

# **DEUTÉRIUMJÉG PELLETEK ÉS FORRÓ PLAZMA KÖLCSÖNHATÁSÁNAK VIZSGÁLATA**

**PhD téziszfüzet**

**SZEPESI TAMÁS**

**Témavezető:**

**Dr. KOCSIS GÁBOR  
MTA KFKI-RMKI**

**Tanszéki konzulens:**

**Dr. SÜKÖSD CSABA  
BME NTI**

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM  
NUKLEÁRIS TECHNIKAI INTÉZET  
MTA KFKI – RÉSZECSCSKE- ÉS MAGFIZIKAI KUTATÓINTÉZET  
2009**

## A kutatások előzménye

A jövőbeli magfúziós erőművek és kísérleti berendezések, mint pl. az ITER [ITER, 1999] tervezett alapvető üzemiállapota az ún. I-es típusú ELM-es H-mód [Aymar, 2002], amelyet 1982-ben fedeztek fel az ASDEX tokamakokon [Wagner 1982]. Az üzemiállapot kiváló reaktorparaméterekkel rendelkezik, ugyanakkor a benne periodikusan fellépő instabilitások (ún. *Edge Localised Mode*-ok, ELM-ek [Zohm 1996]) megfelelő kezelése létfontosságú a berendezés épségének megőrzése miatt. Az ELM-ek alatt a plazmából kilökődött energia mennyisége fordítottan arányos az ELM-gyakorisággal [Herrmann 2002], azaz az ELM-ek által okozott terheléseket csökkenteni lehet a gyakoriság növelésével.

Az ELM-gyakoriság növelésének ígéretes módja az ún. ELM-ütemezés üzemanyag pelletekkel. Kísérletek során megfigyelték, hogy H-módú plazmába belőtt minden pellet a belövése után azonnal (1 ms-on belül) ELM-et triggerel [Lang 1996, Baylor 2001], tehát elegendően magas pelletbelövési gyakoriság alkalmazásával átvehetjük az ELM-ek fölötti irányítást. A megfigyelések szerint az ELM-gyakoriságot legalább a természetes gyakoriság másfélszeresére növelve már csak triggerelt ELM-ek lépnek fel, azaz az ELM-ek gyakoriságát teljes mértékben a pelletekkel állíthatjuk be [Lang 2005].

A jelenlegi kísérletekben a problémát az jelenti, hogy a mai tokamakok esetében egyetlen pellet anyagmennyisége közel egyenlő a teljes fúziós plazma anyagmennyiségével, ezért a gyakori pelletbelövés a plazma üzemiállapotának jelentős változásához vezet. A kutatások egyik célja ennek megfelelően az ELM-triggerelésre használt pelletek méretének csökkentése, amire jó példa a németországi Institut für Plasmaphysik (IPP Garching) Pellet csoportjának pelletbelövő-fejlesztése [Lang 2007], amelynek célja 1 mm<sup>3</sup> alatti pelletek készítése, és ezekkel legalább 80 Hz belövési gyakoriság elérése.

Az ELM-csillapítás alapjául szolgáló ELM-triggerelés mechanizmusa azonban jelenleg csak korlátozottan ismert és megértett folyamat. Tisztázásra vár az ELM-et kiváltó perturbáció azonosítása, jellegzetességeinek meghatározása – ezek elengedhetetlenül fontosak ahhoz, hogy egy jövőbeli reaktorban az ELM-triggereléshez szükséges pellet-paramétereket megbecsülhessük. Az I-es típusú ELM-eket kiváltó perturbációról az IPP Garching által üzemeltetett ASDEX Upgrade (AUG) tokamakokon végzett kísérletek alapján meghatározták, hogy a pellet (a perturbáció forrása) az ELM-mé növekvő perturbáció keletkezésekor kb. a pedesztál közepén található, míg maga az ELM 50  $\mu$ s-mal később („belső késleltetés”) detektálható [Kocsis 2007]. Megfigyelték még, hogy a pellet által okozott perturbáció függ a pellet pozíciójától, ezért a perturbációt a pelletpálya mentén kell vizsgálni.

