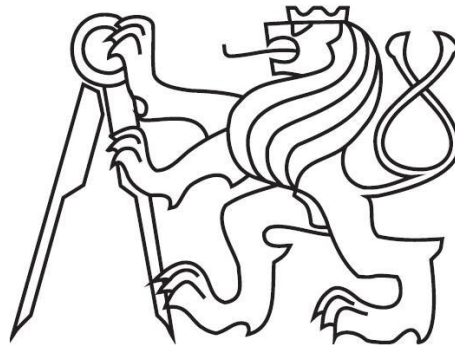


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky



Diplomová práce

**Vizualizace meziproductů spalování při  
procesu hoření plynné směsi**

Thesis

**Visualisation of combustion species in  
gaseous mixtures**

*Bc. Mulenko Martin*

*Vedoucí práce: Ing. Jan Kouba*

*Studijní program: Aplikovaná mechanika (AME)*

*23. srpna 2018*

## Anotační list

Jméno autora:	Bc. Mulenko Martin
Název diplomové práce:	Vizualizace meziproduktů spalování při procesu hoření plynné směsi
Title:	Visualisation of combustion species in gaseous mixtures
Rok:	2018
Studijní obor:	Aplikovaná mechanika
Obor studia:	Bez oboru
Ústav:	Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Vedoucí práce:	Ing. Jan Kouba
Bibliografické údaje:	počet stran: 92 počet obrázků: 34 počet grafů: 6 počet tabulek: 5 počet příloh: 2  počet tabulek:
Klíčová slova:	fluorescence, chemiluminescence, Laserem Indukovaná Fluorescence, luminiscence, OH radikál, spalování, vizualizace
Keywords:	fluorescence, chemiluminescence, Laser Induced Fluorescence, luminiscence, OH radical, combustion, visualisation
Anotace:	Práce se zabývá vizualizací meziproduktů spalování při procesu hoření plynné směsi. Jsou zde shrnuty fyzikální základy luminiscenčních jevů, jako je luminiscence, fluorescence nebo chemiluminescence. Tyto poznatky jsou využity pro popis vizualizačních metod pro procesy hoření.

Pro experiment byla vybrána Chemiluminiscence OH radikálů a pro ni bylo zřízeno měřící stanoviště v laboratořích ČVUT. Proběhlo jednoduché kvalitativní měření a pro tento experiment bylo vybráno nejvhodnější nastavení měřící techniky s ohledem na další možnost zpracování dat.

Abstract:

The thesis deals with visualisation of combustion species in gaseous mixtures. The thesis summarizes physical bases of luminescent phenomena such as luminescence, fluorescence or chemiluminiscence. This knowledge is used for description of visualization methods for burning processes. Chemiluminiscence of OH radicals was selected for the experiment. It was equipped with measuring stations in CTU in Prague university laboratories. Simple qualitative measurement was made and the most appropriate measuring technique setting for this experiment was chosen with regard to the further possibility of data processing.

## Poděkování

Rád bych poděkoval panu **Ing. Janu Koubovi**, vedoucímu mé diplomové práce, za jeho odborné konzultace, poskytnuté rady a připomínky k mé práci. Také za zázemí v laboratoři, které jsem mohl využívat.

Velké poděkování si zaslouží moje **rodina** za jejich neustálou podporu při mém studiu.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 23. srpna 2018

.....

## Obsah

1. Úvod – vizualizace spalovacích procesů .....	1
2. Fyzikální podstata .....	2
2.1. Luminiscence.....	2
2.1.1. Rozdělení luminiscence.....	5
2.2. Fotoluminiscence .....	6
2.3. Fluorescence .....	9
2.3.1. Stokesův posun .....	10
2.4. Chemiluminiscence .....	11
3. Porovnání metod chemiluminiscence OH radikálů a Laserem Indukované Fluorescence (LIF) .....	12
3.1. Chemiluminiscence OH radikálů .....	12
3.2. Laserem Indukovaná Fluorescence (LIF).....	13
3.3. Porovnání.....	18
4. Spalování.....	22
5. Technika .....	23
5.1. Zesilovač jasu obrazu .....	23
5.2. Rám / laboratorní kahan .....	26
5.3. Software.....	27
6. Experiment.....	27
6.1. Použitá technika.....	29
6.1.1. Kamera .....	29
6.1.2. Zesilovač.....	30
6.1.3. Filtr .....	31
6.1.4. Časovač – Timer box .....	31
6.2. Průběh měření a vyhodnocování.....	31

6.2.1.	Vysvětlení tabulky kódových označení .....	32
6.2.2.	Vyhodnocení jedné série .....	35
6.2.3.	Série 810 .....	43
6.	Závěr.....	45
	Bibliografie .....	47
7.	Příloha 1 .....	50
8.	Příloha 2 .....	91

## Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 – POHYB ELEKTRONU MEZI JEDNOTLIVÝMI VRSTVAMI ATOMU, PODLE 11 .....	4
OBRÁZEK 2 - JABLOŇSKÉHO DIAGRAM, PODLE 16 .....	7
OBRÁZEK 3 - BENZEN V POČÁTEČNÍM A EXCITOVANÉM STAVU, PODLE 16 .....	8
OBRÁZEK 4 - STOKESŮV POSUN 19 .....	11
OBRÁZEK 5 - OH CHEMILUMINISCENCE MÍRNĚ TURBULENTNÍHO PLAMENE PŘI 308 NM A ČASEM EXPOZICE 100 MS A 1 MS [14] .....	12
OBRÁZEK 6 – TOKOVÉ POLE PRO KOMBINACI LIF A PIV [14] .....	14
OBRÁZEK 7 - SESTAVA PRO MĚŘENÍ LIF [14] .....	15
OBRÁZEK 8 - VIZUALIZACE PLAMENE METODOU LIF A METODOU NEJVĚTŠÍHO GRADIENTU [14] .....	16
OBRÁZEK 9 - POROVNÁNÍ PRŮBĚHU SIGNÁLU VE STUPNÍCH ŠEDI A METODOU NEJVĚTŠÍHO GRADIENTU [12] .....	17
OBRÁZEK 10 - POROVNÁNÍ HISTOGRAMŮ POŘÍZENÝCH DAT - DELŠÍ EXPOZICE (MODRÁ) A KRATŠÍ (ČERVENÁ) [12] .....	17
OBRÁZEK 11 - 3D STACIONÁRNÍ SCHÉMATICKÝ MODEL PLAMENE SNÍMANÝ KAMEROU .....	18
OBRÁZEK 12 - SCHÉMATICKÝ MODEL MĚŘENÍ POMOCÍ CHEMILUMINISCENCÍ OH RADIKÁLŮ A MODEL VÝLEDNÉHO ZOBRAZENÍ 19	
OBRÁZEK 13 - SCHÉMATICKÝ MODEL MĚŘENÍ POMOCÍ LIF A MODEL VÝLEDNÉHO ZOBRAZENÍ .....	19
OBRÁZEK 14 – POROVNÁNÍ VIZUÁLNÍCH VÝLEDKŮ CHEMILUMINISCENCE OH RADIKÁLŮ A LIF [9] .....	21
OBRÁZEK 15 – SCHÉMATICKÁ ILUSTRACE PLOCHÉHO PLAMENE [4] .....	22
OBRÁZEK 16 - ZÁKLADNÍ PRINCIP FUNKCE ZESILOVAČE JASU OBRAZU, PODLE [10] .....	24
OBRÁZEK 17 - KANÁLKOVÁ DESTIČKA, PODLE [10] .....	25
OBRÁZEK 18 – SCHÉMA EXPERIMENTU PRO VIZUALIZACI SPALOVÁNÍ POMOCÍ CHEMILUMINISCENCE OH RADIKÁLŮ .....	28
OBRÁZEK 19 - EXPERIMENT PRO VIZUALIZACI SPALOVÁNÍ POMOCÍ CHEMILUMINISCENCE OH RADIKÁLŮ .....	28
OBRÁZEK 20 – KAMERA FLOWSense 4M Mk II DANTEC DYNAMICS [17] .....	29
OBRÁZEK 21 – HLAVNÍ PARAMETRY KAMERY FLOWSense 4M Mk II DANTEC DYNAMICS [17] .....	29
OBRÁZEK 22 – SCHÉMA ZESILOVAČE HAMAMATSU ŘADY C9547 – 03L [13] .....	30
OBRÁZEK 23 – PARAMETRY ZESILOVAČE HAMAMATSU ŘADY C9547 – 03L [13] .....	30
OBRÁZEK 24 – TYPICKÉ POHASÍNÁNÍ LUMINOFORU PRO ZESILOVAČ [13] .....	31
OBRÁZEK 25 - ZKRESLENÍ MĚŘENÍM PŘES MŘÍŽKU - MĚŘENÍ 605A OBRAZ 6/100 .....	33
OBRÁZEK 26 - POZOROVÁNÍ PŘES MŘÍŽKU A VE SMĚRU MŘÍŽKY HOŘÁKU .....	34
OBRÁZEK 27 - NEVHODNÉ NASTAVENÍ HODNOTY ZESÍLENÍ ZESILOVAČE – MĚŘENÍ 609A OBRAZ 6/100 .....	34
OBRÁZEK 28 - SPRÁVNÉ ZOBRAZENÍ CHEMILUMINISCENCE - MĚŘENÍ 110 OBRAZ 6/100 .....	35
OBRÁZEK 29 - GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ NASTAVENÍ ZESILOVAČE A KAMERY PRO SÉRII 101 .....	36
OBRÁZEK 30 - MĚŘENÍ 101 OBRAZ 50/100 .....	36
OBRÁZEK 30 - GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ NASTAVENÍ ZESILOVAČE A KAMERY PRO SÉRII 810 .....	37
OBRÁZEK 32 - MĚŘENÍ 810 OBRAZ 50/100 .....	37
OBRÁZEK 33 – HODNOTA ROVINY ŘEZU PRO URČENÍ VELIKOSTI SIGNÁLU .....	38
OBRÁZEK 34 - MĚŘENÍ 810 OBRAZ 50/100 .....	43



