

Schlieren képalkotó diagnosztika fejlesztése fúziós alkalmazásokhoz

Vavrik Márton Bendegúz

Természettudományi Kar, Fizika MSc II. évf

Témavezető: **Dr. Réfy Dániel Imre**

Tudományos munkatárs, Energiatudományi Kutatóközpont

Absztrakt

Schlieren képalkotással egy átlátszó közeg sűrűség változásai vizualizálhatóak. Ehhez egy paraboloid vagy gömbtükör kétszeres fókuszpontjához egy fényforrást helyezünk, illetve egy borotvapengével kitakarjuk a visszavert fény egy részét, ott, ahol az fókuszálódik. Ha a tükrök előtt valamilyen sűrűségváltozás van, az eltéríti a rajta áthaladó fényutakat, és ezen fényút eltérülések számunkra intenzitás változásokként látszanak a kamera képeken. A kettő között a törésmutató változás és az optikai úthossz teremt kapcsolatot.

Munkám során egy Schlieren képalkotó diagnosztikát terveztem és telepítettem az Energiatudományi Kutatóközpontban található tört pellet belövő (Shattered Pellet Injector - SPI) rendszerre. Az SPI célja, hogy egy nagynyomású gázzal gyorsított fagyasztott hidrogén pelletet juttasson be egy mágnesesen összetartott fúziós berendezés plazmájába, annak kontrollálatlan összeomlása, úgynevezett diszrupciója közben [1]. A pelletet a plazmába érés előtt egy fémlapon összetörve kriogén port hozunk létre, mely a plazmába jutva hőszugárzássá alakítja annak energiáját, egyenletesen szétoszlátva azt térben és időben a berendezés falán. Az ITER, az első reaktor méretű tokamak kísérlet első falának épségét 27 db SPI védi majd. Az EK SPI kísérlet célja a pellet fagyasztásának, gyorsításának és összetörésének vizsgálata.

Az ITER számára kritikus a pellet körül kialakuló gázáramlás ismerete, mely vizsgálatára eddig pontmérések mellett csak modellezés történt. A Schlieren képalkotás alkalmas a közeg sűrűségváltozásainak, így a hajtógáz turbulens áramlásának láthatóvá tételére anélkül, hogy a pellet vagy a gáz mozgását befolyásolná.

Egy nagy fókusz távolságú lencsével vizualizáltuk a törésmutató gradiensek hatását az érzékelt intenzitásra, ami lehetőséget teremt a rendszer sűrűség-intenzitás kalibrálására. Az SPI rendszerre telepített Schlieren diagnosztikával vizsgáltuk a pellet gyorsítására szolgáló nagynyomású szelepből kiáramlást légköri nyomásra nyitva nitrogénnel, illetve a vákuumrendszerbe nyitva hidrogénnel. A szelep dugattyújának különböző nyitásai mellett megfigyeltünk szub- és szuperszonikus kiáramlást mely lehetőséget teremt majd a szelep fúvókájának optimalizációjára. A pellet körüli áramlásokat is meg tudtuk figyelni, és tudtuk vizsgálni, mikor előzi meg a hajtógáz a pelletet. Végrehajtottunk a rendszer térkalibrációját is egy kilőtt pellet átmérőjének ismeretével.

Tartalomjegyzék

Absztrakt.....	1
Bevezető.....	3
Mágneses összetartásos fúzió.....	3
Tört pellet belövő rendszer (SPI).....	4
Schlieren képalkotás.....	6
A módszer alapjai, története.....	7
Kísérleti bemutatáshoz.....	9
SPI rendszerhez, motiváció.....	9
Tabletop rendszer.....	10
A telepített diagnosztika.....	11
Diagnosztika elemei, paramétere.....	11
Tükör.....	11
Fényforrás és kitakarás.....	12
Gyorskamera.....	13
Írányítás és adatfeldolgozás.....	13
Térkalibráció.....	14
Törésmutató-kalibráció / Sűrűség-gradiens hatások vizualizációja lencsével.....	15
Eredmények.....	16
Lökéshullámok áramlástana.....	16
Mérések légkörbe nitrogénnel.....	16
Mérések hidrogénnel, pellet nélkül.....	18
Mérések Hidrogénpellettel.....	19
Összefoglalás.....	26
Köszönetnyilvánítás.....	26
Hivatkozások.....	27

Bevezető

Mágneses összetartásos fúzió

A magfúziót az energiatermelés szent gráljának is szokás nevezni, hiszen nem bocsát ki üvegházhatású gázokat, nem tud a reakció megszabadni, a reakciótermékek nem radioaktívak, és nem hagy maga után hosszú felezési idejű izotópokat. Az optimális reakció során hidrogén izotópok egyesülnek héliummá.

Ahhoz, hogy ezt a reakciót optimálisan fenntartsuk, a minél nagyobb sűrűség mellett 150-200 millió fokra kell felfűtenünk a hidrogént, amekkora hőmérsékleten az plazma halmazállapotban lesz. Ugyanakkor nincs olyan konténer, ami az ilyen forró plazmát meg tudná tartani. Kihasználva azt, hogy a plazmában ionizált részecskék vannak, amik Larmor-pályán követik a mágneses teret, alkotható egy olyan mágneses geometria, amely meg tudja oldani a plazma összetartását.

Ilyen berendezések a Tokamakok, amelyek egy tórusz alakú mágneses teret használnak, melyet a stabilitása érdekében egy változó mágneses térrel hajtott plazmaárammal csavarnak meg. Jelenleg már demonstrálva van, hogy lehetséges ezzel a módszerrel erőmű nagyságrendű teljesítménnyel termelni, 1997-ben a JET (Culham, Egyesült Királyság) kísérlet 16 MW teljesítményt adott le, viszont ehhez 25 MW fűtésre volt szüksége, és csak tizedmásodperc időskálán tudta ezt elérni. Azóta volt olyan kísérlet, 2021-ben, ahol folytonos üzemben, 12 MW fúziós teljesítményt demonstráltak 5 másodpercig. A kísérlet hosszát a rézből készült elektromágnesek melegedése korlátozta csak.

Ahhoz, hogy több energiát termeljen a berendezésünk, mint amennyit fogyaszt, sokat segít, ha növeljük a méretét, hisz a veszteségeink a felülettel, a teljesítményünk pedig a térfogattal arányos. Így jutunk a következő lépéshez, az ITER fúziós reaktorhoz, amelyet jelenleg szerelnek össze Cadarache-ban, Franciaországban. Ez lesz a legnagyobb tokamak típusú fúziós kísérlet, és 10-szeres energiasokszorozást céloz, azaz, hogy a fúziós teljesítmény tízszeresen haladja meg a plazma fűtéséhez szükséges teljesítményt.

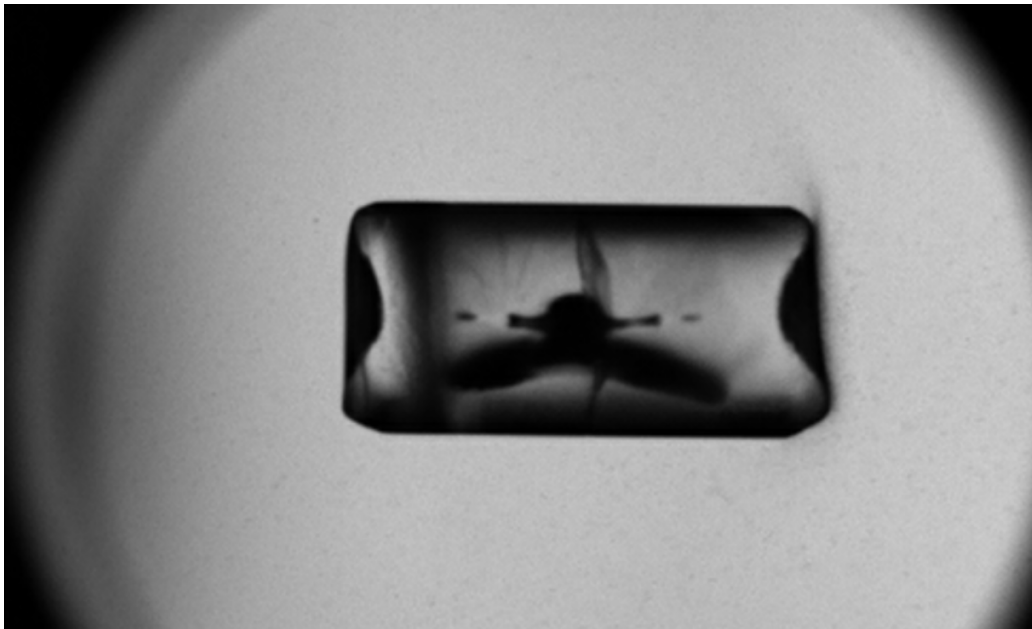
Ennél a nagyobb berendezésnél még fontosabb a berendezés falának védelme: bár a plazma tömege nagyjából 1 g, mégis a plazma termikus energiája 100 MJ nagyságrendben lesz a számítások szerint [2], továbbá a plazma energiája tipikusan néhány százalék a mágneses térben tárolt energiához képest, azaz a teljes berendezésben tárolt energia a 10 GJ nagyságrendben lesz. A tokamak plazmákban hajtott több MA áram miatt kialakulhatnak áram hajtotta instabilitások, ezek szélsőséges esete a kontrollálatlan plazma összeomlás, vagy másnéven diszrupció. Diszrupció közben a plazma ms időskálán elveszti termikus energiáját, lehűl, és drasztikusan lecsökken a vezetőképessége. A plazma áram azonban nem tud ilyen időskálán disszipálódni a plazma önindukciója miatt, így az állandó áram és a megnőtt ellenállás miatt nagy hurokfeszültség alakul ki a tokamakban, ami a plazma elektronpopulációjának egy részét relativisztikus sebességre képes gyorsítani. Ez az úgynevezett elfutó elektronnyaláb a 15 MA-es plazmaáram 10-50%-át is tartalmazhatja, így MeV energiával és MA árammal rendelkezhet. A nyaláb kollimált is lehet, így előfordulhat, hogy egy kis területen találja el a berendezés falát [3]. Egy ilyen esemény tönkre teheti a berendezés belső falát, a szimulációk szerint az ITER első fala nem bírna el egy nagy diszrupciót sem, így ezek hatását mindenképp csökkenteni kell.

A diszrupciók előfordulnak a jelenlegi tokamak típusú kísérleti berendezéseken, de mivel ezek kisebbek, így a plazmában és a mágneses térben tárolt energia is kisebb, így hatásuk mérsékelhető nagymennyiségű gáz plazmába juttatásával. Az ITER-en ez a módszer nem működne a berendezés mérete és a plazma nagy sűrűsége miatt: nem tud elég gyorsan a plazma közepébe jutni a hangsebességgel táguló gáz. Ennek

kiküszöbölésére az a jelenlegi ötlet, hogy a plazma hűtésére szolgáló gázt egy kriogenikus pelletté fagyasztva lőjük a plazmába, azt sok száz apró darabba törve a plazmábaérés előtt.