## Célkitűzések

Kutatási munkám során három, egymással szorosan összefüggő témába kapcsolódtam be, amelyeket az MTA KFKI-RMKI-ban és EURATOM együttműködés keretében az IPP Garchingban végeztek: az új pelletbelövő („Blower-gun”) beüzemelése és üzemi paramétereinek optimalizálása; a pelletek plazmabéli mozgásának tanulmányozása; az ELM-triggerelés és az ELM-et kiváltó perturbáció vizsgálata.

Az Blower-gun első „éles” eredményei (a labortesztek sikere ellenére) igen lesújtóak voltak, szinte egyetlen pelletet sem tudott eljuttatni a plazmába. A hiba azonosítására a német pellet csoport egy, a pelletek repülés közbeni fotózására alkalmas ún. árnyképdiagnosztika-rendszer használata mellett döntött. Feladataim ebben a témában a következők voltak:

- egy régebbi árnyképdiagnosztika-rendszer modernizálása digitális kamerákkal;
- az új diagnosztika kialakítása, üzembe helyezése és üzemeltetése;

- a diagnosztika felvételei alapján a pelletek tömegének becslése;
- a pellettömeg alapján a belövő paramétereinek optimalizálása (a plazmába eljutó pelletek tömegének maximalizálása).

A munkám későbbi szakaszában a pelletek plazmabeli dinamikáját vizsgáltam, ami a pelletek által okozott sűrűség-növekedés és a pelletek behatolási mélysége miatt fontos. A mérési eredményeket pelletablációs modellek validálására használtam fel. A feladataim a következők voltak:

- a már meglévő AUG pelletkamera-rendszer bővítése további két kamerával és három nézettel;
- az AUG pelletkamera-rendszer üzemeltetése és rendszeres karbantartása;
- a pelletek plazmabeli pályájának, pályamenti sebességének és gyorsulásának meghatározása kamerafelvételek alapján (mindkét pelletbelövővel);
- egy modell kidolgozása a pelletek radiális gyorsulásának leírására, és a modell validálása a mérési eredmények alapján.

Munkám utolsó szakaszában a plazma pelletbelövésre adott reakcióját vizsgáltam, figyelmemet ezen belül a pellet által keltett mágneses perturbációra koncentráltam. Célom annak meghatározása volt, hogy a pellet által keltett mágneses perturbáció lehet-e a triggerelt ELM-ek kiváltó oka. Feladataim a következők voltak:

- a pellet által keltett mágneses perturbáció „erősségének” leírására alkalmas mennyiség definiálása;
- a pellet által keltett mágneses perturbáció tulajdonságainak vizsgálata három különböző plazma-üzemállapotban;
- a III-as típusú ELM-ek triggerelésének vizsgálata (a belső késleltetési idő és a pellet pozíciójának meghatározása az ELM-triggerelés pillanatában).

A felsorolt pontokból látható, hogy munkám mérnöki-technikai, módszertani és tudományos elemeket egyaránt tartalmaz, amelyek közül az utóbbit igyekeztem leginkább kiemelni, a többit pedig az érthetőség szolgálatába állítani. Továbbá, a kamerarendszerek üzemeltetése, a felvételek és az egyéb mérési adatok feldolgozása igen jelentős programozói munkát is kívánt, amelyből azonban a felhasznált algoritmusok ismertetésére szorítkoztam (a reprodukálhatóság biztosítására).