## Seznam grafů

GRAF 1 – VYHODNOCENÍ SÉRIE 101 .....	38
GRAF 2 – POROVNÁNÍ SÉRIE 101 A 810 .....	39
GRAF 3 – POLE VELIKOSTÍ GRADIENTŮ – HODNOTY PRO KÓDOVÁ OZNAČENÍ V TAB .....	41
GRAF 4 – STŘEDNÍ HODNOTA PRO MĚŘENÍ 801 - 810 .....	42
GRAF 5 - VYHODNOCENÍ SÉRIE 810.....	44
GRAF 6 - POROVNÁNÍ SÉRIE 410 A 810 .....	44

## Seznam tabulek

TABULKA 1 - ROZDĚLENÍ LUMINISCENCE .....	5
TABULKA 2- PŘÍKLAD TYPŮ SPALOVÁNÍ S OHLEDEM NA PŘÍPRAVU SMĚSI A TYP PRŮTOKU, PODLE [4] .....	22
TABULKA 3 - KÓDOVÁ OZNAČENÍ PRO MĚŘENÍ - KOMPLETNÍ .....	32
TABULKA 4 - KÓDOVÁ OZNAČENÍ PRO VYHODNOCENÍ GRADIENTU.....	40
TABULKA 5 - HODNOTY GRADIENTU.....	40

## Seznam příloh

PŘÍLOHA 1- VYHODNOCENÍ INTENZITY SIGNÁLU PRO JEDNOTLIVÉ SÉRIE .....	51
PŘÍLOHA 2- ZDROJOVÉ KÓDY MATLAB .....	93

## Seznam veličin

$\tau$	doba dosvitu	[s]
$k_f$	rychlostní konstanta fluorescence	[s]
$k_p$	rychlostní konstanta fosforescence	[s]
$\nabla f(x, y)$	gradient funkce f	[–]
$\frac{\partial f}{\partial x}$	diferenciál funkce f podle proměnné x	[–]
$\frac{\partial f}{\partial y}$	diferenciál funkce f podle proměnné y	[–]

## Seznam zkratek

LIF	Laser Induced Fluorescence	Laserem Indukovaná Fluorescence
PLIF	Planar Laser Induced Fluorescence	Planární Laserem Indukovaná Fluorescence
PIV	Particle Image Velocimetry	Integrální Laserová Anemometrie
LII	Laser Induced Incandescence	Laserem Indukovaná Žárovzdornost
OH	Oxygen Hydroxyl	Hydroxylový radikál
CCD	Charge Coupled Device	Typ kamerového čipu
ICCD	Intensified Charge Coupled Device	CCD kamera s implementovaným zesilovačem
LED	Light Emitting Diode	Světelná dioda
UV	Ultra Violet	Ultra fialové světlo
VID		Viditelné světlo
MCP	Microchannel plate	Kanálková destička

## 1. Úvod – vizualizace spalovacích procesů

Spalovací procesy se používají v mnoha moderních technologiích, jako je výroba elektrické energie, vytápění a automobilový průmysl, pohon letadlové techniky a vesmírných přepravních prostředků.

Znalosti fyziky, které se využívají pro modelování turbulentních plynných a reakčních toků, se neustále rozšiřují. Získávání podrobných informací je nezbytné k prokázání spolehlivosti různých numerických modelů, které již byly vyvinuty, a dále ke zlepšení jejich predikčních schopností s cílem zvýšit výkon zkoumaných zařízení. Takováto měření pak poskytují hlubší pochopení vnitřních fyzikálních a chemických procesů, které je nutné k ověření a zlepšení počítačových simulací a k podpoře aplikovaného výzkumu v praktických spalovacích zařízeních.

Od příchodu laseru na počátku 60. let byly pro diagnostické účely vyvinuty různé laserové spektroskopické techniky. Tyto metody jsou mimořádně cenné pro zkoumání obtížně předvídatelných prostředí, jako třeba právě u procesů spalování. Konkrétně to je například turbulentní plamen, kde je pro zkoumání velmi užitečné použít optické techniky s vysokým prostorovým a časovým rozlišením. Mezi různými diagnostickými metodami založenými na laseru se ukázaly jako užitečné zobrazovací techniky zahrnující Laserem Indukovanou Fluorescenci (LIF), Chemiluminiscenci, rozptyl Raman, Rayleigh nebo Mie. Výsledný obraz může odhalit důležité informace o struktuře prútku nebo o procesech spalování, které ovlivňují návrh spalovací komory. Prostorově rozlišená měření jsou v případě LIF získána na velkém počtu bodů obsažených v laserovém listu, čímž se získá okamžitý obraz vlastností toku. Počet těchto bodů je omezen rozlišením snímací techniky a je definován počtem pixelů zastoupených ve snímaném úseku. Podrobná studie velkých a malých struktur v obraze je možná v reakčních i nereakčních tocích, stejně jako základní studie zabývající se platností modelování turbulentního toku.

Zobrazování pomocí chemiluminiscence je taktéž cenným nástrojem pro diagnostiku spalovacích procesů. Technika spočívá v detekci přirozeně vyzařovaného světla z chemicky vybuzených typů plamene a nevyžaduje přítomnost laseru. To činí z této techniky cenově dostupnou diagnostickou metodu. Metodu lze vylepšit o použití

vysokorychlostní kamery, což umožní studium časového průběhu mnoha různých procesů spalování. [9] [12] [14]

Cílem této práce je zabývat se v teoretické části vizualizací spalovacích procesů a zaměřit se na dvě hlavní metody, a to na Laserem Indukovanou Fluorescenci a Chemiluminiscenci OH radikálů. Dále na základě teoretických poznatků s ohledem na podmínky v laboratoři ČVUT navrhnout experiment, na kterém bude provedeno kvalitativní měření jednou z metod. Vzhledem k těmto podmínkám byla později pro tuto práci zvolena Chemiluminiscenční metoda vizualizace spalovacích procesů. Jedná se, například oproti metodě Laserem Indukované Fluorescence, o méně sofistikovanou metodu. Metoda ale nabízí jednodušší způsob nastavení, který je méně náchylný na chyby. Také je finančně méně náročná na vybavení, které je lehce přenositelné, protože ze speciální techniky je zapotřebí pouze zesilovač a kamera. Přesto dává metoda velmi dobré výsledky v dostatečné kvalitě. Cílem práce by mělo být nalezení vhodného nastavení vybraných zařízení tak, aby v rámci podmínek tohoto experimentu byly výsledky co nejoptimálnější pro další zpracování.

## 2. Fyzikální podstata

Zkoumané diagnostické metody hoření plamene mají svou fyzikální podstatu v luminiscenčních jevech. Luminiscence se dělí na mnoho kategorií podle nejrůznějších kritérií, jak je vidět v kapitole 2.1.1. Rozdělení luminiscence. I když jev v této práci nejvíce zkoumaný je chemiluminiscence, je zapotřebí hlubší vhled do této problematiky, který je rozebrán v následujících kapitolách. Informace čerpány ze zdrojů [1] [3] [11] [16] [18] [19]

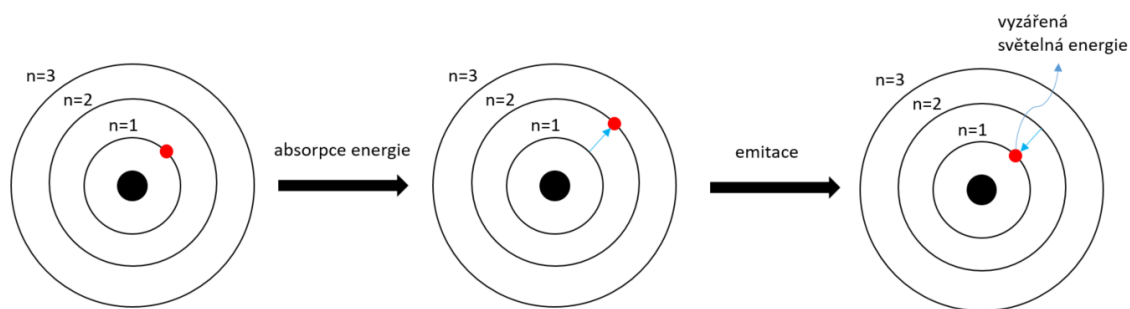
### 2.1. Luminiscence

Pojem luminiscence je znám již od roku 1889 a definoval ho E. Wiedemann: *„Luminiscence je definována jako spontánní záření tělesa představující přebytek nad teplotním zářením, které je charakterizováno dozníváním, jehož trvání značně převyšuje periodu světelných kmitů“*. Toto tvrzení lze přepsat také tak, že látka, která

absorbuje záření o vhodné vlnové délce, se samovolně nabudí do excitovaného stavu, což je stav o vyšší energetické hladině než za klidu. Tato dodaná energie se poté po určité době zpětně vyzáří ve formě elektromagnetického záření. Musí se přitom ale zachovat pravidlo, že trvání excitovaného stavu je delší než perioda světelných oscilací, tedy:  $\tau = 10^{-15}$  [s]. [1]

Původ luminiscenčního záření tkví v molekulách látek, případně v jejich atomech. Pro praktické představení luminiscence je zde použit model atomu sestavený dánským fyzikem Nielsem Bohrem, který vycházel z prvotního návrhu Ernesta Rutherforda z roku 1911. Tento Bohrov model předpokládá, že elektrony obíhají kolem středu atomu pouze v určitých drahách neboli orbitalech. Každý orbital zde představuje jednu energetickou úroveň, která představuje hladinu energie potřebnou pro udržení elektronu v obalu. Platí zde úměra, že čím vyšší orbital neboli vzdálenější dráha, tím více energie je zapotřebí k udržení elektronu. Zároveň lze také explicitně říci, že se tím zmenšuje energie potřebná pro jeho odtržení. K luminiscenci dojde pouze v jednom případě, a to tehdy, pokud se atom nachází v excitovaném, tedy vybuzeném, stavu. Excitovaný stav atomu nastane tehdy, pokud absorbuje energii úměrnou rozdílu základní a některé vyšší energetické hladiny. Tato energie může být dodána dopadajícím zářením nebo dopadajícími elektrony. Následuje zvýšení energie atomu, jelikož elektrony dosahují vzdálenějších energetických vrstev. Dále je uvažován kvantový model atomu, a proto atom nemůže mít libovolnou energii a jednotlivé energetické stavy tvoří nespojitou energetickou řadu. Atom tedy musí přijímat energii po kvantech. Vyšší energetické stavy jsou zde stále více nestabilní a atom nebo atomy se po určité době vracejí do stabilního, ustáleného stavu. Tento časový interval návratu je velmi krátký. Přebytečná energie vyzářená při tomto ději (návratu elektronu do základního stavu) je vyzářena v podobě kvanta zářivé energie, tedy fotonu. Jev známý jako Franckův-Condonův princip říká, že při excitaci molekuly jsou přeorganizovány pouze elektrony.