Tört pellet belövő rendszer (SPI)

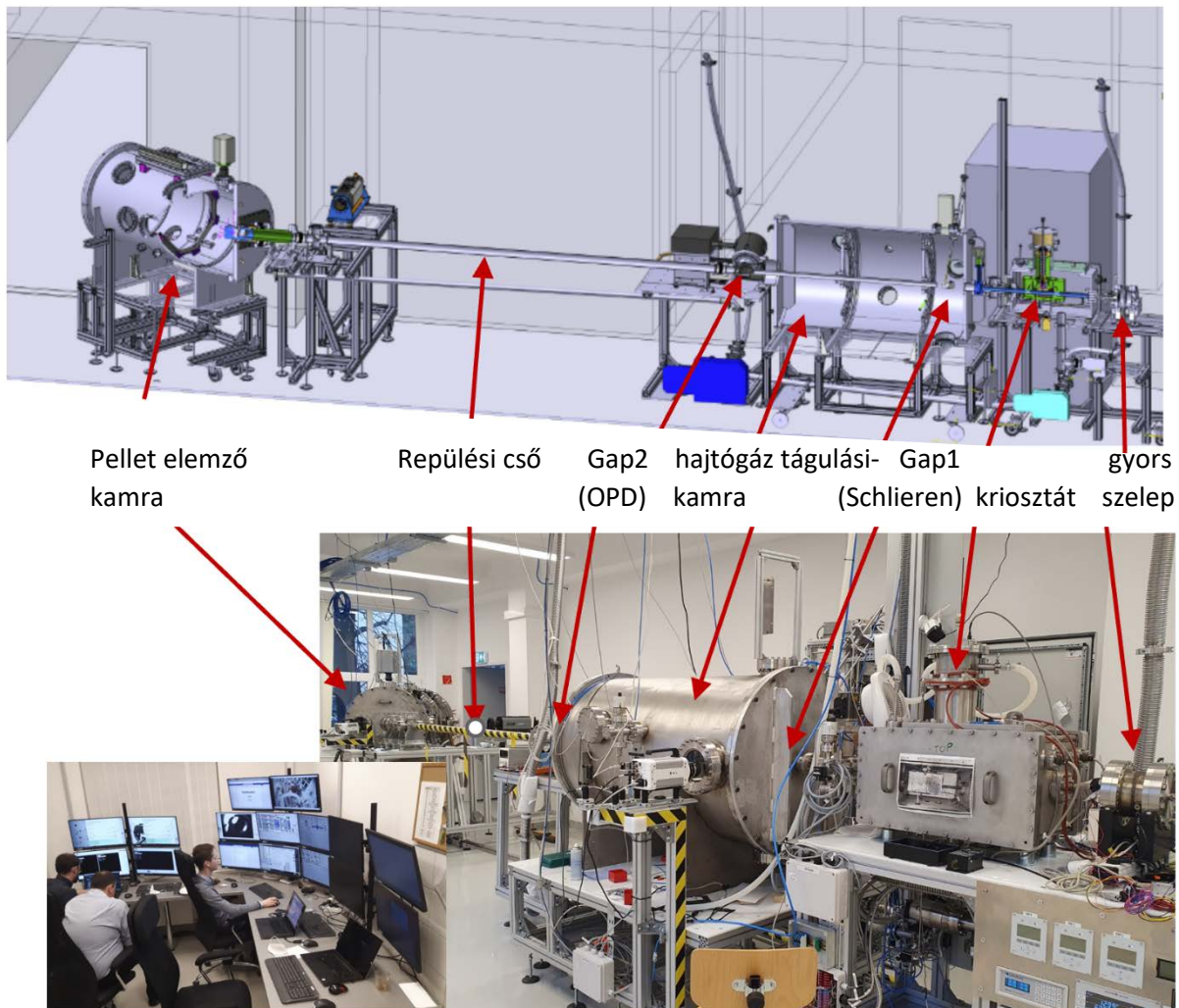
A diszrupciókkal szembeni védelem egyik eszköze lehet, ha a diszrupciót előre jelző rendszer jelzése után rövid időn, pár ezredmásodpercen belül egy fagyasztott hidrogén pelletet (lásd 1. ábra) juttatunk a plazmába. Fontos, hogy fagyasztott legyen, hiszen egy ITER méretű berendezésnél annak van esélye a plazma belsejébe is bejutni, így azt is lehűteni időben. A hűtés a pelletanyag ablációja során keletkező sugárzással (vonalas, fékezési, ciklotron) történik. A törésre azért van szükség, mert a hűtéshez szükséges kriogén jég mennyisége akkora a pelletben, hogy törés nélkül a pellet keresztülhaladna a plazmán, és a csak kicsi felületi része ablálódna. A töréssel azonban megnövelhetjük a pellet effektív ablálódó felületét.



1. ábra. Egy kilőtt pellet repülés közben, az EK SPI berendezéséből

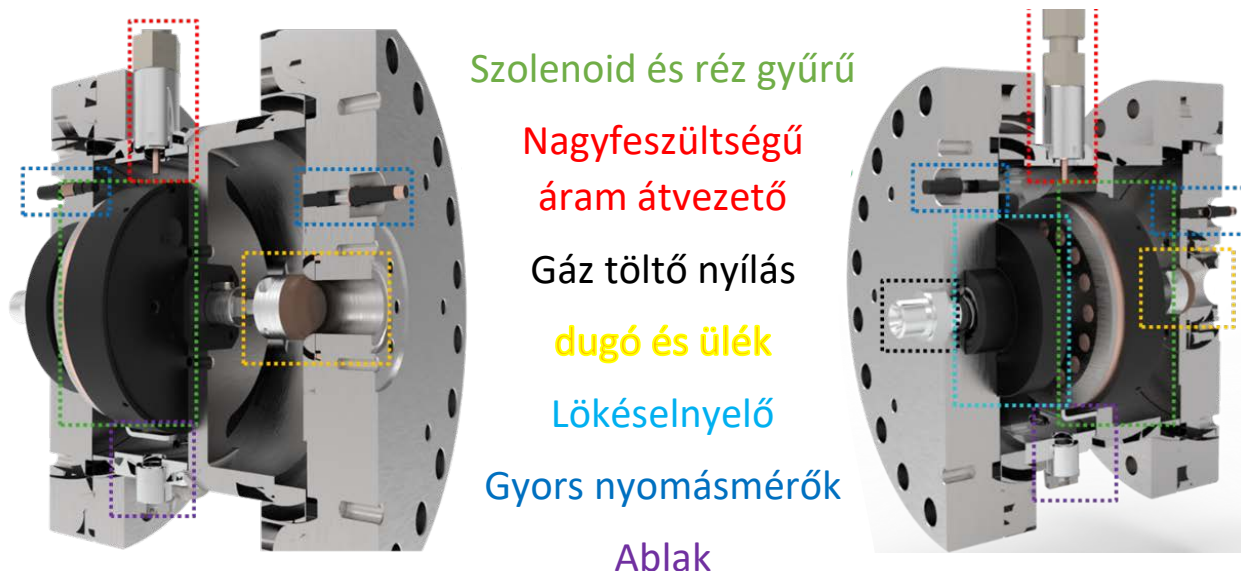
ITER DMS Support Laboratory projekt keretében egy ilyen, az ITER-hez építendővel azonos műszaki paraméterekkel rendelkező hidrogén pellet belövő rendszert épített az Energiatudományi Kutatóközpont csapata (lásd 2. ábra), melynek célja, hogy megismerje a pellet formálásának, gyorsításának és törésének folyamatát (lásd bővebben: Réfy et al [4], Walcz et al [5], Zoletnik et al [6]).

Az SPI rendszer célja, hogy egy nagynyomású gázzal gyorsított fagyasztott hidrogén pelletet juttasson be egy mágnesesen összetartott fúziós berendezés plazmájába, annak kontrollálatlan összeomlása előtt vagy közben. A pelletet a plazmábaérés előtt egy fémlapon összetörve kriogén port hozunk létre, mely a plazmába jutva hőszugárzássá alakítja annak energiáját, egyenletesen szétosztatva azt térben és időben a berendezés falán. Az ITER kísérlet első falának épségét 27 db SPI védi majd. Az EK SPI kísérlet célja a pellet fagyasztásának, gyorsításának és összetörésének vizsgálata.



2. ábra. Az EK SPI rendszere, a pellet a jobb oldali hőszigetelt dobozban (kriosztátban) készül, mellette található a kilövéséért felelős szelep. Onnan halad balra az első vákuumkamrába (középen), ahol a Schlieren-diagnosztikánk kapott helyet, majd a második vákuumkamrában található törőfejen törik szét. Ábra forrása: [6]

A hidrogén pelletet egy gyors, nagynyomású szeleppel lökjük ki (lásd 3. ábra). A működtetése során a szelep tartályát feltöltjük a kívánt gázzal, ami lehet például hidrogén, nitrogén vagy egyes nemesgázok, általában 20-100 bar nyomásra, majd a szelep dugóját (3. ábrán sárgával) egy örvényáramos elven működő aktuátorral kinyitjuk. Az aktuátor egy RLC körrel analóg kondenzátor-tekercs primerköréből és egy RL körrel analóg réz gyűrűből áll. A primer kör kondenzátorát 500-2000 V-ra töltve, azt egy nagyfeszültségű kapcsolóval a tekercsre sűtve indítható a rendszer. A primer körben gyorsan változó áram mágneses tere áramot indukál a szekunder rézgyűrűben, és a Lenz törvény alapján a kettő között egy taszító erő ébred, amivel a szelepszár mozgatható, így ki tud áramlani a gáz. A szelepet egy rugó zárja, majd a tartályának sztatikus nyomása zárva is tartja a szelepet. A dugó 1-10 ms időtartamig van csak nyitva, és a kiáramló gáz mennyisége, így a gáz nyomása is szabályozható a kondenzátor feszültséggel (lásd bővebben: Réfy et al [4]).

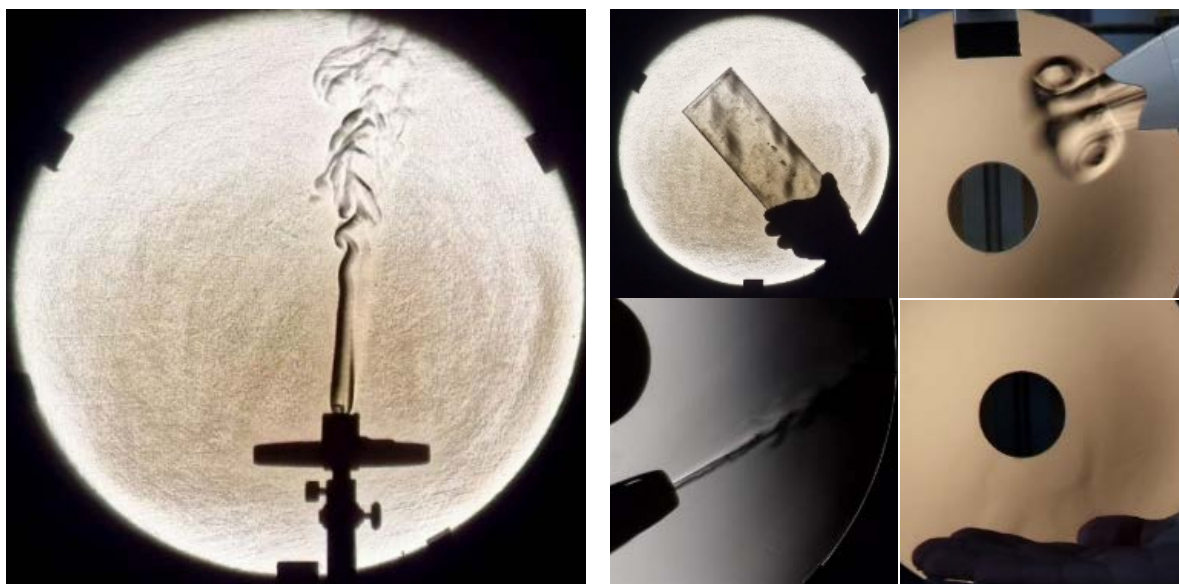


3. ábra. A pelletet kilövő gázt beengedő szelep és elemei. Forrás: Réfy D.

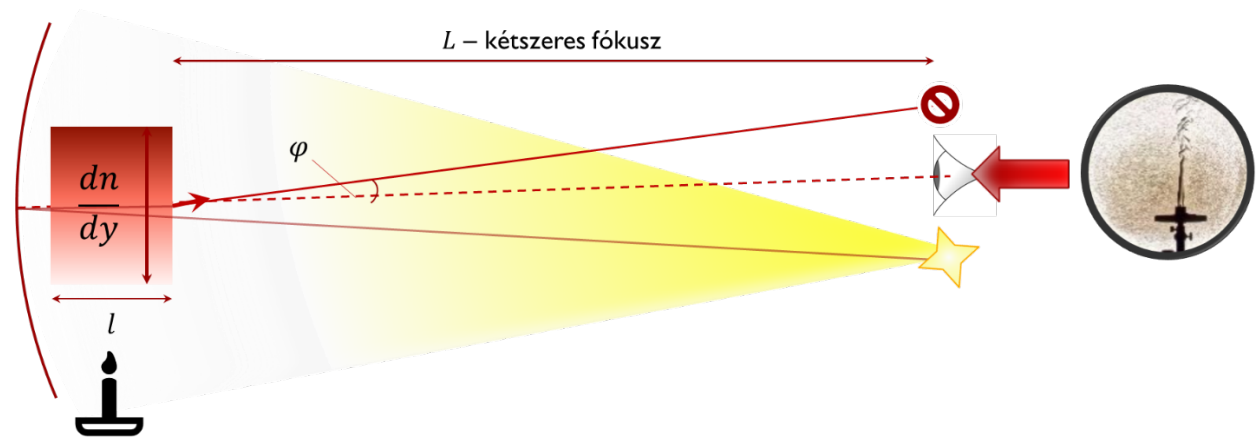
Azért is érdemes ismerni, hogy a pellet előtt jut-e gáz a plazmába, és ha igen mennyi, mert az a plazma külső rétegeit hűtené le, ezzel tovább gerjesztve egyes instabilitásokat. Ha pedig ismerjük, hogy jut be gáz a pellet előtt, tudjuk úgy optimalizálni a rendszert, hogy ezt minimalizáljuk. A gázáramlás noninvazív vizsgálatára egy lehetséges eszköz az úgynevezett Schlieren képalkotás.