## Vizsgálati módszerek

A munkám során használt módszerek közül elsőnek a pelletekről készült kamerafelvételek kiértékelése (kalibrálása) érdemel szót. Egy kameraképet akkor tekintek kalibráltnak, amennyiben létezik hozzá egy transzformáció, amellyel a képen látható valós szerkezeti elemek koordinátáit a képen a megfelelő helyre tudom vetíteni. Ez a transzformáció megfordítható, azaz a képen látható tárgyak valós térbeli koordinátája meghatározható, ha ehhez elegendő plusz információval rendelkezünk. A pelletek pályájának meghatározásához ez a kiegészítő információ az volt, hogy a pellet egy rögzített poloidális síkban mozog, azaz a toroidális elmozdulása elhanyagolható. A kameraképek alapján határoztam meg a pelletek pályáját, behatolási mélységét és pályamenti gyorsulását.

Az árnykép-diagnosztika felvételeinek elemzéséhez, a pellettér fogat becsléséhez Bayes-féle valószínűségi analízist használtam. A módszerem alapfeltevése, hogy a pellet mindig henger alakú marad – ezáltal egyetlen árnyképből megbecsülhetjük a pellet térfogatát (és tömegét). Az árnykép három paramétere alapján meghatároztam a pellet sugarának, magasságának és irányultságának (a feltételezett henger alapjának irányvektora) valószínűségi sűrűségfüggvényét. Ebből kiszámítottam a térfogat valószínűség-eloszlását, aminek várható értékét vettem végeredménynek.

Ahhoz, hogy a pellet által a pályája mentén keltett perturbációkat más diagnosztikákkal kiegészítve is tudjuk vizsgálni, a pellet pályáját az idő függvényében kell ismernünk. Ehhez legalább egy időpillanatban ismernünk kell a pellet pozícióját – ez a referencia-pont a pellet szeparátrix-on való áthaladásának helye és ideje. Ennek meghatározásához speciális kamerafelvételeket használtam: a pelletről (már a plazmában!) nagyon rövid expozíciós idejű felvételt készítettem; meghatároztam a pellet helyét, majd a kép készítése előtti pályaszakaszon egyenes vonalú egyenletes mozgást feltételezve meghatároztam a szeparátrix-metszéspont helyét. A pelletsebesség és a kamerakép készítésének ideje ismeretében ezek alapján kiszámolható a szeparátrix-áthaladás ideje.

A pellet által keltett mágneses perturbáció vizsgálata során a perturbáció erősségének jellemzésére bevezettem az ún. burkológörbét és sávteljesítményt. A burkológörbe előállításához a vizsgált jelre először egy felüláteresztő szűrőt alkalmaztam, majd 25  $\mu$ s-os ablakokban meghatároztam a jel maximális  $V_{pp}$  értékét. A sávteljesítményt a jel Fourier-spektrumjából állítottam elő úgy, hogy a 100 és 300 kHz közötti frekvenciatartományban integráltam a teljesítménysűrűséget. Az adott frekvenciatartomány és a felüláteresztő szűrő használata azért szükséges, mert az általam vizsgált jelenségek ebben a tartományban jelentkeznek a legerőteljesebben; a 100 kHz alatti frekvenciákon sok más plazmajelenség lenyomata figyelhető meg, amelyek zavarnák a megfigyelést.

A mágneses perturbáció további érdekes tulajdonsága az ún. módusszám. Tokamakokban a plazmamódusokat önmagukba záródó hullám alakban szokták feltételezni; a toroidális ill. poloidális módusszám a hullám maximumhelyeinek számát jelenti egy toroidális ill. poloidális körbefutás alatt. A módusszám előjelével a hullám haladási irányát szokták jellemezni; dolgozatomban a pozitív módusszám az elektron drift irányában haladó módusokat jelenti. A módusszám meghatározása több mágneses szonda jelének egyidejű elemzésével lehetséges. A módszer lényege, hogy az egyes szondák jelei közötti fáziseltérést a szondák közötti távolság (szög!) függvényében ábrázolva (koherens módus esetén) a pontok egy egyenesre esnek, amelynek meredeksége adja a módusszámot. A feldolgozó és kiértékelő rutinokat Pokol Gergő valósította meg, és alkalmazta a módusszámok meghatározásához.