Pohyb elektronu mezi elektronovými vrstvami je popsán na Obrázek 1 na příkladu atomu vodíku.

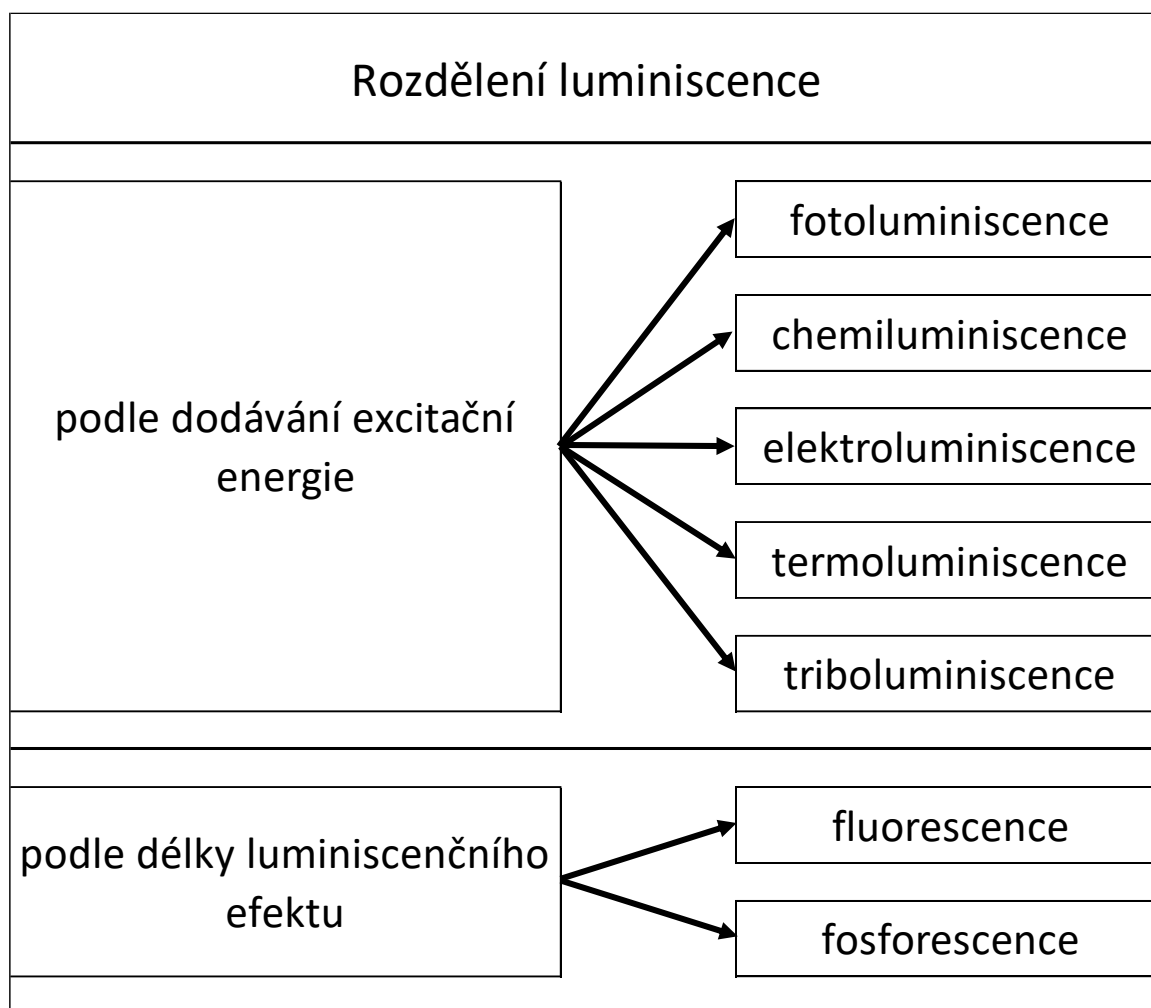


Obrázek 1 – pohyb elektronu mezi jednotlivými vrstvami atomu, podle [11]

V prvním případě vidíme atom vodíku v základním stavu. Jeden elektron této molekuly se nachází ve vrstvě  $n=1$ . Každé vrstvě zde připadá vlastní úroveň energie. Pokud proběhne absorbování kvantové energie molekulou vodíku, excituje elektron na vyšší energetickou úroveň  $n=2$ . Nyní se tedy nachází ve stavu excitace. Pokud elektron spadne zpět do původní energetické polohy, do základního stavu  $n=1$ , uvolní se energie ve formě fotonu jako elektromagnetické záření. Vlnová délka zde závisí na velikosti vyzářené energie. Pokud se nachází vlnová délka v oblasti viditelného světla, pak bude přechod vnímán pozorovatelem jako světlo určité barvy náležící vlnové délce.

Luminiscence obvykle probíhá u pevných nebo kapalných látek a trvá i po skončení budícího účinku. Při rozdělení na organické a anorganické látky lze říci, že luminiscenci vykazuje z organických látek většina a nositelem záření zde je molekula. U anorganických látek je již příčinou vzniku tohoto záření shluk atomů neboli krystaly.

### 2.1.1. Rozdělení luminiscence



Tabulka 1 - rozdělení luminiscence

Tento druh záření je možno rozdělit podle Tabulka 1 - rozdělení luminiscence na několik podkategorií. Zde je rozdělení podle způsobu dodávání budící neboli excitační energie do tělesa.

- Fotoluminiscence – budící energie je dodávána formou viditelného nebo UV záření. Z hlediska využití je nejdůležitější, protože se využívá v chemii, biochemii nebo např. v oblasti polovodičů. Zde lze uvést jako příklad zářivky, jakožto typ osvětlení.
- Chemiluminiscence – existuje pouze pro určitý typ exotermních chemických reakcí. Reakční teplo, nebo alespoň jeho část, je uvolněno a vyzářeno ve formě světla. Tento jev je základním prvkem pro Chemiluminiscenční metodu užívanou v experimentu popsaném dále v této práci.



- Elektroluminiscence – energie je zde dodávána vystavením látky elektrickému poli a následným průchodem elektrické energie danou látkou. Nejvhodnějšími látkami jsou zde polovodiče, které mají široké zakázané pásmo (charakteristická veličina každého polovodiče, kdy se toto zakázané pásmo nachází mezi vodivostním a valenčním pásmem). Reálným příkladem zde může být LED technologie.
- Termoluminiscence – luminiscenční jev zde vyvolává rostoucí teplota po předchozím dodání energie.
- Triboluminiscence – jev vzniká působením tlaku u některých anorganických látek, tedy v krystalech. Jde o oddělení elektrických nábojů uvnitř krystalu při drcení např. zrněk křemene, cukru nebo karborunda.

Další možností rozdělení je například podle délky luminiscenčního efektu. Zde je rozdělení pouze na dva druhy, a to na fluorescenci a fosforescenci.

- Fluorescence – po odstranění zdroje ozařování látky luminiscenční jevy vymizí, a to v řádech nanosekund. Tento jev je základním prvkem pro metodu Laserem Indukované Fluorescence
- Fosforescence – jev luminiscence přetrvává i po odstranění zdroje. Vznikne v případě, že elektron překoná tzv. zakázaný stav, přesune se do energeticky nižší hladiny a vyzáří foton. Pravděpodobnost tohoto efektu se zvyšuje s časem, a proto trvání fosforescence lze pozorovat i po dobu v řádech minut.