Schlieren képalkotás

Schlieren képalkotásnál egy parabolatükör vagy gömbtükör, egy fényforrás, kitakarás és egy érzékelő szenzor (kamera) segítségével láthatóvá tehetünk a tükör előtti törésmutatógradienseket (ahogy a 4. ábrán), így összenyomható átlátszó közegekben – legtöbb gázban – kialakult áramlásokat is. A módszert, történetét, elméletét, előnyeit és hátrányait, illetve egyéb tulajdonságait részletesen taglalja G. S. Settles könyve [7], mely a továbbiakban is hasznos forrás lesz.



4. ábra Egy gyertyaláng által keltett áramlás (bal oldalt) és egyéb sűrűségváltozások (üvegben belső feszültség, hajszárító által kifújott turbulens levegő, kieresztett PB gáz, felszálló kézmeleg) által, telefonnal készített Schlieren felvételeken [8]



5. ábra. A Schlieren képalkotás kísérleti elrendezése egy parabolatükörrel, ahol a sűrűségváltozás a gyertyából felszálló meleg levegő.

A módszer alapjai, története

Ha a tükör előtt valamilyen sűrűség vagy törésmutató gradiens található, az eltéríti a rajta áthaladó fényt, az optikai tengelyre merőleges, Y-irányú törésmutató gradiensnek a Z-irányú optikai tengely mentén vett integráljával [7]:

$$\varphi = \frac{1}{n} \int \frac{dn}{dy} dz$$

Ha közel vagyunk a tükörhöz, a tükör és a törésmutató gradiens között az eltérülés hatása elhanyagolható, a fénysugarunk ezen a kétszeres fókusz távolságon térül el, így az eltérülés:

$$d = L\varphi = \frac{L}{n} \int \frac{dn}{dy} dz$$

Ahol n a törésmutató, melynek az optikai tengelyre merőleges gradiensét vizsgáljuk, amely összefügg a $\frac{d\rho}{dy}$ sűrűséggradienssel (ahol k egy gázra jellemző konstans):

$$n - 1 = k\rho$$

$$\frac{dn}{dy} = k \frac{d\rho}{dy}$$

$$d = L\varphi = \frac{L}{n} \int k \frac{d\rho}{dy} dz$$

Tehát a tükörből visszatérő fénysugarak aszerint fókuszálódnak külön pontokba a fókuszsíkon, mekkora vonalintegrált sűrűséggradiensekkel találkoztak útközben. Ha a fókuszsíkra érkező fény egy részét kitakarjuk, például egy borotvapengével, akkor válogathatunk mekkora sűrűséggradienseket engedünk át. Ha ezután az átjutó fényt egy kamerával felvesszük, aszerint látunk intenzitáskülönbségeket a képen, hogy hol voltak (kitakart) sűrűséggradiensek.

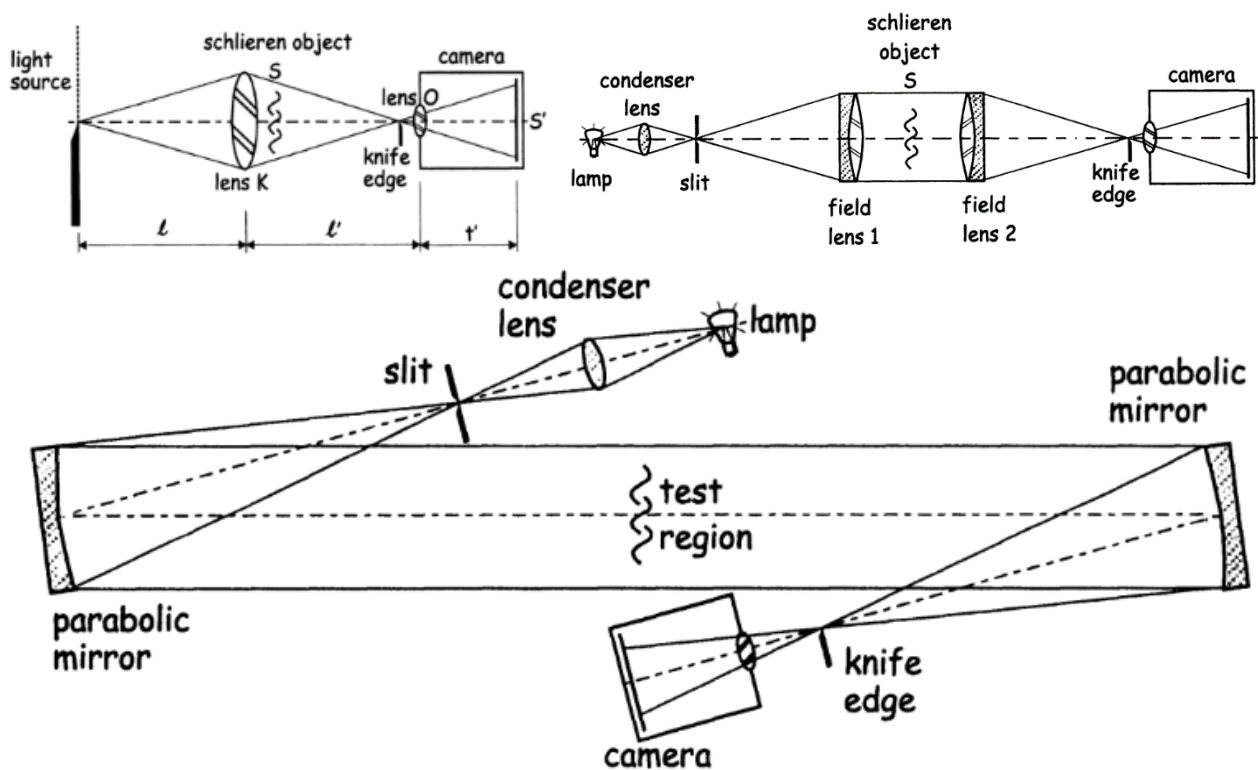
A módszert német üvegyártó mesterek alkalmazták először üveglapok minőségének ellenőrzésére, bár ők még egy kamera szenzor helyett camera obscurát alkalmaztak, tehát egy távoli falra vagy ernyőre vetítették ki a képet, vagy a fókuszpont környékén szemmel megfigyelték a képet. Itt rés nem kellett mert a fókuszálás és a borotvapengével kitakaras ezt megoldotta. Innen származik a módszer neve is, a német

Schliere szó vonalakat jelent, és ahogy azt Jebsen-Marwedel [8] is taglalja (illetve lásd Settles [7] 7. oldal), ez összefügg azokkal a megfolyásokkal/inhomogenitásokkal az üvegben, amelyek vizsgálatára a módszert alkalmazták.

A jó leképezés eléréséhez minimalizálni kell az optikai torzításokat, melyek esetünkben leginkább kóma és asztigmatizmus jellegűek (Settles, 43. oldal [7]). Az, hogy gömb vagy parabolatükröt használunk nem ad nagy különbséget, mert alacsony látószög alatt elég hasonló a két görbe, bár gömbtükör esetében kisebbek a torzítások, hiszen az képez le matematikailag pontforrásból pontforrást (bármekkora kiterjedt forrásnál már megjelennek torzítások, ha kicsik is). A lényeg, hogy a kiterjedt, de körülbelül pontszerű fényforrásunkból (hasonló méretű) pontszerű fókuszpontot adjon, de ez az optikai távcsöveknél elvart $\lambda/8$ és afölötti pontosság (ahol λ az eszközzel vizsgált fény hullámhossza) bőven több a szükségesnél.

A kísérleti elrendezés egyszerűsítése, és a különböző torzítások minimalizálása érdekében a fényforrást és annak képét minél közelebb kell helyezni az optikai tengelyre merőleges síkban. A kép a kétszeres fókuszpontban keletkezik, melyhez minél közelebb kell helyezni a kitakarásunkat és a fényforrásunkat.

A rendszerben homorú tükör helyett használhatunk gyűjtőlencsét, illetve használhatunk két tükröt vagy lencsét, amelyeket beállíthatunk úgy, hogy kettejük között a tárgytérben párhuzamosan haladjanak a fényforrásból kijövő fénysugarak, így ott ne legyen érzékeny a rendszer a vizsgált törésmutató gradiens optikai tengely menti pozíciójára (lásd 6. ábra).



6. ábra. Különböző geometriájú Schlieren elrendezések. Ábrák forrása: Settles [7]

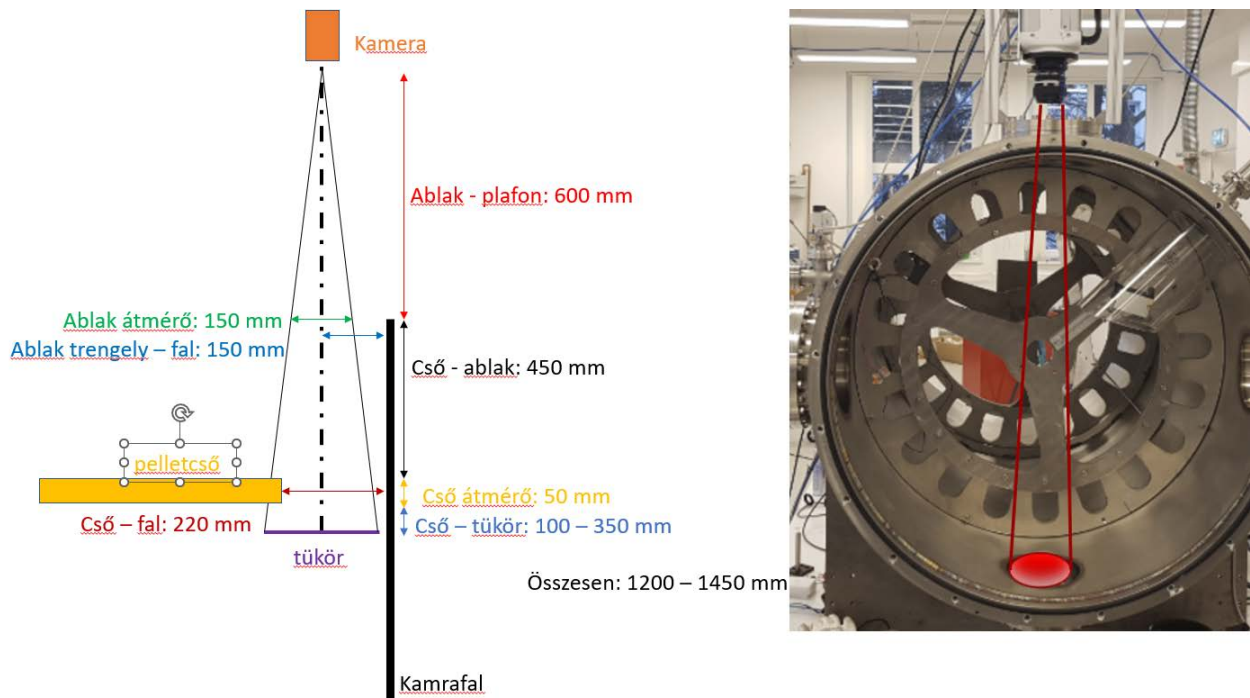
Kísérleti bemutatáshoz

Ez – az általában laborban elvégzendő – kísérlet elvégezhető mindösszesen egy parabola tükörrel és egy okostelefonnal. Így könnyebben szállítható és egyszerűbben bemutatható, hiszen egy berendezésben van a szükséges fényforrás és kamera, illetve utóbbi kis apertúrája lehetővé teszi, hogy eltakarás sem szükséges a kísérlet elvégzéséhez, mert ezt maga a telefon kamerájának kis apertúrája végzi el, ha a fényforrás fókuszált képét a kamera lencséjének szélére irányítjuk. Mivel a tükör a teljes rá érkező fényintenzitást a kamerára fókuszálja, a kísérlethez nem szükséges sötétítés sem. A módszerrel bővebben foglalkozok fizikai szemle cikkemben [9].