## Új tudományos eredmények

A PhD munkám során elért új eredményeket az alábbi tézispontokban foglalom össze:

1. Összehasonlítottam a *pellet által keltett mágneses perturbációkat* három különböző típusú plazma esetén a pelletpálya mentén abból a célból, hogy megállapítsam, lehet-e a pellet által keltett mágneses perturbáció az I-es típusú ELM-ek kiváltó oka.
  - Ennek során megállapítottam, hogy a pellet Alfvén hullámokat gerjeszt a plazmában, amelyek *szerkezete* (módusszáma) alapvetően eltér az ELM előtt észlelhető módusok és az ELM-ek szerkezetétől. Ebből arra következtettem, hogy a pellet által keltett mágneses perturbáció nagy valószínűséggel nem lehet az ELM kiváltó oka. (A disszertáció 4.3.2. alfejezete.) [3] [4] [5] [8] [9] [12]
  - Megállapítottam, hogy a pellet által keltett mágneses perturbáció erőssége a pellet pillanatnyi plazmabeli pozíciójában vett plazmaparaméterektől függ. A plazma elektronnyomása függvényében ábrázolva a perturbáció erőssége az összes vizsgált plazmakisülésben ugyanarra a görbére esik. (A disszertáció 4.3.2. alfejezete.) [3] [5] [8] [9] [12]

2. Meghatároztam a *III-as típusú triggerelt ELM-ek késési idejét* a pelletbelövés időpontjához képest a pelletsebesség függvényében. Azt találtam, hogy – az I-es típusú ELM-ekhez hasonlóan – a pelletnek a plazma egy adott pontjára el kell jutnia, hogy az okozott perturbáció kiválthassa az ELM-et. Ez a trigger pont a pedesztálban található, ami beleillik az ELM-ek jelenlegi elméletébe. (A disszertáció 4.3.3. alfejezete.) [3]
3. Kísérletileg és elméletileg is vizsgáltam a *pelletek plazmabeli radiális gyorsulását* a pelletpálya mentén. Ennek kapcsán a következő tudományos eredményeket értem el:
  - A radiális gyorsulás leírására létrehoztam egy *egyszerű modellt*, amelyben a gyorsulást a pellet aszimmetrikus ablációja okozza („aszimmetrikus modell”). A kísérletekben mért gyorsulás reprodukálásához minden vizsgált esetben elegendő volt 10% alatti aszimmetria – ez az érték elég alacsony ahhoz, hogy megmagyarázza, miért látszik szimmetrikusnak a pelletfelhő (az ablációval közel arányos) fénye a kameraképeken. (A disszertáció 4.2.3. alfejezete.) [2] [6] [7] [13]
  - Összehasonlítottam a pelletek *behatolási mélységét* és pályamenti *radiális gyorsulását* a *mért és szimulált eredmények* alapján. Bár a modell nagyságrendileg jól visszaadja a kísérletekben mért radiális gyorsulás mértékét, a behatolási mélységben számottevő eltérést tapasztaltam. Jó egyezést csak a 600 m/s sebességű pelletekre kaptam, a lassabb pelletekre alul-, a gyorsabbakra túlbecsülte a modell a behatolást. (A disszertáció 4.2.4. alfejezete.) [2] [7]
4. Az elvégzett kísérletek támogatására az alábbi, fizikai és kísérleti ismereteket is felhasználó eljárásokat dolgoztam ki:
  - A Bayes-módszer alkalmazásával kidolgoztam egy olyan eljárást, ami egyetlen kétdimenziós képfelvétel alapján automatikusan *megbecsüli egy henger alakú pellet térfogatát*. A módszert a Blower-gun pelletbelövő üzemi paramétereinek optimalizálására használtam fel. (A disszertáció 4.1. alfejezete.) [1]
  - Kidolgoztam egy eljárást, amellyel egy „hagyományos” kamerafelvétel alapján *meghatározható a pellet pályája, behatolási mélysége, pályamenti radiális gyorsulása és a szeparátrixon való áthaladás ideje*. A módszert mind a három fenti tézispont eredményeinek eléréséhez használtam. [6] [13] Összehasonlítottam továbbá az így kapott behatolást a pellet élettartamából és névleges sebességéből kapható behatolási mélységgel. Megállapítottam, hogy ez utóbbi számottevően elmarad a valós behatolástól a HFS felől belőtt pelletekre, mert a módszer nem veszi figyelembe a pellet radiális gyorsulását. (A disszertáció 4.2.1. alfejezete.) [10] [11]
  - Kidolgoztam egy eljárást, amely egy tetszőleges ablációs ráta skálatörvényt felhasználva *megbecsüli a pellet tömegét* a mért pelletpálya és a plazmaparaméterek alapján. A módszer használatával meghatározható a 3. tézispontban bevezetett ablációs aszimmetria *a pelletpálya mentén*. Azt az eredményt kaptam, hogy a plazmabeli pálya mentén az aszimmetria jó közelítéssel állandó, ami igazolja az aszimmetrikus modellben állandónak feltételezett aszimmetria használatát. (A disszertáció 4.2.5. alfejezete.) [6] [13]