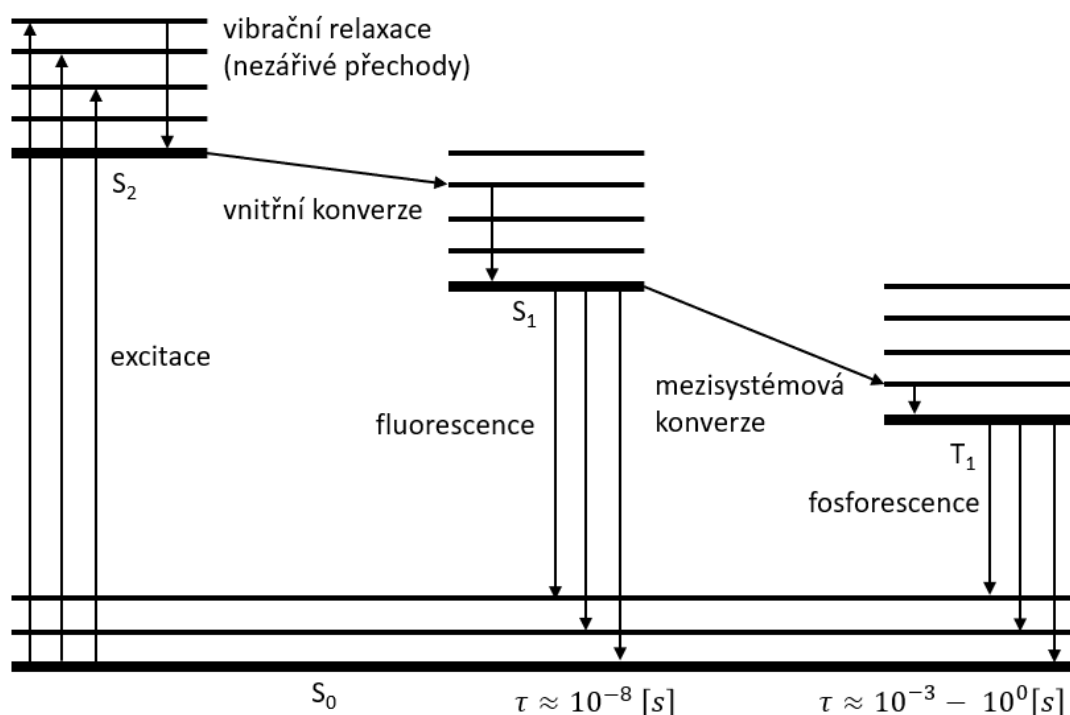
Dále jsou podrobněji rozebrány některé vybrané druhy luminiscence, které jsou podstatné pro tuto práci, tedy pro vysvětlení metody Laserem Indukované Fluorescence a Chemiluminiscence OH radikálů. Jedná se o fotoluminiscenci, fluorescenci a chemiluminiscenci.

## 2.2. Fotoluminiscence

Pro vysvětlení obecných principů a vysvětlení rozdílu mezi fluorescencí a fosforescencí je použit jev fotoluminiscence. U tohoto jevu se látkou pohlcená energie, která je vyzářena, přemění na zcela nové záření o větší vlnové délce. To může zanikat téměř současně

s přerušením budícího záření, pak se jedná o fluorescenci. Nebo jev trvá podstatně delší časový úsek, a poté se mluví o fosforescenci. Fotoluminiscence je popsána jako jev, při kterém dojde ke vzájemné interakci částice a fotonu, o frekvenci UV nebo VID záření, a přitom nastane předání energie valenčním elektronům molekuly. Toto nastává většinou u organických molekul s dvojitými vazbami, jako jsou například aromatické uhlovodíky. Absorpce energie nejvíce závisí na struktuře a skupenství dotčené látky. Dalším faktorem, který ji ovlivňuje, může být například teplota. Při absorpci záření se valenční elektrony dostanou na vyšší hladinu neboli do excitovaného stavu pomocí dodané energie. Setrvání elektronů v excitovaném stavu ovšem netrvá příliš dlouho a elektron se opět vrací do předešlého stavu.

V Jabloňského diagramu vidíme znázorněný rozdíl mezi fluorescencí a fosforescencí na Obrázek 2:



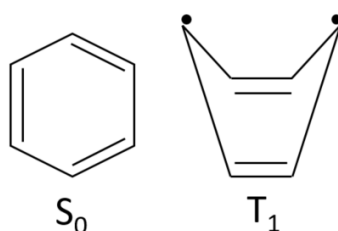
Obrázek 2 - Jabloňského diagram, podle [16]

- Jabloňského diagram:
- S<sub>0</sub> – základní stav
  - S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> – excitované singletové stavy
  - T<sub>1</sub> – excitovaný tripletový stav
  - τ – čas dosvitu

Popis excitovaného stavu: V modelové situaci absorpce jednoho fotonu molekulou v základním stavu  $S_0$  dojde k excitaci jednoho valenčního elektronu do nejbližší neobsazené orbitaly s vyšší energií. Souhrnně lze označit předešlé stavy jako excitované stavy. Ty lze rozdělit na dva následující druhy:

- Singletový stav – kde  $S_1$  je charakterizován energií  $E_S$  a spiny obou elektronů jsou antiparalelní.
- Tripletový stav – zde  $T_1$  je charakterizován energií základního stavu  $E_T$ . Zde jsou spiny obou elektronů paralelní.

Tvar molekuly v excitovaném a základním tvaru se může velmi lišit díky rozdílné elektronové konfiguraci. Ta způsobuje hybridizaci atomů v excitovaném stavu a doprovázejí ji efekty, jako je třeba změna délky vazeb nebo jiné rozložení elektronové hustoty uvnitř atomu. Pro názornost můžeme uvést benzen při počátečním stavu  $S_0$  a v jeho excitovaném stavu  $T_1$  na Obrázek 3.



Obrázek 3 - Benzen v počátečním a excitovaném stavu, podle [16]

Zhasínání excitovaných stavů je pojem, který popisuje přechod elektronu z excitovaného stavu do základního. Děje se tak v důsledku emise získané energie absorpcí, a tedy krátkého působení excitovaných molekul v tomto stavu. Tento děj se může projevat následujícími způsoby:

#### 1. Zářivé přechody:

U zářivých přechodů vyzařují molekuly energii v podobě fotonu díky přechodu z vyššího energetického stavu do nižšího. Rozlišují se dva druhy této emise, a to samovolná (spontánní) a stimulovaná. Spontánní nastává, když dojde k vyzáření i bez účinku vnějšího zdroje záření. Stimulovaná emise nastává účinkem vnějšího elektromagnetického záření,

kteře vstoupí do excitované molekuly a vyvolá zde elektromagnetickou poruchu. Tato molekula pak vyzáří energii v podobě fotonu, který má stejnou frekvenci jako dopadající vnější záření. Rozdíl mezi dalším dělením na fluorescenci a fosforescenci je zde díky různým způsobům přechodu elektronu mezi vrstvami. Přechod z  $S_1$  do  $S_0$  je dovolený emisní proces, který se nazývá fluorescence, a je charakterizován rychlostní konstantou  $k_f = 10^{-6} - 10^{-7} s$ . Přechod  $T_1$  do  $S_0$  je pak zakázaný emisní proces. Nazývá se fosforescence a je charakterizován rychlostní konstantou  $k_p = 10^{-2} - 10^{-4} s$ . Tyto veličiny vyjadřují dobu dosvitu.

## 2. Nezářivé přechody:

Tyto přechody mění energii systému, a proto nedochází k emisi záření. Opět zde rozlišujeme mezi dovoleným a zakázaným přechodem mezi dvěma stavy. První se nazývá vnitřní konverze a je to dovolený přechod mezi dvěma stavy se stejnou spinovou multiplicitou. Například  $S_1$  do  $S_2$ . Druhý se nazývá mezisystémový přechod a je tzv. zakázaný. Jedná se o přechod mezi excitovanými stavy s rozdílnou spinovou multiplicitou. Například  $S_1$  do  $T_1$ . Pojem vibrační relaxace říká, že při uvolňování tepla nastane přechod z vyšších vibračních stavů do základního tvaru.

### 2.3. Fluorescence

Fluorescence je základním jevem, který je využíván v metodě Laserem Indukované Fluorescence, díky které je možné například vizualizovat spalovací procesy. Jedná se o chemicko-fyzikální děj, který je podskupinou luminiscence, a patří mezi fotoluminiscenční záření. Jedná se o jev, při kterém dojde u molekuly v excitovaném stavu k samovolnému vyzáření fotonu neboli emisi záření. Tento jev je tedy spontánní. Doba dosvitu, charakteristická pro fluorescenci po ukončení excitace, je v řádu  $10^{-6}$  až  $10^{-9}$  sekund. Tento přechod je mezi stavem  $S_1$  a základním stavem  $S_0$ . Výjimku tvoří některé prvky, jako například azulen, kde dochází k přechodu ze stavu  $S_2$ . Aby molekula fluoreskovala, musí zachovávat následující principy:

- Nesmí nastat chemická proměna molekuly následkem absorpce záření o dané vlnové délce.

- U mezisystémového přechodu, tedy ze stavu  $S_1$  do  $T_1$ , nesmí dojít k přechodu dříve než k fluorescenci, tedy musí být dostatečně pomalý.

Takovéto záření může být vyvoláno účinkem dopadu jiného záření nebo účinkem dopadajících částic. Dále lze konstatovat, že geometrické uspořádání molekuly účinnost fluorescence pozitivně ovlivňuje.

Fluorescenci lze definovat několika hlavními charakteristikami:

- Intenzita vyjadřuje počet fotonů, který prochází jednotkovou plochou za jednotku času.
- Spektrální složení je spektrální hustota fotonového toku na jednotkový interval vlnových délek nebo frekvencí.
- Polarizace je pojem definovaný jako směr kmitání elektrického vektoru elektromagnetické vlny.
- Doba dohasínání je dána vnitřní dobou života excitovaného stavu, z něhož dochází k emisi. Tento fakt úzce souvisí s pochody vedoucími k nezářivé deaktivaci tohoto stavu.
- Koherenční vlastnosti definují vztahy mezi fázemi světelných vln.