SPI rendszerhez, motiváció

Fontos az SPI rendszerben a pelletet hajtó gáz áramlásának ismerete, mely célra több gyors nyomásmérő is rendelkezésre áll: kettő a kilövőcsőben, egy a tágulási kamrában. Ezen mérések mellett a gáz áramlás térbeli eloszlásának ismerete is fontos lenne, hiszen az előbbi diagnosztikák csak néhány pontban szolgáltatnak nyomás információt. Erre a célra ideális választás a Schlieren képalkotás, mert a hajtógáz áramlásait képes láthatóvá tenni noninvazív módon. Ehhez a tükröt a vákuumkamrában helyeztük el, a képalkotás maradék része tartózkodhat azon kívül (lásd 7. ábra).

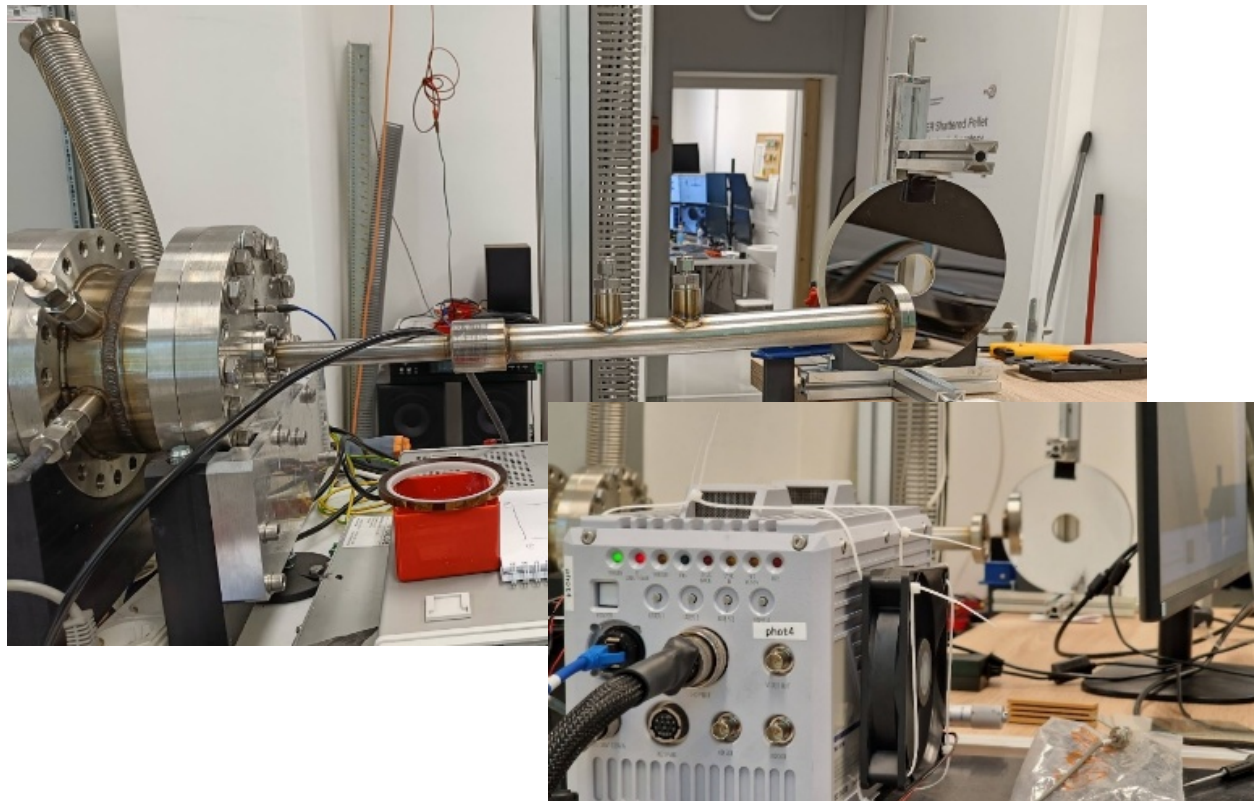
Az összeállítás tervezésénél sok szempontot kellett figyelembe vennünk. Egy piackutatás után arra jutottunk, hogy az elérhető tükrök, az adott ablakméret és vákuumkamra geometria mellett ez az optimális megoldás, hiszen közel kell lennie a vizsgált sűrűségváltozásnak, tehát a pelletnek a tükörhöz, jóval közelebb, mint a kamerához. Mivel a fény odafelé és visszafelé is megtörik a sűrűségváltozáson, két képet kapunk, amelyek, ha nagy az úthossz a sűrűségváltozás és a tükör között, ott is elmozdulnak, kettős képet alkotva. Ha a vákuumrendszerbe helyezük a tükröt, közel a pellethez, kiküszöböljük a kettős képet.



7. ábra. A beépített Schlieren-rendszer tervei.

Table-top rendszer

Mielőtt beépítettünk volna a vákuumkamrába egy Schlieren diagnosztikát, ki akartuk próbálni. Szerencsére létezett a berendezésnek olyan konfigurációja, ahol a szelep kivezetését megfordítva levegőbe tudunk lőni (a durranógáz-veszély elkerülése érdekében nitrogénnel). Rendelkezésre állt egy 0.5 m fókusztávolságú tükör, amit az OMI optika kft-től kértem kölcsön, még a Fizikai szemlében publikált kutatásomhoz. Ezzel és egy gyorskamerával már fel tudtunk építeni egy asztalra szerelhető kísérletet (lásd 8. ábra), ahol a tükör kb. 10-20 cm-re volt a csőtől, amiből az optikai tengelyre merőlegesen áramoltattuk ki a gázt, és 108 cm-nél volt a LED és kitarakás, közvetlenül utána pedig a kamera objektíve. A kísérlet sikeresek bizonyult, ahogy azt az eredmények között tárgyaljuk, így lehetőség nyílt a diagnosztika telepítésére a vákuumrendszerbe.

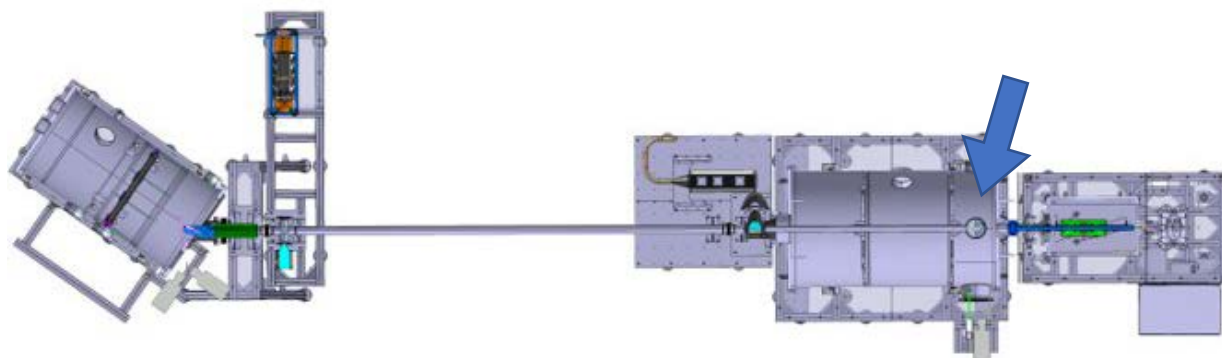


8. ábra Az asztalra telepített Schlieren kísérlet.

A telepített diagnosztika

Diagnosztika elemei, paraméterei

A diagnosztikát a SPI kísérletben a vákuumrendszer pellet utazása szerinti első felső betekintő ablakába (GAP1) helyeztük el, függőlegesen, 2022 szeptemberében (lásd 9. ábra).



9. ábra. Az SPI rendszer sematikus rajza, jelölve rajta a diagnosztika helye (GAP1)

Tükör

A kísérlethez egy 114 mm átmérőjű, 500 mm fókusztávolságú, teleszkópból kiserelt parabolatükröt használtunk. Először megbizonyosodtunk, hogy vákuum-kompatibilis, azaz például benne vagy a rögzítésben nincs erősen párolgó anyag, amely a vákuumunk minőségét csökkentené, majd a gyári felfogó szerkezete segítségével egy állvánnyal együtt rögzítettünk a vákuumkamra belsejében, úgy, hogy a tükör kb 100 mm-re helyezkedik el a pellet útjának közepétől (lásd 10. ábra).

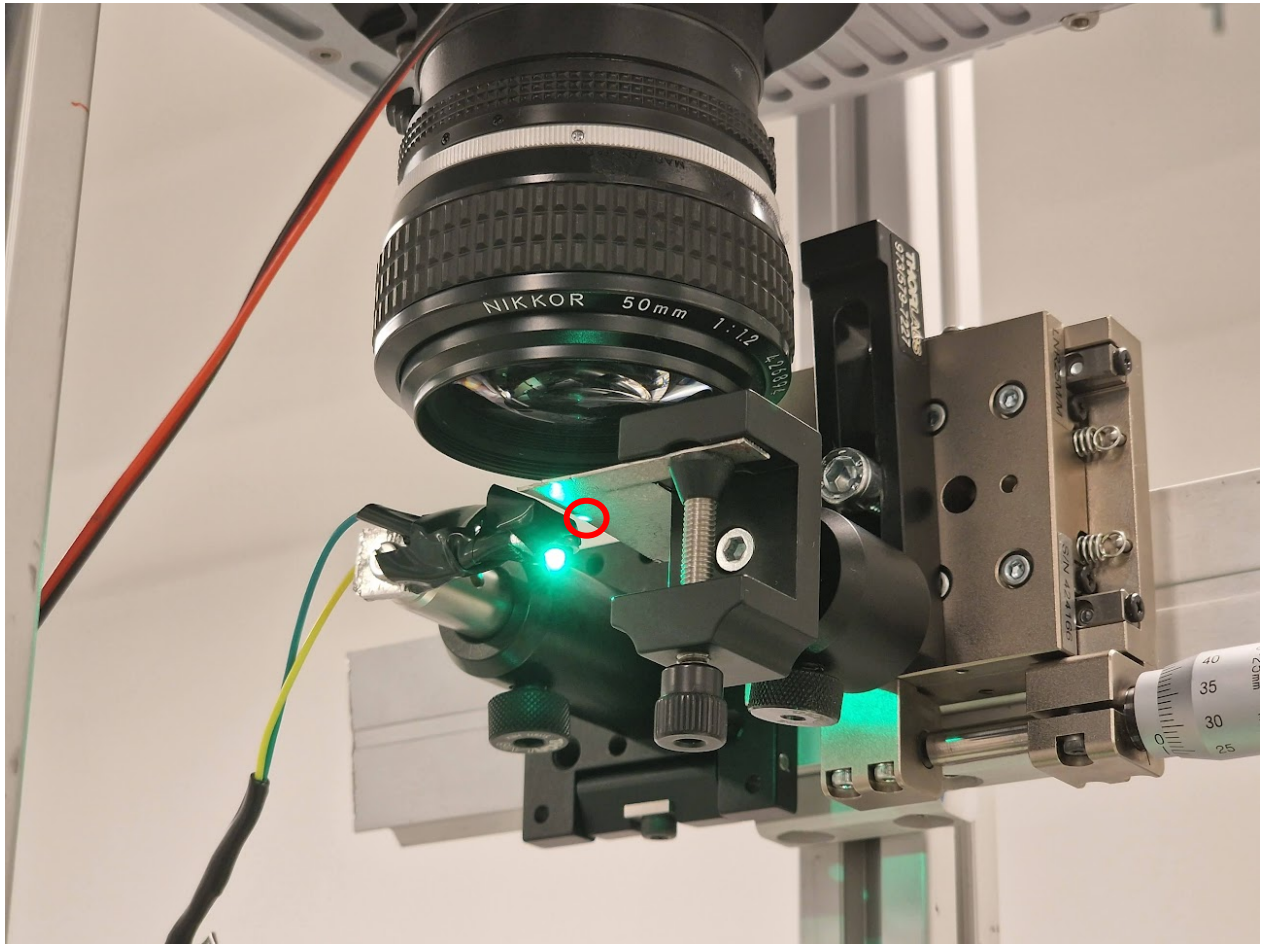


10. ábra. A vákuumkamrába behelyezett tükör. A pellet a bal oldali nyílásból érkezik, és a jobb oldali csövön halad tovább.