## Irodalmi hivatkozások listája

- ITER Physics Expert Groups et al, Nucl. Fusion **39**, 2137 (1999)
- R. Aymar et al, Plasma Phys. and Control. Fusion **44**, 519 (2002)
- F. Wagner et al, Phys. Rev. Lett. **49**, 1408 (1982)
- H. Zohm, Plasma Phys. Control. Fusion **38**, 105 (1996)
- A. Herrmann et al, Plasma Phys. and Control. Fusion **44**, 883 (2002)
- P. T. Lang et al, Nucl. Fusion **36**, 1531 (1996)
- L. R. Baylor et al, J. of Nucl. Materials **290-293**, 398 (2001)
- P. T. Lang et al, Nucl. Fusion **45**, 502 (2005)
- P. T. Lang et al, Rev. Sci. Instrum. **78**, 023504 (2007)
- Kocsis G. et al, Nucl. Fusion **47**, 1166 (2007)
- Kocsis G. et al, Rev. Sci. Instrum **75**, 4754 (2004)
- P. B. Parks, Nucl. Fusion **32**, 2137 (1992)
- J. Neuhauser et al, Nucl. Fusion **48**, (2008) 045005

## Az eredmények hasznosítása

A Blower-gun pelletbelövőhöz kiépített árnyképdiagnosztika-rendszer (és a hozzá tartozó pellettömeg-becslő eljárás) nagymértékben segíti a belövő továbbfejlesztését. Napjainkban az 1 mm átmérőjű és 1-1,5 mm hosszúságú pelletek előállítása kísérleti stádiumban van; az árnykép-diagnosztikai felvételeken azonnal nyomon követhető a belövő minden változtatásának hatása a pelletek méretére és sebességére, ami által az optimális működési paraméterek feltérképezése lényegesen gyorsabb és biztosabb.

A pellet által keltett perturbáció vizsgálata során arra a következtetésre jutottam, hogy az I-es típusú ELM-et nem a pellet mágneses perturbációja okozza. Ezen felfedezés következtében az ELM-et kiváltó perturbáció keresése újabb irányt vett, jelenleg a pellet által okozott hülési hullám és a nagynyomású pelletfelhő, mint kiváltó okok vizsgálata folyik.