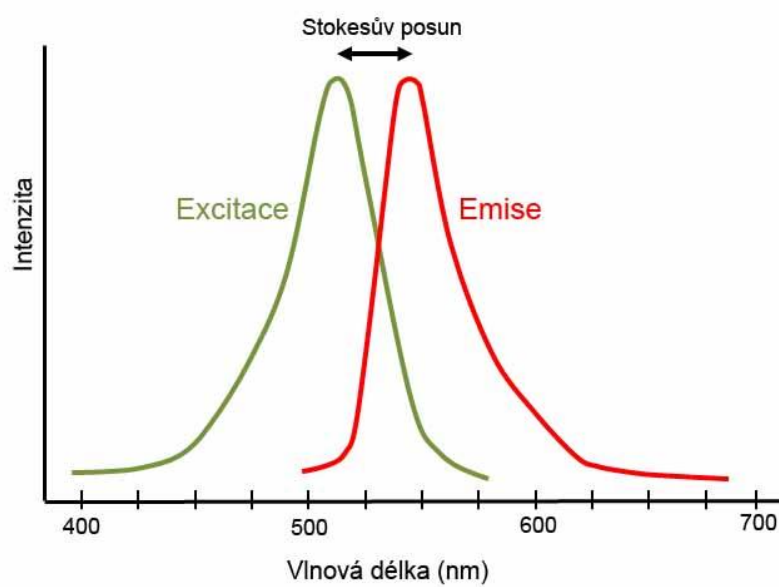
Každá látka může být z hlediska fluorescence charakterizována dvěma typy spekter. První je excitační a druhé emisní. Emisní spektrum je závislost intenzity fluorescence na vlnové délce, popř. energii nebo frekvenci, při konstantní vlnové délce budícího záření. Excitační spektrum je definované obdobně, rozdíl je pouze v závislosti výše zmíněných veličin při konstantní vlnové délce emitovaného záření. Pokud molekula vyzáří veškerou absorbovanou energii, pak má fluorescence stejnou vlnovou délku jako absorbované záření a jedná se tedy o tzv. rezonanční fluorescenci. Fluorescenční spektrum je závislost vlnové délky na absorbanci systému. Charakterizujeme ho několika základními pojmy, jako je Stokesův posun, doba života excitovaného stavu nebo vliv prostředí a emisní spektrum.

### 2.3.1. Stokesův posun

Pokud je vyjádřena změna energie absorbovaného fotonu oproti fotonu vyzářenému fluoroforem při přechodu z excitovaného tvaru do základního, poté rozdíl mezi těmito dvěma energiemi fotonů je jiný pro každou molekulu a nazývá se právě Stokesův posun.

Stokesův posun vidíme na Obrázek 4. Tento jev lze obecně převést i na vlnové délky. Tedy, že vlnová délka fluorescenčního záření je větší než vlnová délka absorpčního záření.

Ztráty energie jsou způsobeny nežádivými procesy, když se molekula nachází v excitovaném stavu. Je to relaxace vibrační energie a vnitřní konverze. Tento druh relaxace je poté nazýván Kashovým pravidlem.



Obrázek 4 - Stokesův posun [19]

## 2.4. Chemiluminiscence

Chemiluminiscence je speciální případ luminiscence popsané výše. Jedná se o produkci světla pomocí chemické reakce. Aby bylo dosaženo chemiluminiscenčního jevu, je zapotřebí splnění několika požadavků.

Při reakci musí vzniknout dostatečné množství energie potřebné pro excitaci elektronů. Z toho vyplývá, že reakce musí být exotermní. Dále zde musí být mechanismus usměrnění energie pro potřebu excitace elektronů. Pokud by se energie z chemické reakce ztrácela z největší části do formy tepla, jak je tomu ve většině případů, o chemiluminiscenci by se nejednalo. Nakonec excitovaný produkt musí být schopen ztrácet svoji energii ve formě fotonu nebo ji umět převést na fluoreskující sloučeniny. Fotonová emise se ve výsledku projevuje jako krátké světelné záblesky. Naopak přeměna energie na fluoreskující sloučeniny se projevuje jako dlouhodobá světelná emise obvykle v řádu minut. [11] [18]

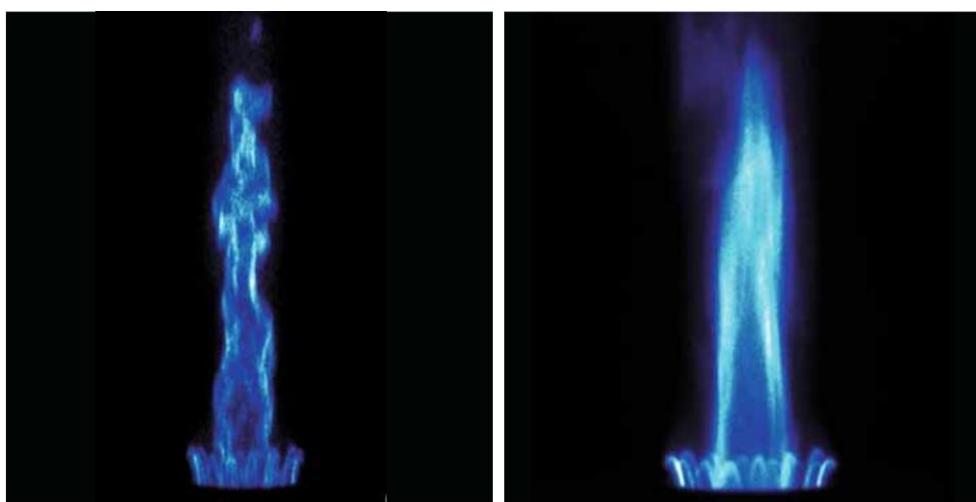
Tento jev umožňuje pozorovat, vizualizovat a následně vyhodnocovat spalovací procesy. Právě vizualizace OH radikálů pomocí chemiluminiscence je využito v experimentální části této práce.

### 3. Porovnání metod Chemiluminiscence OH radikálů a Laserem Indukované Fluorescence (LIF)

Obě metody, tedy metodu Chemiluminiscenční i metodu Laserem Indukované Fluorescence, lze využít k pozorování a vizualizaci procesu hoření. Obecně lze říci, že metoda LIF je náročnější na vybavení, měření a jeho nastavení. Výsledky jsou poté přesnější a objektivnější. Chemiluminiscence je méně náročná a rychlejší metoda, která přesto dává velmi kvalitní výsledky s ohledem na jednoduchost experimentu.

#### 3.1. Chemiluminiscence OH radikálů

Jedna z nejběžnějších optických diagnostických metod je chemiluminiscenční zobrazování OH radikálů. Tato zobrazovací technika zachycuje vlnové délky (306~310 nm) z přirozeně excitovaných OH radikálů při jejich návratu do základního stavu. Je poměrně snadné nastavit ji a použít k identifikaci vysokoteplotních reakčních zón u plamenného hoření, jakožto i pro určení klíčových parametrů plamene. Jelikož jsou obrazy integrované do zorného pole, nemohou být viditelné konstrukční detaily plamene.



Obrázek 5 - OH chemiluminiscence mírně turbulentního plamene při 308 nm a časem expozice 100  $\mu$ s a 1 ms [14]

V experimentu [9], který se zabýval zachycením procesu hoření pomocí OH chemiluminiscence, byly chemiluminiscenční signály zachyceny použitím zesilovacího kamerového zařízení (ICCD) (LaVision NanoStar) vybaveného objektivem s intenzitou UV záření 105 mm f / 4,5 (CoastalOpt®). Pro izolaci emisního rozmezí OH Chemiluminiscence byly použity optické filtry, včetně skleněného filtru WG305 a 300 nm a pásmového filtru (FWHM: 40 nm, 70% maximálního přenosu), umístěny před objektiv fotoaparátu ICCD. Výsledky experimentu jsou v této práci použity v kapitole 3.3. Porovnání. [9] [11]

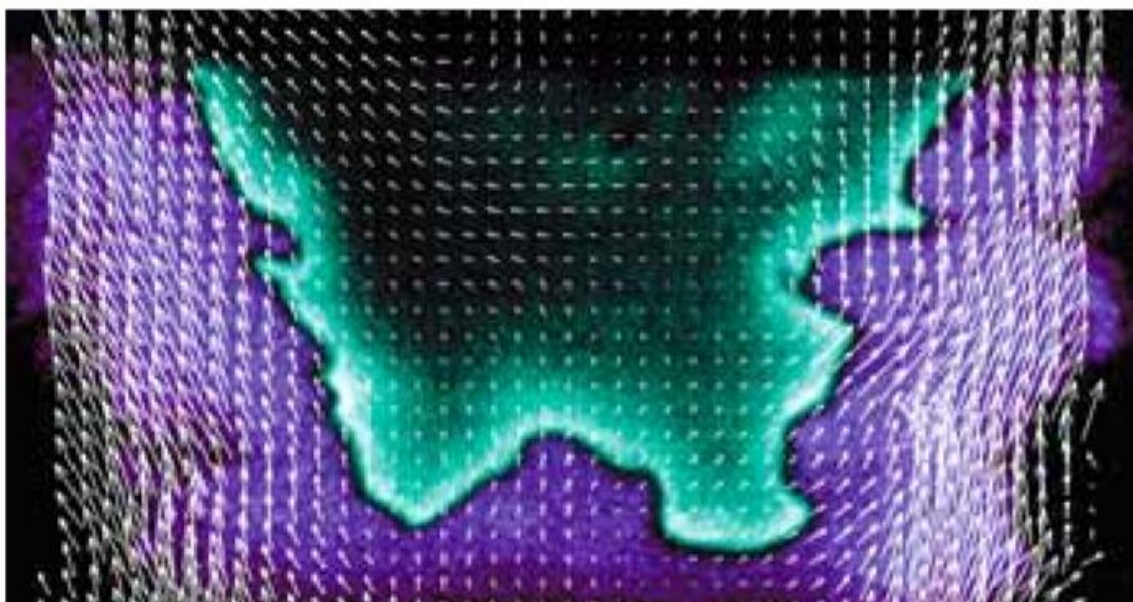
### 3.2. Laserem Indukovaná Fluorescence (LIF)

K lepšímu pozorování a pochopení prostorového rozložení jednotlivých meziproduktů při spalování slouží často univerzální metoda LIF - Laser Induced Fluorescence (Laserem Indukovaná Fluorescence). Někdy bývá použito označení PLIF neboli Planar Laser Induced Fluorescence (Planární Laserem Indukovaná Fluorescence), což je označení totožné metody. Jedná se v dnešní době o nejvýkonnější a nejlepší techniku pro experimentální diagnostiku spalovacích procesů. Metoda je schopna vizualizovat OH radikály, ale mezi další často sledované patří například radikály CH nebo NO. Metoda pomáhá lépe pochopit procesy probíhající při hoření. Neinvazivní charakter této metody je její velká výhoda. Dalšími klady jsou například vysoké prostorové rozlišení a schopnost poskytovat informace v celé rovině pozorování. Mezi nevýhody naopak patří složitá kalibrace celého systému a s tím spojené velmi složité celé měření.