Fényforrás és kitakarás

Fényforrásnak egy egyszerű zöld LED izzót használtunk, amelyet egy egyenáramú tápegységről hajtottunk meg, és egy optikai sínen rögzítettünk a kamera előtt, a kétszeres fókuszpontban. Közvetlenül mellette a kétszeres fókuszpontban kapott helyet a kitakaró él, amely egy fémlap, melyet a precíziós beállítás érdekében mikrométer orsóval tudunk mozgatni.

Ahogy a lenti, 11. ábrán is látható, a kamera objektívét (Nikon 50mm F1.2, F=4.0) úgy helyeztük el, hogy minél közelebb legyen a fókuszált fényfolyhoz.



11. ábra. A kamera és objektíve (fent, lefele nézve), alatta a kitakarást végző fém él, illetve a megvilágítást adó LED (zöld pont) és annak képe a kitakaró élen (piros körben).

Gyorskamera

A kitakaró él után egy Photron Nova S16 típusú gyorskamerát helyeztünk el, úgy hogy az a kitakaráson továbbjutó fényt teljes mértékben begyűjtse. Ez a gyorskamera 16000 fps-el képes rögzíteni a teljes, 1024x1024 pixeles szenzorát használva, onnan a felbontás csökkentésével, a szenzor rögzített tartományának vágásával tovább növelhető a másodpercenként rögzített képkockák száma. Az általunk használt optikával azt tapasztaltuk, hogy a szenzor középső 512x512-es tartományát használva 50 kfps-el, vagy 384x240-es felbontás mellett 120 kfps értékekkel dolgozhatunk. A begyűjtött fény mennyisége nagyjából 75%-ra zárt kitakarással annyi volt, hogy 2 μ s expozíciós idővel tudtuk a szenzor 255 digitális tartományának közepére állítani a jelet, 2.23 V led kivezérlés mellett. A kamera indítását a pellet kilövését is indító irányítógépről adott trigger jellel végezzük automatikusan.



12. ábra. A gyorskameránk, illetve a LED és a kitakarás, felhelyezve a vákuumkamra fölé

Irányítás és adatfeldolgozás

A Photron gyorskamerához elérhető egy kezelőszoftver, a Photron Fastcan Viewer (PFV), amellyel megoldható mind a felvétel elindítása, a kamera konfigurálása, tér- és időbeli felbontás beállítása, mind a felvétel visszanezése és elemzése különböző sebességeken.

Fontos, hogy a felvétel a pellet kilövésével együtt induljon el, amit úgy értünk el, hogy a vezérlőrendszer egyszerre indítja el a kamerát, és zárja a szelep primerkörének nagyfeszültségű reléjét. A kamera az indítás

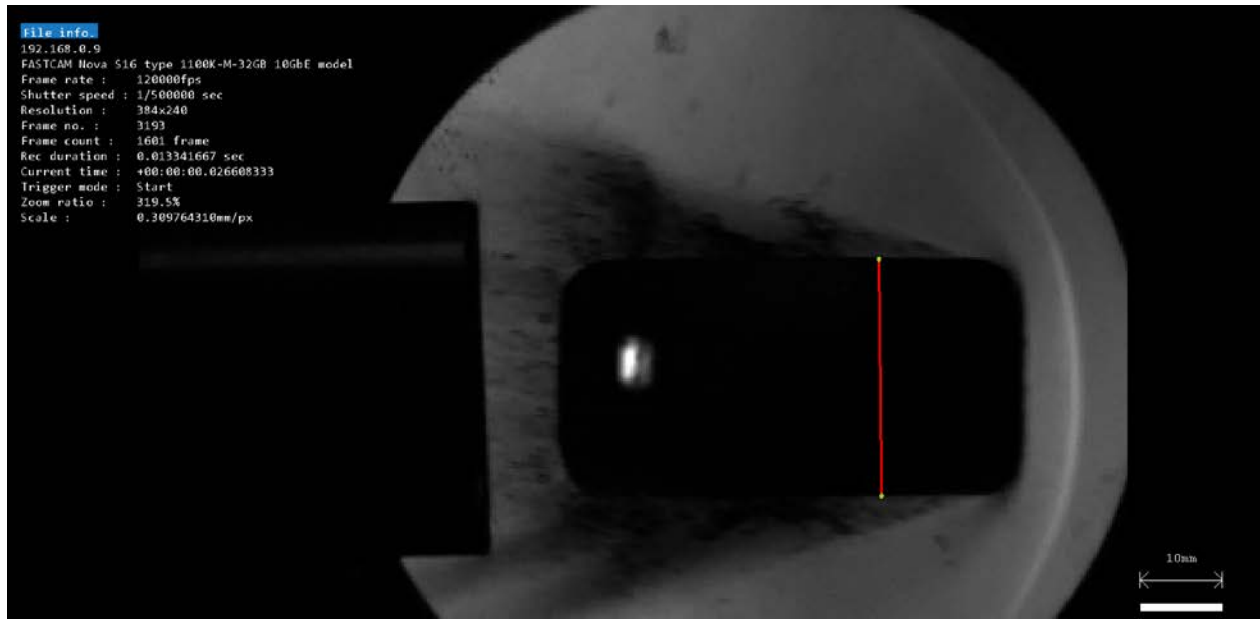
után körülbelül 1 másodpercet vesz fel, melyet a kamera fedélzeti memóriájának mérete korlátoz. Ez bőven elég a mérésekre, hiszen a pellet pár ezred másodperc alatt áthalad a kilövőrendszeren. Az adatokat a kísérletvezénylőben található diagnosztikagépről azonnal elemezni tudjuk.

Térkalibráció

A sebességek megállapításához fontos ismernünk egy pixel mekkora távolságnak felel meg, ennek pedig legegyszerűbb módja, ha valamilyen ismert méretű tárgyat helyezünk arra a helyre, ahol a vizsgálni kívánt távolságot várjuk, és megnézzük hány pixelt foglal.

Legkézenfekvőbb megoldás, ha magát a kilőtt pelletet vesszük, amiről tudjuk, hogy az átmérője 28.5 mm, és az FPV segítségével azonnal be tudjuk kalibrálni a távolságokat, ami szerint egy pixel $0.31 (\pm 0.02)$ mm-nek felel meg. Ezenkívül használhatunk egy átlátszó milliméterpapírt is, amit behelyezünk a pellet útjába.

Ezután az elmozdulás mértéke és a másodpercenként rögzített képkockák számának ismeretével meg tudjuk állapítani egy objektum sebeségét. Ehhez az FPV rendelkezik lekövető funkcióval.

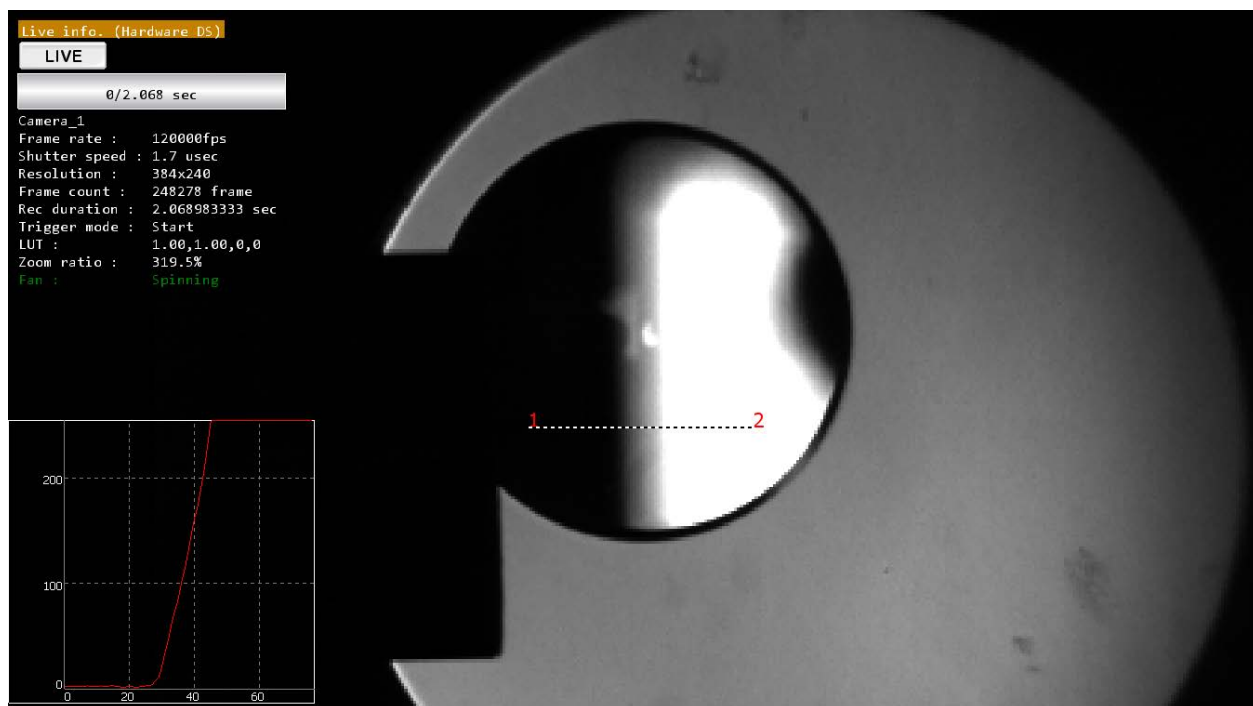


13. ábra. A Schlieren képen az elhaladó pellet, pirossal a pelletátmérő, ami alapján a diagnosztikánkat kalibrálni tudtuk.

Törésmutató-kalibráció / Sűrűség-gradiens hatások vizualizációja lencsével

Mivel az eltérülés egyenesen arányos a vonalintegrált sűrűség-gradienssel, egy nem nulla méretű fókuszpont esetén a kitakarásan továbbjutó fény egy jellemző, monoton karakterisztika szerint változik (pontoszerű fókuszpontnál hirtelen az átmenet, tehát nem látunk szürke színeket, mivel nem tudjuk részben kitakarni), az érzékelt intenzitás arányos az eltérüléssel eltolt fókuszált fényfolt kitakarás utáni területével.

Egy nagy, 10 méteres fókusztávolságú gyűjtőlencsét a tükör elé helyezve láthatóvá válik a leképezés elterülés-intenzitás karakterisztikája (lásd 14. ábra bal lent, piros vonallal jelölve a képen látható metszetben az intenzitás eloszlás). Az ötletet Hargather és Settles cikkéből vettük [10]. Egy ilyen kalibráció segítségével a Schlieren-képen az adott pontokban látott intenzitás alapján rekonstruálható a sűrűséggradiens, abból pedig visszaállítható a sűrűségeloszlás.



14. ábra. Nagy fókusztávolságú gyűjtőlencse a tükör előtt.

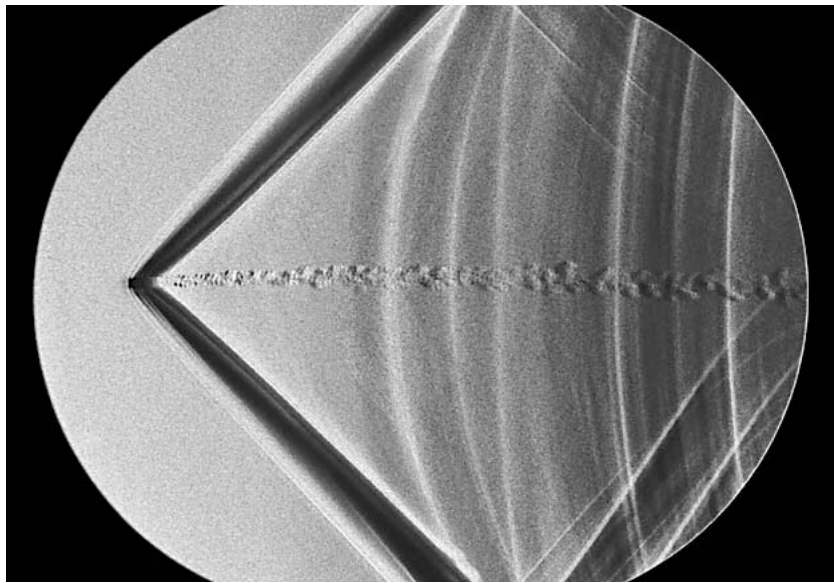
Eredmények

Lökéshullámok áramlástana

A diagnosztikával kapott eredmények értelmezéséhez érdemes áttekintenünk gázok áramlásának néhány tulajdonságát.