# A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

## Folyóiratcikkek

- [1] T. Szepesi, S. Kálvin, G. Kocsis, P.T. Lang, C. Wittmann and ASDEX Upgrade Team  
*Volume measurement of cryogenic deuterium pellets by Bayesian analysis of single shadowgraphy images*  
Rev. Sci. Instrum. **79** (2008) 033501
- [2] T. Szepesi, S. Kálvin, G. Kocsis, P.T.Lang, I. Senichenkov and ASDEX Upgrade Team  
*Comparison of pellet acceleration model results to experimentally observed penetration depths*  
Journal of Nuclear Materials **390-391** (2009) 507
- [3] T. Szepesi, S. Kálvin, G. Kocsis, K. Lackner, P.T.Lang, M. Maraschek, G. Pokol, G. Pór and ASDEX Upgrade Team  
*Investigation of pellet-driven magnetic perturbations in different tokamak scenarios*  
Plasma Physics and Controlled Fusion, elfogadva (2009. szeptember 22.)
- [4] P.T. Lang, K. Lackner, B. Alper, K. Gál, J. Hobirk, A. Kallenbach, G. Kocsis, M. Maraschek, C.P. Perez von Thun, W. Suttrop, T. Szepesi, R. Wenninger, H. Zohm, ASDEX Upgrade Team and JET-EFDA contributors  
*Investigation of pellet-triggered MHD events in ASDEX Upgrade and JET*  
Nuclear Fusion **48** (2008) 095007
- [5] Szepesi T., Kálvin S., Kocsis G., K. Lackner, P. T. Lang, M. Maraschek, Pokol G., Pór G., ASDEX Upgrade Team  
*Pelletek által keltett mágneses perturbációk vizsgálata fúziós plazmakísérletekben*  
Nukleon **2** (2009) 48

## Teljes terjedelemben megjelent konferenci cikkek

- [6] T. Szepesi, S. Kálvin, G. Kocsis, P.T. Lang and ASDEX Upgrade Team  
*Radial acceleration of solid hydrogen pellets in hot tokamak plasmas*  
EPS 34<sup>th</sup> Conference on Plasma Physics, Varsó, Lengyelország, 2007, poszter  
Europhysics Conference Abstracts **31F** (2007), P-4.037
- [7] T. Szepesi, S. Kálvin, G. Kocsis, P.T.Lang, I. Senichenkov and ASDEX Upgrade Team  
*Increased pellet penetration depth by pellet acceleration in hot tokamak plasmas*  
18<sup>th</sup> International Conference on Plasma Surface Interactions, Toledo, Spanyolország, 2008, poszter P2.64
- [8] G. Kocsis, A. Aranyi, V. Igochine, S. Kálvin, K. Lackner, P.T. Lang, M. Maraschek, V. Mertens, G. Pokol, G. Pór, T. Szepesi and ASDEX Upgrade Team  
*Investigation of pellet-driven plasma perturbations for ELM-triggering studies*  
35<sup>th</sup> EPS Plasma Physics Conference, Hersonissos, Kréta, Görögország, 2008, poszter  
Europhysics Conference Abstracts **32D** (2008), P-2.070

- [9] Szepesi T., Kálvin S., Kocsis G., K. Lackner, P.T. Lang, M. Maraschek, Pokol G., Pór G.  
*Pelletek által keltett mágneses perturbáció vizsgálata*  
VII. Nukleáris Technikai Szimpózium, Budapest, 2008, előadás

### **Egyéb konferencia-kiadványok (csak absztrakt)**

- [10] T. Szepesi, É. Belonohy, S. Kálvin, G. Kocsis, K. Gál, P. T. Lang, ASDEX Upgrade Team  
*Determining Pellet Penetration Depth in ASDEX Upgrade Plasmas using Video Observation*  
DPG Frühjahrstagung, Augsburg, Németország, 2006, poszter P4.6
- [11] Szepesi T., Kálvin S., Kocsis G., P.T. Lang, ASDEX Upgrade Team  
*Determining pellet penetration depth in ASDEX Upgrade using video diagnostics*  
Hungarian Plasma Physics Workshop, Visegrád, 2006, előadás
- [12] T. Szepesi, S. Kálvin, G. Kocsis, P.T.Lang and ASDEX Upgrade Team  
*Investigation of pellet-driven plasma perturbations as trigger events for ELM instabilities*  
Hungarian Plasma Physics and Fusion Technology Workshop, Győr, 2008, előadás
- [13] Szepesi T., Kálvin S., Kocsis G., Lang P.T. and ASDEX Upgrade Team  
*Investigation of the ELM triggering mechanism*  
10th Workshop on Electric Fields, Structures and Relaxation in Plasmas, Varsó, Lengyelország, 2007, előadás

