% a szűrőre fektetett görbe adatai fittedmodel nélkül-vége

%delta ró

$$drho = dx ./ (f2 \cdot c \cdot K);$$

$$Tx = (0.0289 \cdot 101325) ./ (8.3145 \cdot (rho0 - drho));$$
 % T és ró közötti összefüggés

```
T=rho0*Tc./(-drho+rho0); %Schlieren_calculation-ból vett
```

```
%Kelvinből Celsius fok
```

```
Tx=Tx-273.15;
```

```
T=T-273.15;
```

```
%map=colormap(hsv);
```

```
%figure,imshow(Tx,map)
```

```
% Tx=imfill(Tx);
```

```
% figure,imshow(Tx,[25 250])
```

```
% colormap(hsv);
```

```
% colorbar;
```

```
% title('Hőmérséklet [°C]');
```

```
% ylabel('pix');
```

```
% xlabel('pix');
```

```
hatar= [20 250];
```

```
figure;
```

```
im1=imagesc(T,hatar);
```

```
title('Hőmérséklet [°C]');
```

```
ylabel('pix');
```

```
xlabel('pix');
```

```
colormap(hsv(250));
```

```
colorbar;
```

```
I=imfill(T);
```

```

figure;

im2=imagesc(I,hatar);

title('Hőmérséklet [°C]');

ylabel('pix');

xlabel('pix');

colormap(hsv(250));

colorbar;

contourf(T);

% set(gcf,'PaperPositionMode','auto')

% print(i,'-dpng','-zbuffer','-
r200','C:\Users\David\Desktop\TDK\Schlieren\image.png');

```

M2. Melléklet: A PIV adatok kiértékelésére készített Matlab® program

```

clear all; clc; close all;

%% Load data

n=20; %ennyi meres készült

for r=2:1:n;

    hely='H:\PIV,Schlieren kiértékelés\Analysis\data\proba';

    Filename=[hely num2str(r,'%02i')];

    datenD=importdata([Filename '.vec']);

    D=datenD.data;

    disp(r);

```

```

[a b]=find(D(:,3)==0);
D(a,:)=[];

% %kiugro ertekek interpolalasa
umin=0.10;
umax=0.35;
vmin=-0.04;
vmax=0.4;
[a1 b1]=find(D(:,3)<umin | D(:,3)>umax);
[a2 b2]=find(D(:,4)<vmin | D(:,4)>vmax);
D(a1,3)=NaN;
D(a2,4)=NaN;
D(isnan(D)) = interp1(find(~isnan(D)), D(~isnan(D)), find(isnan(D)), 'nearest');

x=unique(D(:,1));
y=unique(D(:,2));
%z=unique(D(:,12));

% Determine the minimum and the maximum x and y values:
xmin = min(x); ymin = min(y);
xmax = max(x); ymax = max(y);

% Define the resolution of the grid:
xres=100;
yres=100;

% Define the range and spacing of the x- and y-coordinates,

```

% and then fit them into X and Y

```
xv = linspace(xmin, xmax, xres);
```

```
yv = linspace(ymin, ymax, yres);
```

```
[Xinterp,Yinterp] = meshgrid(xv,yv);
```

```
D(1,3)= mean(D(:,3)); % kiugró érték kivétele kézzel
```

```
D(2,3)= mean(D(:,3)); % kiugró érték kivétele kézzel
```

```
D(3,3)= mean(D(:,3)); % kiugró érték kivétele kézzel
```

```
D(3853,3)= mean(D(:,3)); % kiugró érték kivétele kézzel
```

```
max(D(:,3))
```

% Calculate Z in the X-Y interpolation space, which is an

% evenly spaced grid:

```
Uinterp = griddata(D(:,1),D(:,2),D(:,3),Xinterp,Yinterp); %U value
```

```
Vinterp = griddata(D(:,1),D(:,2),D(:,4),Xinterp,Yinterp); %V value
```

```
Zinterp = griddata(D(:,1),D(:,2),sqrt(D(:,3).^2+D(:,4).^2),Xinterp,Yinterp); %Velocity
```

% Calculate the vorticity:

```
vorticity=curl(Xinterp,Yinterp,Uinterp,Vinterp);
```

% Calculate the divergence

```
div=divergence(Xinterp,Yinterp,Uinterp,Vinterp);
```