A gázok áramlása a gyakorlatban a legtöbb esetben turbulens, azaz folyamatosan különböző skálájú örvények kavarognak benne. Minden gázban megállapítható egy (nyomás és hőmérséklet függő) hangsebesség, ami lényegében a részecskék közötti interakció karakterisztikus idejéből származik, ennél gyorsabban nem terjedhet a közegben hullám/információ. Ha ennél gyorsabban halad egy tárgy, az az előtt terjedő lökéshullámok egymásra torlódnak – hiszen nem terjedhetnek a hangsebességnél gyorsabban – és egy közös hullámfrontot alkotnak, és merőlegesen kezdenek el hangsebességgel távolodni a tárgytól, ezáltal egy kúp alakú lökéshullámot, más néven Mach-kúpot alkotva (lásd 15. ábra).

Ha a hangnál gyorsabban halad valahol a gáz egy áramlásban azt szuperszonikusnak nevezzük. Az ilyen áramlások csak lökéshullámok, azaz azonnali sebességváltozást okozó hullámfrontok segítségével tudnak irányt változtatni, hiszen az információ és a folytonos meredekségű sűrűség/irányváltoztatást okozó hullámok csak hangsebességgel tudnak bennük terjedni.



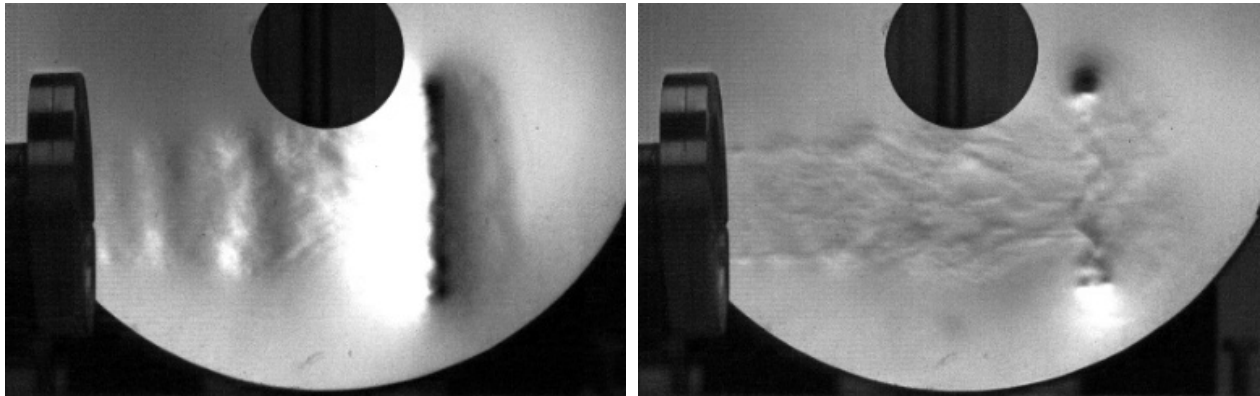
15. ábra. Schlieren-kép egy lövedékről és a körülötte lévő Mach-kúpról. Forrás: A. Davidhazy [11]

Mérések légkörbe nitrogénnel

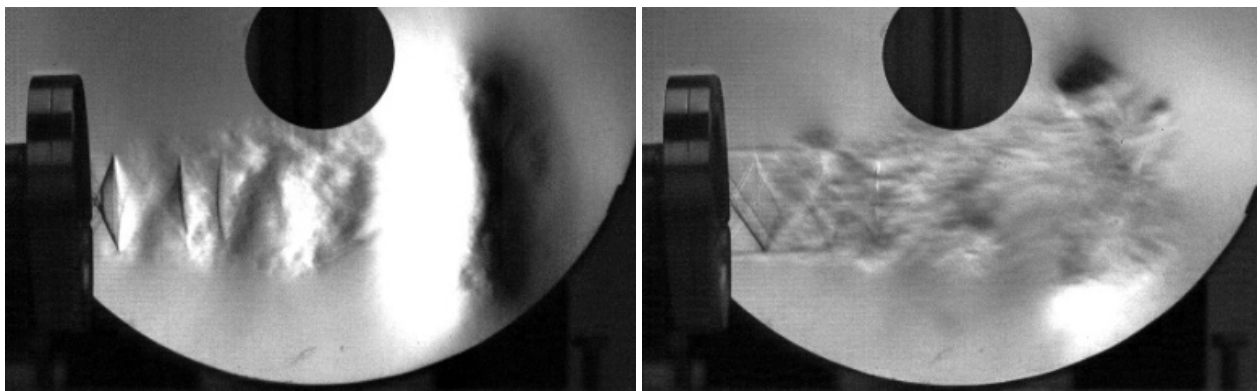
Először a képalkotás kipróbálására nitrogénnel töltöttük meg a szelepet, és 180 fokkal elforgatva azt a függőleges tengelye körül, szabad levegőre lőttünk vele a table-top elrendezést használva. Ehhez a méréshez egy másik, szintén $f=500$ mm-es lyukas tükröt használtunk, de a mérés alapvető geometriája nagyon hasonló volt a vákuum kamrába építettéhez, azzal a fő különbséggel, hogy itt a leképező rendszer optikai tengelye vízszintes volt. Elsősorban arra voltunk kíváncsiak, hogy működik-e a berendezés, láthatóvá tudjuk-e tenni a közeg áramlásait. Kifejezetten kíváncsiak voltunk, hogyan működik a kitakarás, illetve, hogy lesz-e elég fényintenzitásunk alacsony expozíciós idők mellett. A tükrök minden rá érkező fényt

a kitartásra fókuszál, utána pedig a kamerával minden áthaladó fényt begyűjtünk, így elég fénygazdag a rendszerünk.

Amikor 20 bar-ra töltött szelep mellett a szelepnyitó feszültséget változtattuk, először 700 V-nál nyílt ki, és ekkor először láttunk egy turbulens Rayleigh-Taylor instabilitást (füstkarika/gombafelhő áramlást, lásd 16. ábra), majd utána egy ideig folyamatos turbulens kiáramlást. Minden kísérletből csináltunk horizontális és vertikális kitakarással is méréseket, hogy különböző irányú sűrűséggradienseket is láthassunk.



16. ábra Szubszonikus kiáramlás 20 bar-on, 700V-on, függőleges (bal, #26) és vízszintes (jobb, #33) irányú kitakarásnál



17. ábra Szuperszonikus kiáramlás 20 bar-on, 900V-on, függőleges (bal, #28) és vízszintes (jobb, #31) irányú kitakarásnál

Ezután emeltük a szelep nyitófeszültségét 100V-onként, és 900V-nál Mach-gyémánt szerű struktúrákat láttunk a csőből kiáramló nitrogénben, majd előrébb megjelent a turbulens áramlás (17. ábra). Mivel Mach-gyémántok, és ilyen hirtelen lökeshullámok csak hangsebesség fölött jelennek meg, közvetlen bizonyítékunk van rá, hogy szuperszonikus volt az áramlás a cső torkolatánál. Hasonló lökeshullám struktúrákat mutat be van Dyke [12] (145. oldal, 241. ábra).

Ezen mérések elvégzése azért is fontos volt, hogy karakterizálni tudjuk a szelep által kiengedett gáz mennyiségét a nyitófeszültség függvényében. Amit láttunk, az összhangban van Réfy és társai megfigyelésével [4], miszerint a szelep nyitásakor egy nyomáshullám keletkezik, amelynek a maximum nyomása kb 3-szor nagyobb a szelepből kiáramló gáz egyensúlyi nyomásánál. Egy ilyen nyomás hullámmal letörhető a pellet a kilövőcső faláról, és a szelep gyors zárásával minimalizálható a gyorsításhoz szükséges gázmennyiség, ami az ITER dirupció hatás csökkentés szempontjából előnyös lenne.

Mérések hidrogénnel, pellet nélkül

A következőkben az SPI rendszerre telepített Schlieren diagnosztikával vizsgáltuk a rendszer szelepéből kiáramló hajtógáz dinamikáját. Ekkor már vákuumba lőttünk, és hidrogént használtunk, mint ahogyan a pellet gyorsítása esetén is. Erre azért volt lehetőség, mivel nem volt durranógáz-veszélyes a kísérlet, hisz nem volt oxigén a rendszerben.

Láttuk, hogy az áramló hidrogén felülik a pellet továbbhaladására szolgáló csövön (lásd 10. ábra jobb közepén, a tükör felett), és a Schlieren-képen is látható lökeshullámot kelt (18. ábra bal oldalt, a négyszög alakú fekete rész a cső, ahogy az kitakarja a tükörből visszaérkező fényt). Ez a lökeshullám a legkisebb szelep-nyitófeszültségeknél is megjelenik, tehát igen jó indikációja a gáz jelenlétének.



18. ábra. #64; 800 V-os szelep nyitási feszültség. Láthatóak a cső mentén kialakuló lökeshullámok (bal oldalt)

Ezen kívül megfigyeltünk hasonló Mach-gyémánt szerű struktúrákat (19. ábra), melyek folytonosan alakulnak ki, mintha a csövön fennakadó áramlás válna le a csőről, ahogy növekszik a gázáramlás, és tolódna hátrébb, Mach-gyémántot alkotva.

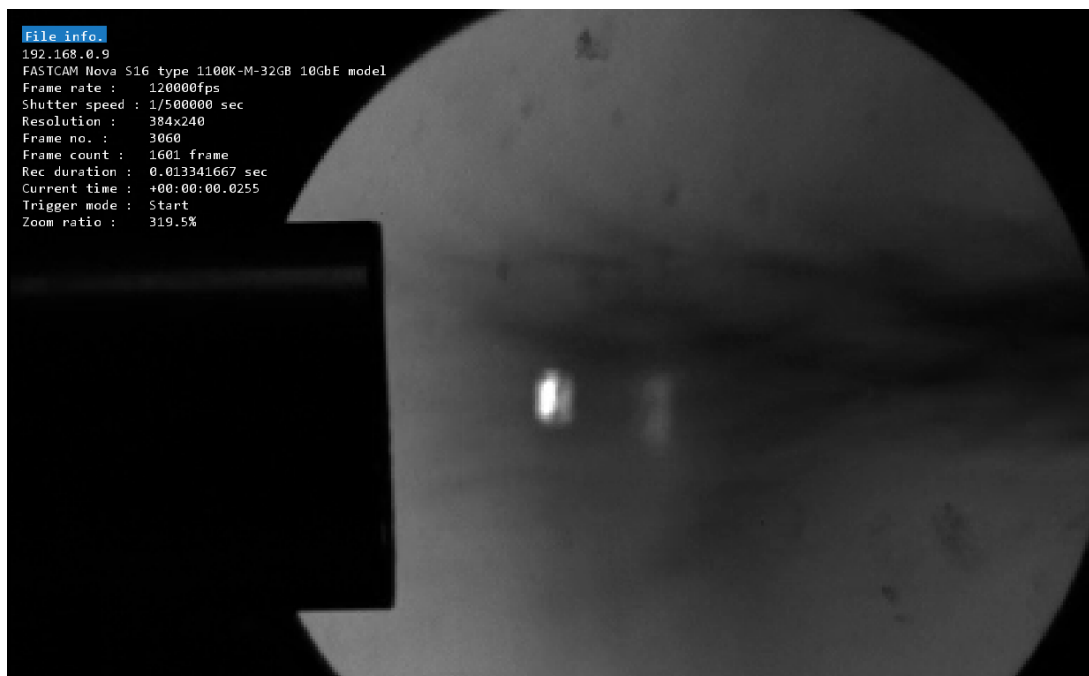


19. ábra. #64; 800 V-os szelep nyitási feszültség. Láthatóak a cső mentén kialakuló lökeshullámok és Mach-gyámánt képződmények (feketével kiemelve)