Metoda LIF se využívá v oblasti spalování (combustion LIF). Práce se zaměřuje na spalovací LIF a zde je metoda vhodná pro měření koncentrací látek vznikajících při hoření. Princip metody spočívá v zaznamenávání fluorescence meziproduktů hoření. Ta je vyvolána laserovým pulsem o příslušné vlnové délce, která odpovídá vlnové délce konkrétního meziproduktu. Fluorescence takto vyvolaná je velmi slabá a nachází se často v UV oblasti světelného spektra. Takovou nelze běžnou kamerou, osazenou základní optikou, zachytit. Proto se používají dokonalejší ICCD (Intensified Charge-Coupled Device) kamery, kterými je možné studovat časový vývoj spalovacích procesů. Další možností jsou například CCD kamery, užívané pro PIV a rozšířené o vhodný typ zesilovače obrazu. Dalším jevem pozorovatelným touto metodou může být teplotní pole, které lze mapovat a



případně jím komplexně 2D vizualizovat plamen. Pokud se metoda LIF zkombinuje s PIV (Particle Image Velocimetry), dá se popis hoření doplnit i o rychlostní pole. Příklad vyhodnocení touto metodou je zachycen na Obrázek 6, kde lze vidět simultánní tokové pole. Fialová barva je palivo a zelená vizualizace OH radikálů v turbulentním atmosférickém plamenu.



Obrázek 6 – Tokové pole pro kombinaci LIF a PIV [14]

Pro kvalitní měření pomocí metody LIF je podstatný dostatečně intenzivní a ostrý detekovaný signál fluorescence emitovaný sledovanými meziproducty hoření. Tento faktor je možno ovlivnit správným nastavením a synchronizací záznamového zařízení a zesilovače obrazu. Zde je opět několik způsobů, jak ostrost a intenzitu fluorescenčního signálu zvýšit. Za prvé je to zvýšením energie samotného budícího svazku, kterou je možné navýšit laserem Nd:YAG, kde se zvýší jeho pulsní výkon, nebo optimálnějším seřízením celé optické soustavy. Další možnost zvýšení intenzity signálu z hoření je lepší pozorovací technika, tedy citlivější vysokorychlostní kamera a výkonnější zesilovač obrazu. V neposlední řadě má na intenzitu detekovaného signálu vliv synchronizace soustavy.

Pro pozorování pomocí LIF metody je potřebná patřičná laserová soustava. V laboratořích ČVUT jsou k dispozici pro tuto metodu následující zařízení: pulsní a laditelný laser

s UV částí, vysokorychlostní kamera, zesilovač obrazu, synchronizační a zobrazovací technika a také ovládací software. Konkrétní zařízení a přístroje jsou tato:

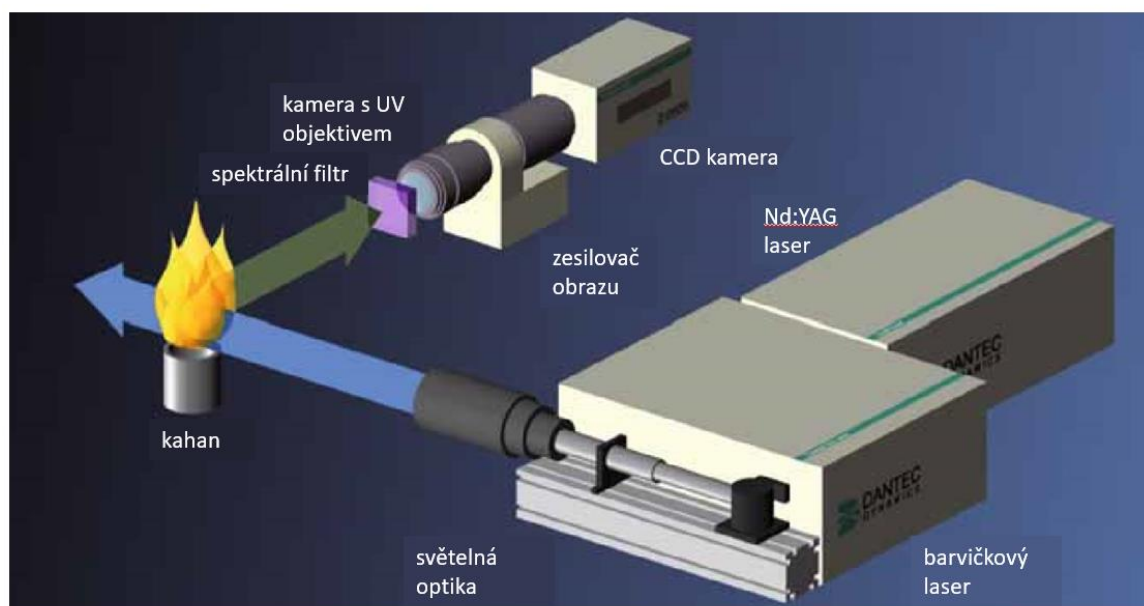
Nd:YAG pulsní Laser – Brilliant B

TDL 90 Laditelný laser + UV part

CCD camera Hi sense 4M

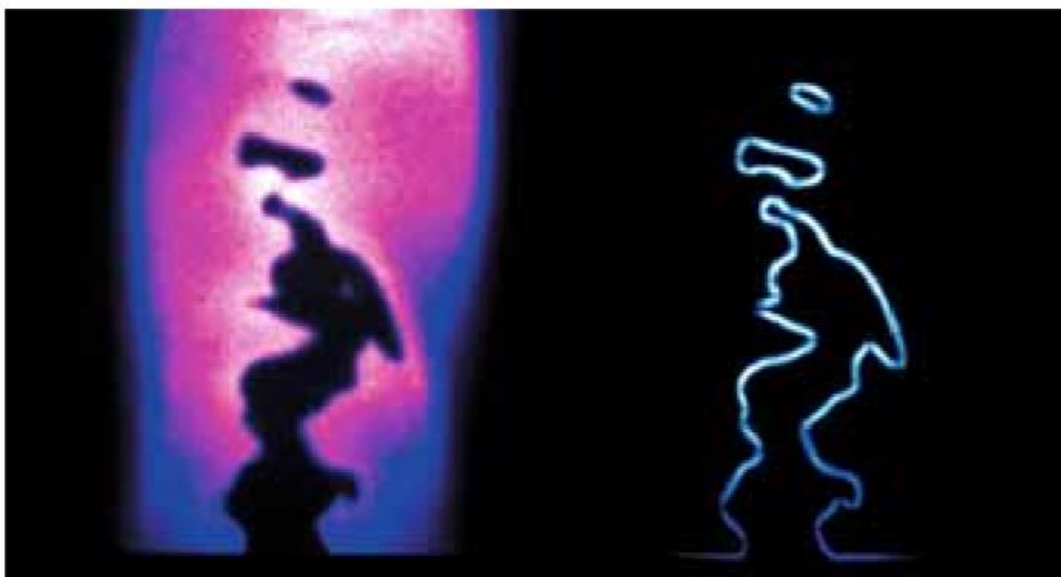
Image intensifier Hamamatsu 9547-03

Software : Dynamics Studio



Obrázek 7 - sestava pro měření LIF [14]

Výsledkem takového měření je například vizualizace hlavního plamene pomocí metody největšího gradientu. Na Obrázek 8 je ukázána vizualizace čela plamene a následných plynů vznikajících při hoření metodou LIF v levé části. V pravé poté obrázek po zpracování, který ukazuje polohu hlavního plamene pomocí detekce gradientu.



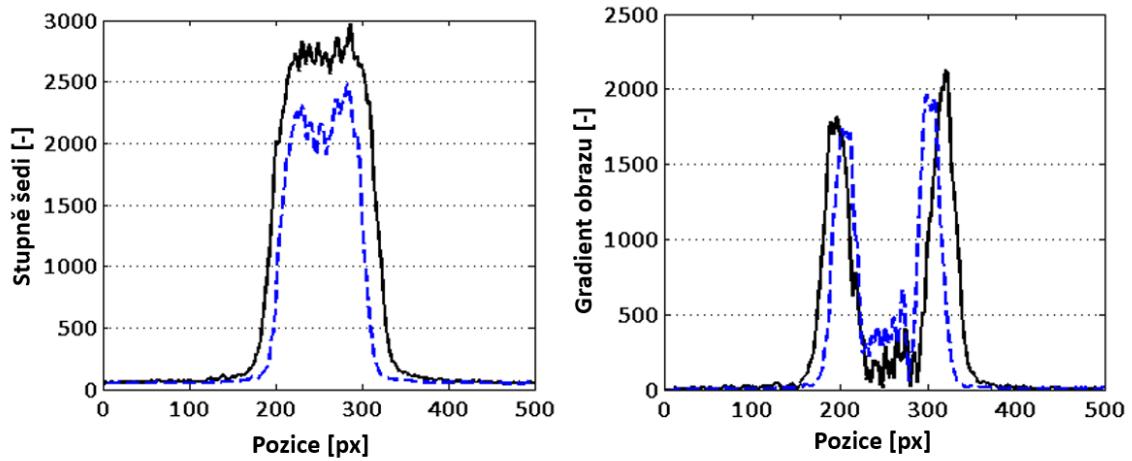
Obrázek 8 - vizualizace plamene metodou LIF a metodou největšího gradientu [14]