### **További tudományos közlemények**

- [14] G. Kocsis, J. A. Alonso, B. Alper, G. Arnoux, G. Cseh, J. Figueiredo, D. Frigione, L. Garzotti, J. Hobirk, S. Kálvin, M. Lampert, P.T. Lang, G. Petravich, T.Szepesi, R. Wenninger, ASDEX Upgrade Team and JET-EFDA contributors  
*Pellet cloud distribution and dynamics for different plasma scenarios in ASDEX Upgrade and JET*  
36<sup>th</sup> EPS Conference on Plasma Physics, Szófia, Bulgária, 2009. június 29 - július 3., poszter
- [15] G. Kocsis, A. Aranyi, V. Igochine, S. Kálvin, K. Lackner, P.T. Lang, M. Maraschek, V. Mertens, G. Pokol, G. Pór, T. Szepesi and ASDEX Upgrade Team  
*Investigation of pellet-driven plasma perturbations for ELM triggering studies*  
Satellite Workshop of the 35th EPS Plasma Physics Conference on Fuelling of Magnetic Confinement Machines, Hersonissos, Kréta, Görögország, 2008. június 16-17., előadás
- [16] Kocsis G., Kálvin S., Lang P.T., Maraschek M., Schneider W., Szepesi T., ASDEX Upgrade Team  
*Spatio-temporal investigations on the triggering of pellet induced ELMs*  
Nuclear Fusion **47** (2007) 1166



- [17] P. T. Lang, P. Cierpka, C. Dorner, K. Gál, J. Harhausen, S. Kálvin, G. Kauke, G. Kocsis, J. Neuhauser, J. Sárközi, T. Szepesi, C. Wittmann, ASDEX Upgrade Team  
*Cryogenic pellet launcher adapted for controlling of tokamak plasma edge instabilities*  
Review of Scientific Instruments **78** (2007) 023504
- [18] P.T. Lang, P. Cierpka, J. Harhausen, M. Kaufmann, J. Neuhauser, C. Wittmann,  
ASDEX Upgrade Team, G. Kocsis, J. Sarkozi, T. Szepesi, C. Dorner; G. Kauke  
*A pellet launcher tool optimized for the control of edge localized modes in ASDEX Upgrade H-mode plasmas*  
Fusion Engineering and Design **82** (2007) 1007
- [19] Kocsis G., Kálvin S., Maraschek M., Lang P.T., Schneider W., Szepesi T., ASDEX Upgrade Team  
*Investigating the triggering process of pellet induced ELMs*  
33<sup>rd</sup> EPS Conf. on Plasma Physics, Róma, 2006., poszter
- [20] Kocsis G., Fattorini L., Kálvin S., Lang P.T., Maraschek M., Schneider W., Szepesi T., ASDEX Upgrade Team  
*Spatio-temporal investigations on the triggering of pellet induced ELMs*  
9<sup>th</sup> EFSREP, 2006., előadás
- [21] P.T. Lang, Cierpka P., Kálvin S., Kocsis G., Szepesi T., Wittmann C.  
*Ein Hochfrequenz Pellet Injektor zur Kontrolle der ELM-Aktivität in Fusionsplasmen*  
DPG Frühjahrstagung, Augsburg 2006., poszter P4.7
- [22] Szepesi T., Kálvin S., Kocsis G., P.T. Lang, M. Maraschek, J. Neuhauser, W. Schneider  
*ELM-keltés folyamatának vizsgálata deutérium pelletekkel*  
V. Nukleáris Technikai Szimpózium, Paks, 2006. november 30. - december 1., előadás