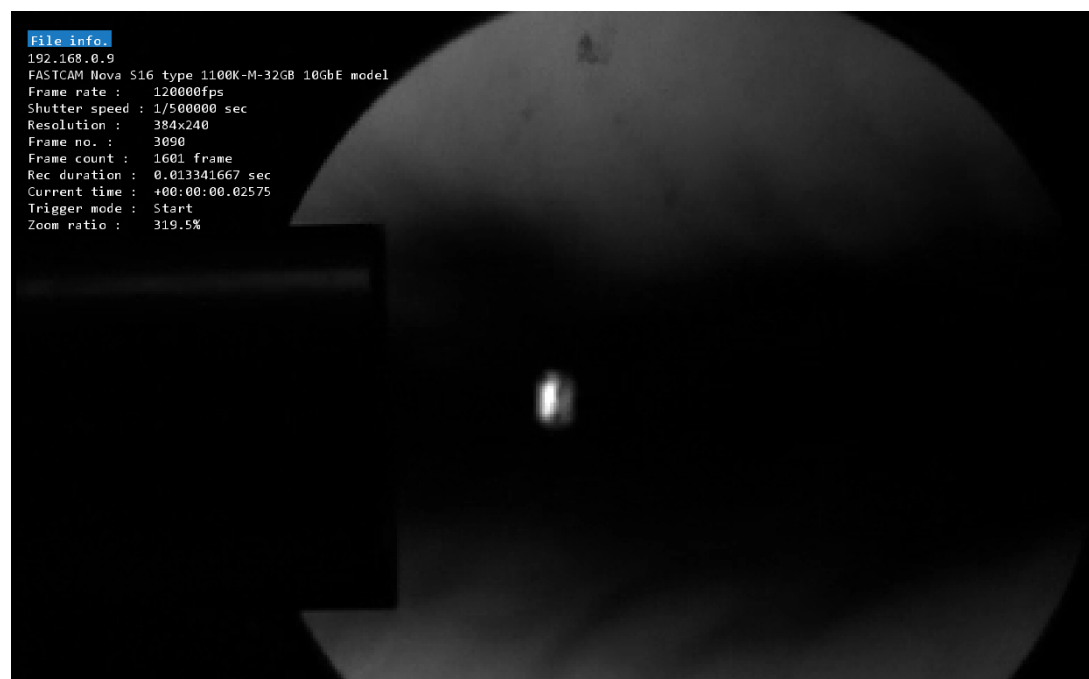
Mérések Hidrogénpellettel

Ezek után pedig lehetőségünk volt kipróbálni az üzembe helyezett diagnosztikát pelletekkel végzett kísérletek esetén is. A pelleték elég hasonlóak voltak, így a diagnosztika működőképességének szemléltetésére a továbbiakban ezen lövések közül választottunk ki egyet: a 361-es lövésszámú pellethez tartozót.

Először, a kamera indítása utáni 0.0255 mp-ben látható (21. ábra), hogy egy hidrogén-por felhő halad el a tükrök előtt. Ezt onnan tudjuk, hogy ez látható a shadowgraphy diagnosztikán is, ami csak a szilárd részecskék fény-eltakaró hatására érzékeny. Ezután a porfelhő sűrűsödik, majd elhalad.



21. ábra. Schlieren kép 0.0255 s-nél, látható a pelet előtti porfelhő, a pellet és anyaga jobbról balra halad.

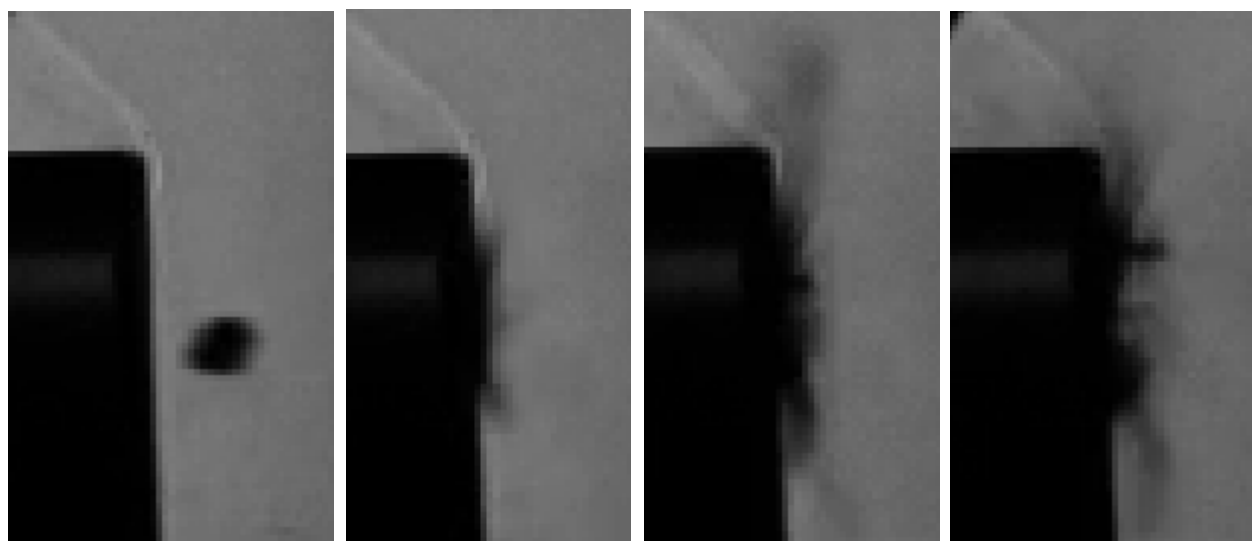


22. ábra A porfelhő folytatása, a cső körül látható a lökéshullám

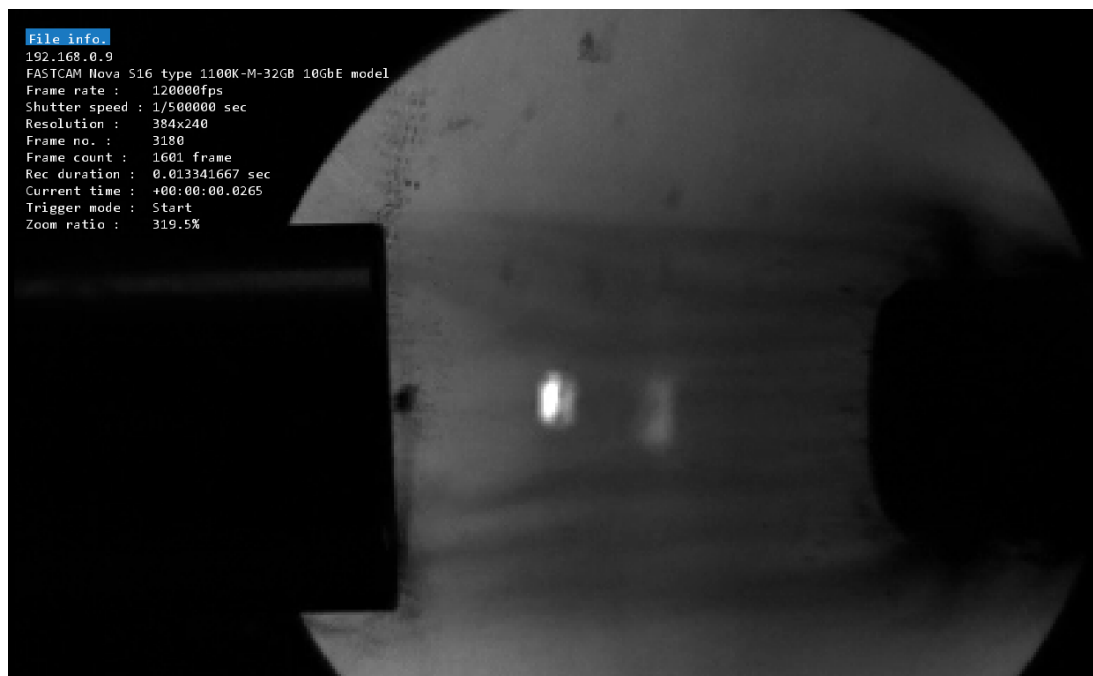
Miután a porfelhő elhaladt, kisebb-nagyobb pelletdarabok érik el a mérési teret (lásd 23. ábra). Ezek akkor keletkeznek, amikor a pellet letörik a falról, és a fal és a pellet közötti térrészből kis pellet fragmentumokat gyorsít a részben áramló gyorsítógáz. Ezen fragmentumok közül néhány becsapódik a bal oldalon látható cső falába (24. ábra), majd megérkezik a pellet maga (25. ábra).



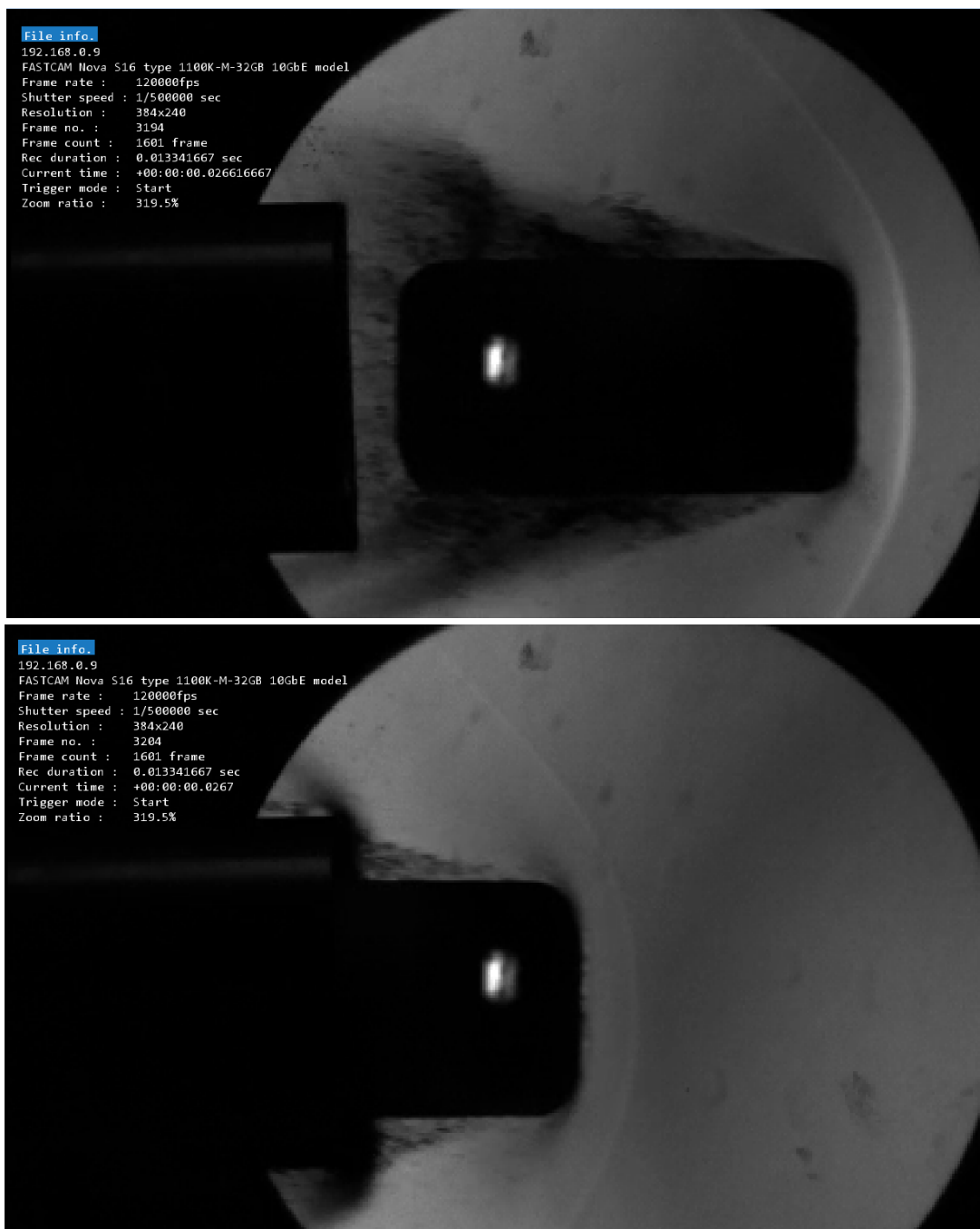
23. ábra Apró pellet darabok a Schlieren-képen, és a jól látható torok-lökéshullám



24. ábra Egy hidrogén pelletdarab becsapódása 0.0264 s körül, 1/120 ms lépésekben.