Obecně detekce hrany plamene bývá základní součástí měření, protože poloha hrany je při vizualizaci OH radikálů polohou čela plamene. Hrana se zde detekuje pomocí gradientu obrazové funkce  $f(x,y)$ . Tento gradient můžeme popsat následující funkcí

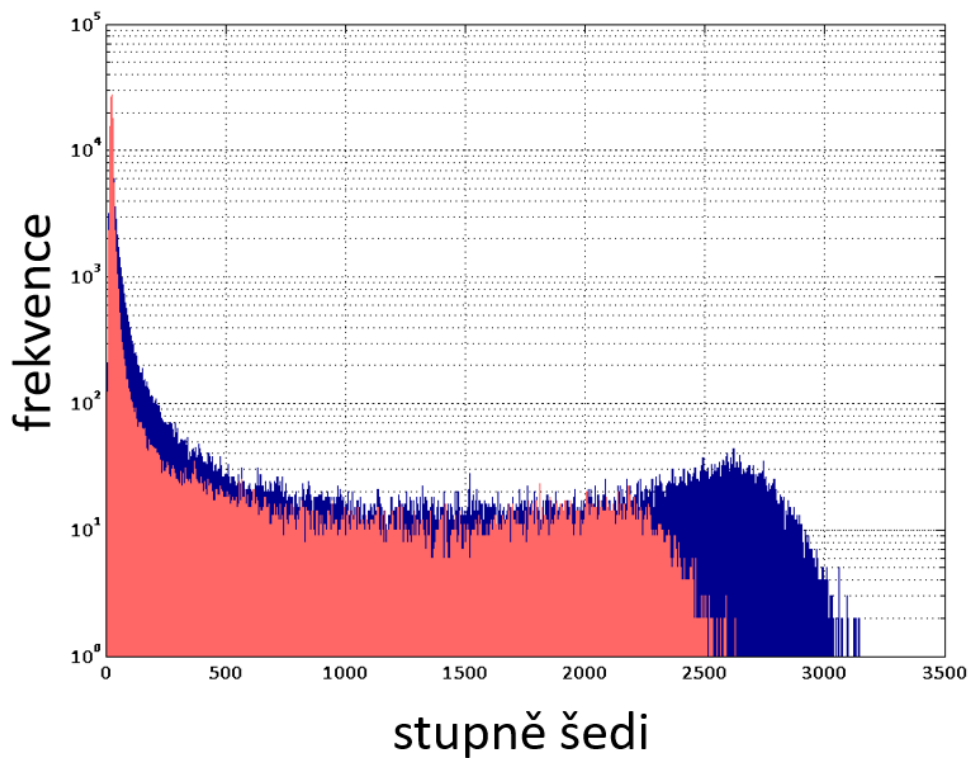
$$\nabla f(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (3.2-1)$$

Jako měřítko kvality zaznamenaných dat je pak možné využít právě tuto hodnotu gradientu spolu s hodnotou detekovaného signálu. Výsledky ovlivňuje šum, který je nutné odstranit. Proto se dá využít tzv. mediánový filtr a následné lokální vyhlazení, čímž je docíleno neovlivněné hodnoty gradientu právě tímto šumem. V našem případě mediánový filtr použit nebyl, protože experiment se zaměřuje na záznam dat a výběr vhodného nastavení a filtr by mohl negativně ovlivnit průběh signálu.

Na konkrétním případě měření pomocí LIF v laboratořích ČVUT [12] je možné znázornit možné interpretace výsledků měření touto metodou. Byly zde zaznamenány dvě série dat. Data pro délku expozice kamery 50  $\mu$ s a 500  $\mu$ s. Výsledky vizualizace OH radikálů jsou na Obrázek 9. Je vidět, že u delší expozice je patrné zvýšení intenzity jasu. Tento fakt je dán vlastnostmi zesilovače, který po tuto dobu umožňuje záznam na kameru. Pro neshodný tvar plamene byla vybrána rovina řezu s největší hodnotou signálu v daném snímku. Dále je možno vidět vyhodnocení průběhu signálu v tomto experimentu.



Obrázek 9 - porovnání průběhu signálu ve stupních šedi a metodou největšího gradientu [12]

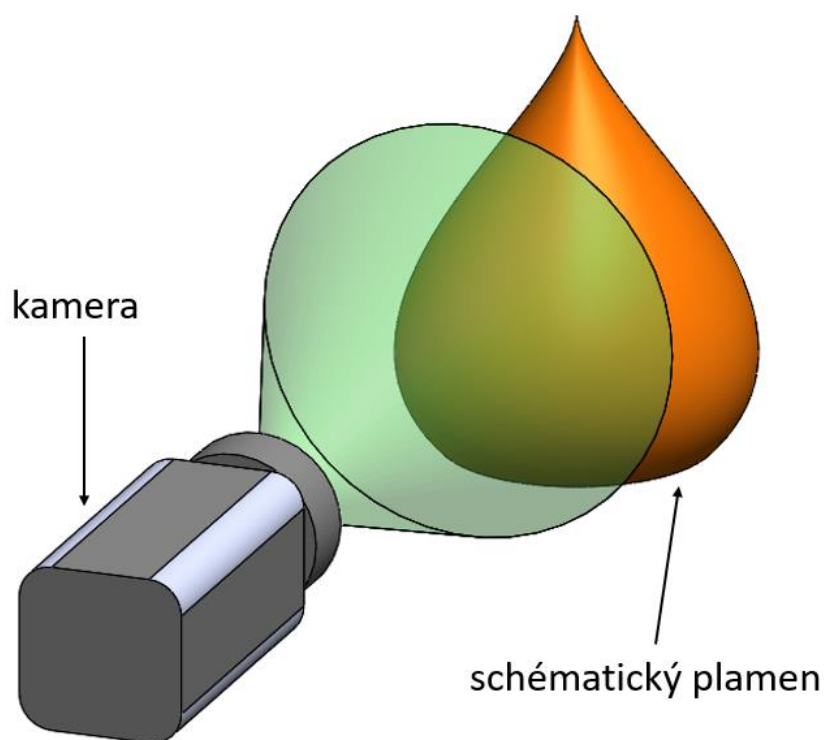


Obrázek 10 - porovnání histogramů pořízených dat - delší expozice (modrá) a kratší (červená) [12]

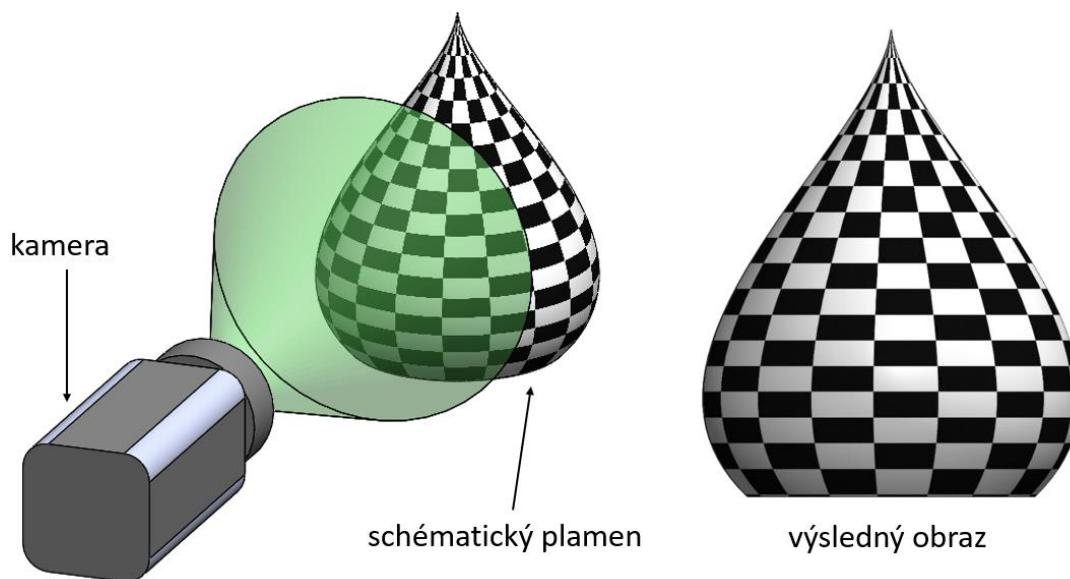
Výsledný Obrázek 10 ukazuje porovnání gradientu pro obě sady měření a vyplývá z něj, že pro delší dobu expozice je zde patrný jeho nárůst. [5] [6] [8] [9] [12] [14] [15]

### 3.3. Porovnání

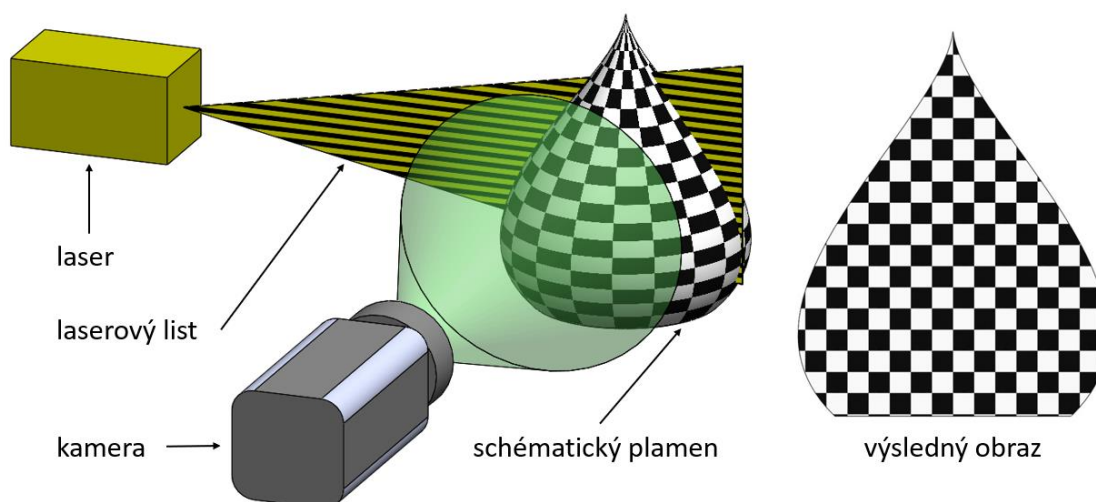
Základní a zásadní rozdíl mezi těmito dvěma metodami, co se týče vizualizace, je v zobrazení plamene. Pokud je plamen zjednodušen na stacionární 3D model zobrazený na Obrázek 11, poté zde používaná metoda chemiluminiscence hoření zobrazí plamen z čelního pohledu tak, jak je ukázáno na Obrázek 12. Dochází zde k malému zkreslení díky promítání trojrozměrného objektu do plochy. Oproti tomu LIF díky laserovému svazku, který je směřován nejčastěji rovinou procházející středem plamene a který zvýrazní radikály v rovině své působnosti, zobrazí plamen ve vybrané rovině řezu. Nedochozí tím k žádnému zkreslení výsledku. Tento případ je znázorněn na Obrázek 13.