% determine the mean values

```
[nhist,xout]=hist(Zinterp,50);
```

```
[a b]=find(nhist==max(max(nhist)));
```

```
Zinterp_mean=xout(a(1));
```

```
[nhist,xout]=hist(vorticity,50);
```

```
[a b]=find(nhist==max(max(nhist)));
```

```
vorticity_mean=xout(a(1));
```

```
[nhist,xout]=hist(div,50);
```

```
[a b]=find(nhist==max(max(nhist)));
```

```
div_mean=xout(a(1));
```

```
%Plot the velocity 1:
```

```
% figure('Position',[1 1 1280 800])
```

```
fig = figure;
```

```
    set(fig,'units','normalized','outerposition',[0 0 0.7 0.7]); %fullscreen
```

```
    set(fig,'visible','on'); %hide the figure
```

```
axes('FontSize',17);
```

```
surf(Xinterp,Yinterp,Zinterp);
```

```
set(gca,'Linewidth',2);
```

```
view(-47,56);
```

```
% xlim([xmin xmax]);
```

```
% ylim([ymin ymax]);
```

```
zlim([(Zinterp_mean*0.4) (Zinterp_mean*1.4)]);
```

```
caxis([(Zinterp_mean*0.4) (Zinterp_mean*1.4)])
```

```
set(gca,'ZDir','reverse')
```

```
xlabel('X [mm] A tesztterület szélessége','FontSize',22,'Fontweight','bold')
```

```

ylabel('Y [mm] A tesztterület hosszúsága','FontSize',22,'Fontweight','bold')
xlabel('Sebesség [m/s]','FontSize',22,'Fontweight','bold')
grid on;
title('A sebesség eloszlása a tesztterület keresztmetszetében',...
      'FontWeight','bold',...
      'FontSize',24);

%save figure
set(gcf,'PaperPositionMode','auto')
print('-dpng','-zbuffer','-r200',[Filename 'velocity1.png']);

%Plot the velocity 2:
% figure('Position',[1 1 1280 800])
fig = figure;
    set(fig,'units','normalized','outerposition',[0 0 0.7 0.7]); %fullscreen
    set(fig,'visible','on'); %hide the figure
axes('FontSize',17);
surf(Xinterp,Yinterp,Zinterp);
set(gca,'Linewidth',2);
view(-47,56);
% xlim([xmin xmax]);
% ylim([ymin ymax]);
zlim([(Zinterp_mean*0.4) (Zinterp_mean*1.4)]);
caxis([(Zinterp_mean*0.4) (Zinterp_mean*1.4)])
%set(gca,'ZDir','reverse')
xlabel('X [mm] A tesztterület szélessége','FontSize',22,'Fontweight','bold')
ylabel('Y [mm] A tesztterület hosszúsága','FontSize',22,'Fontweight','bold')

```

```

xlabel('Sebesség [m/s]', 'FontSize', 22, 'Fontweight', 'bold')

grid on;

title('A sebesség eloszlása a teszterület keresztmetszetében', ...
      'FontWeight', 'bold', ...
      'FontSize', 24);

%save figure

set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto')

print('-dpng', '-zbuffer', '-r200', [Filename 'velocity2.png']);

%Plot the vorticity:

% figure('Position', [1 1 1280 800])

fig = figure;

    set(fig, 'units', 'normalized', 'outerposition', [0 0 0.7 0.7]); %fullscreen

    set(fig, 'visible', 'on'); %hide the figure

axes('FontSize', 17);

surf(Xinterp, Yinterp, vorticity);

set(gca, 'Linewidth', 2);

view(19, 65);

% xlim([xmin xmax]);

% ylim([ymin ymax]);

% zlim([vorticity_mean*0.1 vorticity_mean*2]);

% caxis([vorticity_mean*0.1 vorticity_mean*2])

xlabel('X [mm] A teszterület szélessége', 'FontSize', 22, 'Fontweight', 'bold')

ylabel('Y [mm] A teszterület hosszúsága', 'FontSize', 22, 'Fontweight', 'bold')

xlabel('Örvényleválás [1/s]', 'FontSize', 22, 'Fontweight', 'bold')

grid on;

```

```

title('Az örvényleválás eloszlása a teszterület keresztmetszetében',...
      'FontWeight','bold',...
      'FontSize',24);

%save figure

set(gcf,'PaperPositionMode','auto')

print('-dpng','-zbuffer','-r200',[Filename 'vorticity.png']);

%Plot the divergence:

% figure('Position',[1 1 1280 800])

fig = figure;

    set(fig,'units','normalized','outerposition',[0 0 0.7 0.7]); %fullscreen

    set(fig,'visible','on'); %hide the figure

axes('FontSize',17);

surf(Xinterp,Yinterp,div);

set(gca,'Linewidth',2);

view(19,65);

% xlim([xmin xmax]);

% ylim([ymin ymax]);

% zlim([div_mean*0.1 div_mean*2]);

% caxis([div_mean*0.1 div_mean*2])

xlabel('X [mm] A teszterület szélessége','FontSize',22,'Fontweight','bold')

ylabel('Y [mm] A teszterület hosszúsága','FontSize',22,'Fontweight','bold')

zlabel('Divergencia','FontSize',22,'Fontweight','bold')

grid on;

title('A divergencia eloszlása a teszterület keresztmetszetében',...
      'FontWeight','bold',...

```

```

    'FontSize',24);

%save figure

set(gcf,'PaperPositionMode','auto')

print('-dpng','-zbuffer','-r200',[Filename 'divergence.png']);

    %Plot the vectorfield:

% figure('Position',[1 1 1280 800])

fig = figure;

    set(fig,'units','normalized','outerposition',[0 0 0.7 0.7]); %fullscreen

    set(fig,'visible','on'); %hide the figure

axes('FontSize',17);

quiver(D(:,1),D(:,2),D(:,3),D(:,4),3);

set(gca,'Linewidth',2);

%view(19,65);

% xlim([xmin xmax]);

% ylim([ymin ymax]);

% zlim([div_mean*0.4 div_mean*1.4]);

% caxis([div_mean*0.4 div_mean*1.4])

xlabel('X [mm] A tesztterület szélessége','FontSize',22,'Fontweight','bold')

ylabel('Y [mm] A tesztterület hosszúsága','FontSize',22,'Fontweight','bold')

%zlabel('Vectorfield','FontSize',22,'Fontweight','bold')

grid on;

title('Vektormező a tesztterület keresztmetszetében',...

    'FontWeight','bold',...

    'FontSize',24);

```

```
%save figure  
  
set(gcf,'PaperPositionMode','auto')  
print('-dpng','-zbuffer','-r200',[Filename 'vector.png']);  
  
close all;  
  
end  
  
surf(Xinterp,Yinterp,div);
```