25. ábra. A pelletről leváló darabok és a képbe érkező pellet

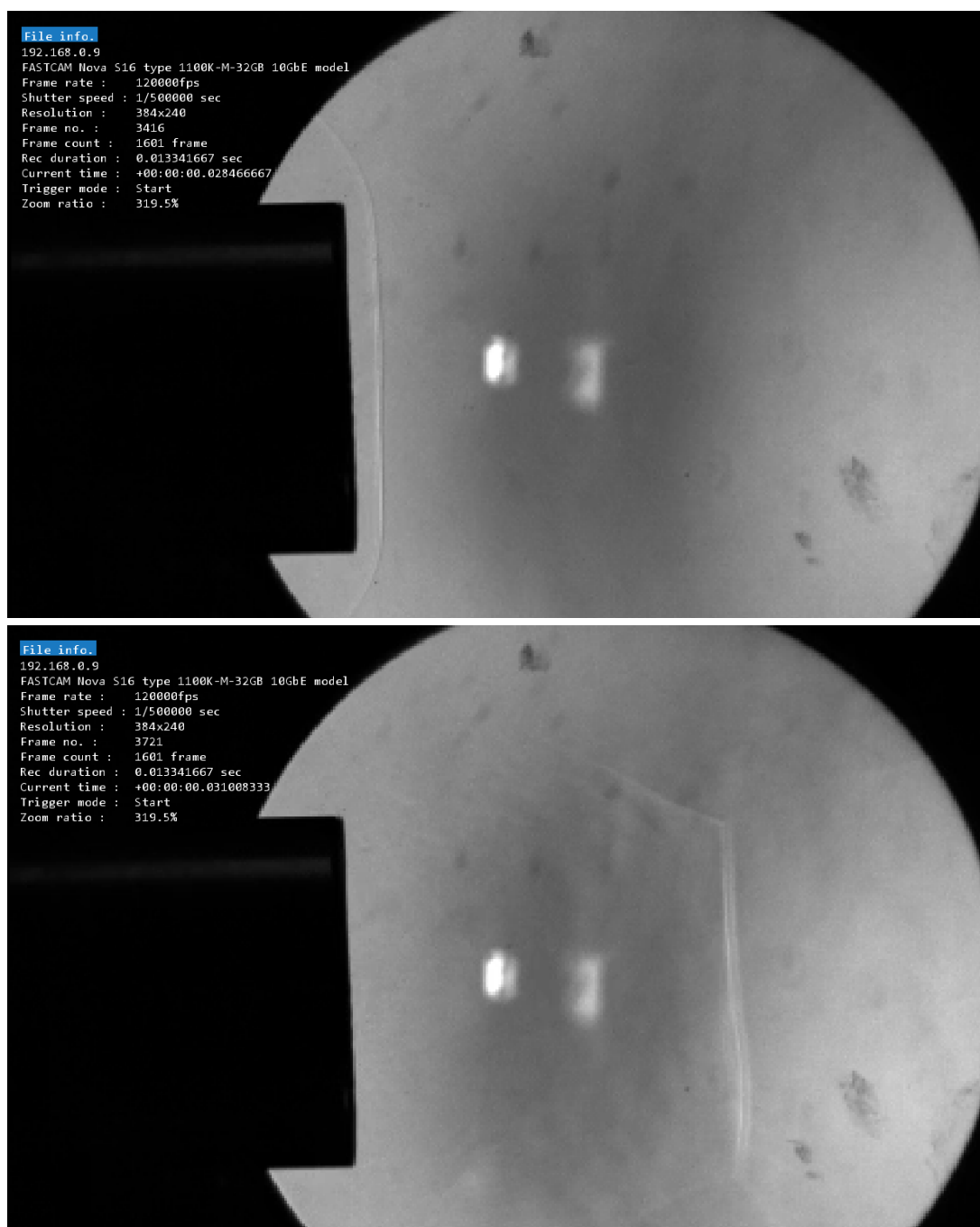


26. ábra Az elhaladó pellet és az azt gyorsító lökeshullám

A pellet áthaladása után már csak a hajtógáz hatását látjuk (26. ábra), és itt ugyanúgy megfigyelhetők hasonló cső-körüli lökeshullámok és Mach-gyémánt-szerű formák, mint ahogy azt a csak gázzal elvégzett kísérleteknél láttuk. Ezek nagyon jó indikációi a gáz jelenlétének, hiszen kis gáz-kiáramlású méréseknél is láttuk őket, és ha ezeket a teljes mérésen végig követjük, láthatjuk, hogy 0.02575 s-nél kezd látható lenni, ami direkt bizonyítéka annak, hogy akkor érkezik oda gáz halmazállapotú hidrogén.

Ezután a cső körüli lökeshullám egy ideig alábbhagy, és a pellet megjelenésével erősen visszajön, hisz azt a gázt lelassította a pellet gyorsítása. Ahogy a pellet elhalad, látható az őt gyorsító gáz lökeshulláma.

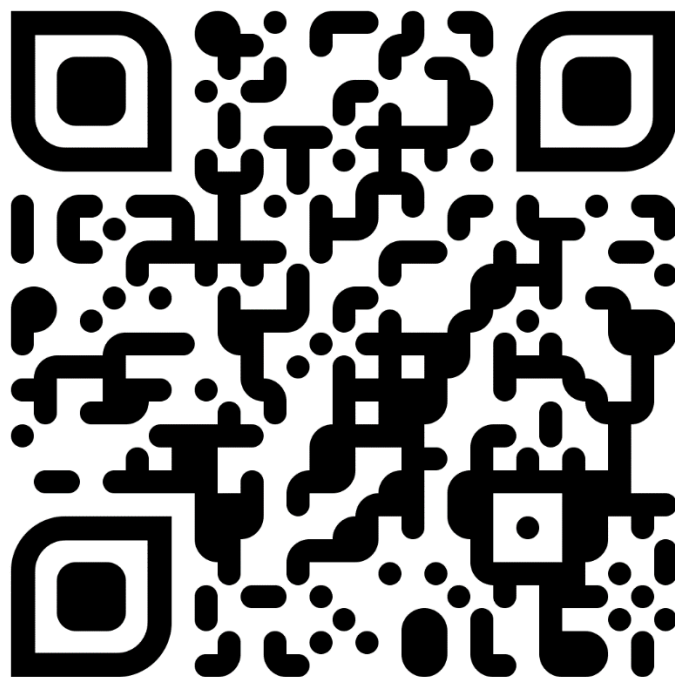
Miután elhaladt, a pelletet gyorsító hullám fennakad a csövön (27. ábra fent), majd leválik róla, és ahhoz hasonló, Mach-gyémánt szerű hullámot alkot, mint ahogy azt a pellet nélküli lövéseknél láttuk (lásd 27. ábra lent).



27. ábra A cső előtti lökeshullám a pellet elhaladása után, majd Mach-gyémánt szerű lökeshullámokat is látunk

A pellet elhaladása után még nagyjából 10 ms-ig látható a turbulens gázáramlás, ami annak a jele, hogy jelentős gázmennyiség halad a pellet mögött is. Ez a mérés az első direkt kísérleti bizonyíték a pellet mögött haladó gáz dinamikájáról.

A fent elemzett pelletkilövésről készült teljes Schlieren videó elérhető a https://youtu.be/q2748yN4N_8 linken, vagy a 28. ábrán.



28. ábra. Az elemzett pelletkilövés linkje

Összefoglalás

Munkám során megismertem a Schlieren képalkotás fő tulajdonságait, hogyan lehet vizualizálni gázok sűrűségváltozásait, illetve megismertem a ITER DMS Support Laboratory projekt keretében az EK-ban fejlesztett hidrogén tört pellet belövő (SPI) rendszert. Először egy asztali Schlieren elrendezésben vizsgáltam a mérési összeállítás tulajdonságait, majd az SPI kísérlet gyorsszelepeének vizsgálatára telepítettem egy Schlieren diagnosztikát. A szelepet légköri nyomásra nyitva vizsgáltam az abból kiáramló gáz dinamikáját, és megfigyeltem szuperszonikus és szubszonikus áramlásokat is. Az SPI vákuumrendszerbe megterveztem és felépítettem egy Schlieren diagnosztikát, mellyel először pellet nélküli gáz lövéseket vizsgáltam, és itt is megfigyeltem mind turbulenciát, mind lökéshullámokat, köztük Mach-gyémántokra hasonlókat. Végül az SPI rendszerbe integrált diagnosztikaként hidrogén pelletet is vizsgáltam. Megfigyeltem a pellet különböző méretű szilárd fragmentumait illetve a pelletet magát, és a pellet elhaladása után lökéshullámokat, köztük az előzőekben látott Mach-gyémántokra hasonló hullámokat is. A cső körüli lökéshullám látható igen alacsony áramlásoknál is, így jó indikátor a gáz jelenlétére, és a segítségével megállapítottam, hogy a gáz nem előzi meg a szilárd hidrogendarabokat, de azok így is a pellet előtt érkeznek. Megállapítottam továbbá, hogy a pellet érkezése után még nagyjából 10 ms-ig jelentős gázáramlás figyelhető meg. Ez egy nagyon fontos információ az ITER-nek, mivel ez azt jelenti, hogy bár a gáz itt a pellet mögött halad, de a nagyjából 10 méteres repülési csőben megelőzheti azt, így előbb érve a plazmába a hajtógáz maga indíthatja el a plazma diszrupcióját, amit mindenképpen el kell kerülni.

További tervek között szerepel a rendszer nyomáskalibrációja alapján a fenti kvalitatív megfigyeléseken felül kvantitatív vizsgálatok elvégzése.

Az SPI rendszeren a pellet törése előtt közvetlenül is van lehetőség a pellet körüli áramlás megfigyelésére, mivel a repülési csővön keresztül lehet nézni egy ablakpáron. Erre az ablak párra tervezünk egy második Schlieren diagnosztikát telepíteni, melyre már kész terveink vannak, és mellyel az esetleges pellet előtt haladó gáz dinamikája megfigyelhetővé válik, további kritikus információkat szolgáltatva ezzel az ITER diszrupciók elkerüléséhez.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni a segítséget volt témavezetőmnek Pokol Gergőnek, hogy bevont a fúzió világába, Zoletnik Sándornak és az EK-s fúziós labornak, a szakmailag és szociálisan is remek környezetért, és témavezetőmnek Réfy Dánielnek, hogy meglátta az ötletemben a lehetőséget, szorgalmazta és végig támogatta a Schlieren diagnosztika telepítését, és a mérnök kollégáknak, akik a megvalósításban rengeteget segítettek.

Hivatkozások

- [1] L.R. Baylor et al, „Shattered pellet injection technology design and characterization for disruption mitigation experiments,” *Nucl. Fusion*, 59 066008, 2019.
- [2] A. Hassanein és V. Sizyuk, „Potential design problems for ITER fusion device,” *Scientific Reports vol. 11*, 2021.
- [3] A. Kómár, G. Pokol és T. Fülöp, „Elfutó elektronok és fűtőlő hullámok kölcsönhatása tokamak plazmákban,” *Nukleon*, 2012.
- [4] D. I. Réfy, S. Zoletnik és társai, „Instrumented Fast Valve for the ITER DMS Support Laboratory test bench,” in *SOFT conference, to be submitted to FED.*, 2022.
- [5] E. Walcz et al, „Development of a Shattered Pellet Injector Test Bench for the ITER DMS Support Laboratory,” in *SOFT conference, to be submitted to FED.*, 2022.
- [6] S. Zoletnik et al, „Shattered pellet technology development in the ITER DMS test laboratory,” in *SOFT conference, to be submitted to FED.*, 2022.
- [7] G. S. Settles, *Schlieren and Shadowgraph Techniques*, 2001.
- [8] H. Jebsen-Marwedel, „"Schlieren" als Wort, Gebilde und Begriffe,” *Glastechnische Berichte* 33(12), pp. 475-477, 1960.
- [9] M. Vavrik és G. Vári, „Schlieren képalkotás okostelefonnal,” *Fizikai szemle*, pp. 278-281, 2022.
- [10] M. J. Hargather és G. S. Settles, „A comparison of three quantitative schlieren techniques,” *Optics and Lasers in Engineering*, pp. 8-17, 2012.
- [11] A. Davidhazy, „High Speed, Schlieren and Photoinstrumentation Photographs,” <http://www.davidhazy.org/andpph/photofile-b/schlieren-bw-2002-bullet-2.jpg>, 2002.
- [12] M. van Dyke, *An Album of Fluid Motion*, 1982.