Obrázek 11 - 3D stacionární schématický model plamene snímáný kamerou



Obrázek 12 - schématický model měření pomocí Chemiluminiscencí OH radikálů a model výsledného zobrazení



Obrázek 13 - schématický model měření pomocí LIF a model výsledného zobrazení

Laserem Indukovaná Fluorescence tedy již na první pohled dává realističtější pohled, nezkrasovaný tvarem plamene, ale je to také, oproti chemiluminiscenci, metoda náročnější na techniku, obsluhu i kalibraci.

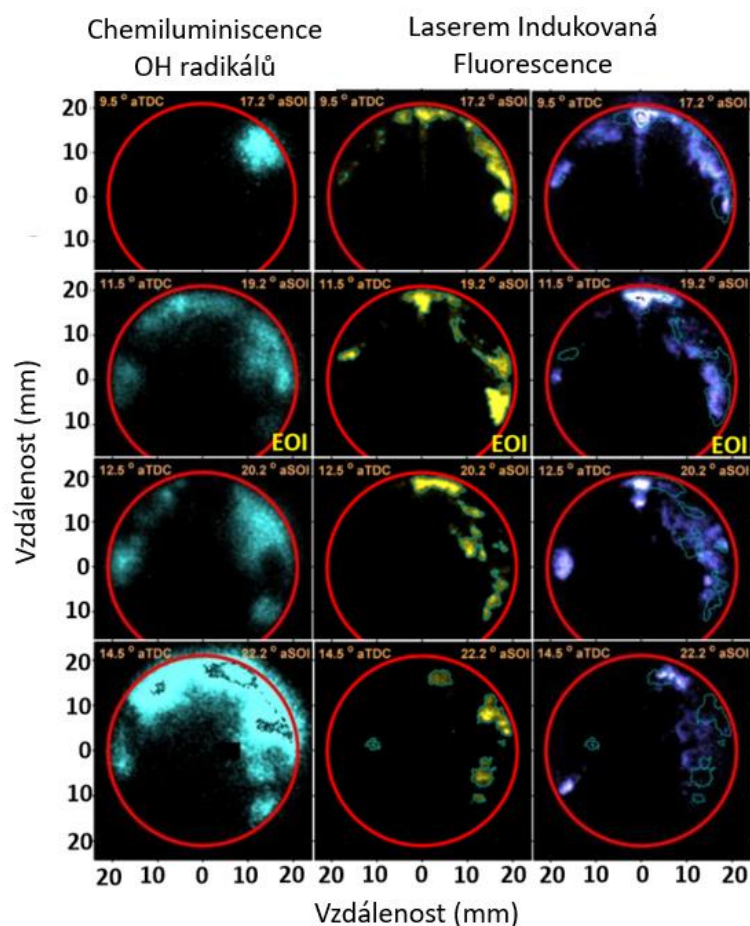
Při porovnávání obou výše uvedených metod se dá konstatovat, že vlnové délky OH radikálů získaných pomocí chemiluminiscence se obecně shodují s vlnovými délkami OH radikálů z měření pomocí metody LIF. Je také patrné, že každá zobrazovací diagnostika má

své vlastní výhody a nevýhody. Chemiluminiscenční zobrazování OH radikálů se snadno nastavuje a je efektivní v poskytování časového vývoje hoření. Nicméně zobrazování integrované do zorného pole postrádá turbulentní plamenové struktury a může být ovlivněno širokopásmovými emisemi. Na druhou stranu vlny LIF nejsou zkresleny působením emisí mimo rovinu a mohou zobrazovat turbulentní plamenové struktury ve vyšších detailech.

Integrované obrazy z chemiluminiscence OH radikálů jsou poměrně snadno nastavitelné a užitečné pro pochopení celkových struktur vývoje plamene. Vzhledem k tomu, že tato diagnostika zachycuje přirozeně se vyskytující OH radikály, je výborná při popisu horkých reakčních zón a vykazuje dobrou shodu s vysokou rychlostí uvolňování tepla. Nevýhodou je, že turbulentní struktury plamenů jsou u chemiluminiscenčních snímků rozmazané.

OH PLIF zobrazení vizualizuje základní stav OH radikálů pomocí externího (laserového) excitačního zdroje. Signály LIF neobsahují emise mimo rovinu a mohou zobrazit podrobnosti o turbulentních strukturách plamenů. Nicméně rušení signálu je významné, zejména z fluorescence paliva.

Když jsou snímky LIF pořízeny pro více vodorovných rovin z různých vzdáleností a porovnávány s chemiluminiscencí OH radikálů obrazem integrovaným do zorného pole, signály se dobře hodí pro celkový vývoj plamene. Obrazy LIF však poskytují více podrobností o prostorovém rozložení signálů z OH radikálů v horizontálním i vertikálním směru.



Obrázek 14 – porovnání vizuálních výsledků Chemiluminiscence OH radikálů a LIF [9]

Existují i další diagnostické metody spojené s hořením.

Vizualizace procesu hoření u paliv, které nemají fluorescenční vlastnosti, se provádí pomocí nástroje Tracer-LIF. Principem je přidání fluorescenční látky, například acetonu, do směsi. Sledovat lze vlastnosti jako je třeba distribuce paliva, jev zapalování nebo chování paliva při vstřikování.

Kombinace metod PIV a LIF již byla zmíněna. Pomocí speciální techniky je zajištěna synchronizace obou metod. Tímto způsobem lze zkoumané procesy studovat podrobněji a obsáhleji. Příklad využití této kombinace lze nalézt ve vizualizaci paliva a čela plamene.

Laser Induced Incandescence (LII) neboli Laserem Indukovaná Žárovzdornost je kvantitativní stanovení frakce objemu sazí. Pomocí softwaru se obdrží obraz pro získání přímých informací o objemu sazí a ekvivalentní koncentraci uhlíku. [5] [6] [8] [9] [12] [14] [15]

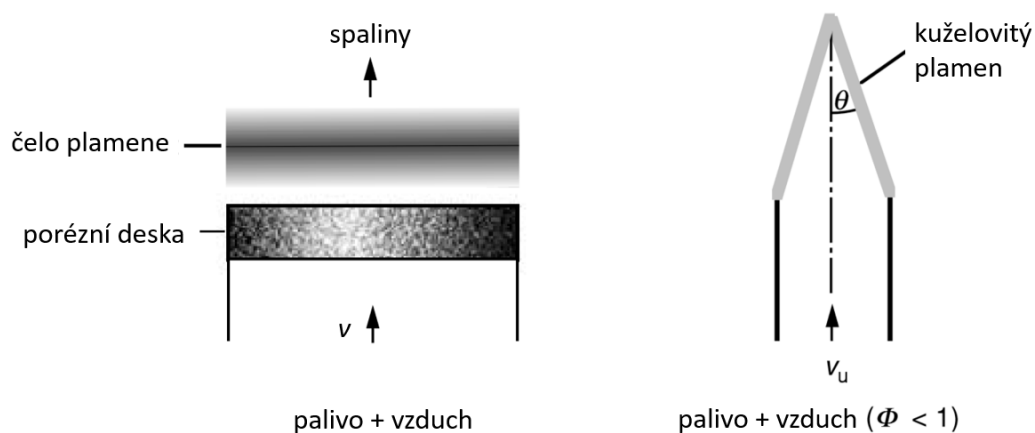


## 4. Spalování

Ve spalovacích procesech je mícháno palivo s oxidačním činidlem, což bývá nejčastěji vzduch, a dochází k hoření. Lze identifikovat několik typů spalování na základě toho, jestli jsou palivo a oxidant nejdříve smíchány a až poté dochází k hoření (s předmícháním) nebo zda dochází k současnému spalování a míchání (bez předmíchání). Každá tato kategorie je dále ještě rozdělena podle toho, jestli je proudění tekutiny při tomto procesu turbulentní nebo laminární. Tabulka 2 uvádí příklady pro každou z těchto skupin. Spalování v našem případě je laminární s předmícháním, a proto se jím budeme nadále zabývat.

míchání paliva/oxidačního činidla	pohyb tekutiny	příklad
s předmícháním	turbulentní	zážehový benzinový motor
		stacionární plynová turbína s nízkým obsahem NO
	laminární	plochý plamen
		Bunsenův plamen
bez předmíchání	turbulentní	spalování práškového uhlí
		letecká turbína
		diesellový motor
		H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> raketový motor
	laminární	hoření dřeva
		sálavé hořáky pro vytápění
		svíčka

Tabulka 2- Příklad typů spalování s ohledem na přípravu směsi a typ průtoku, podle [4]



Obrázek 15 – schématická ilustrace plochého plamene [4]

Předmíchané hoření/plamen je považován za stechiometrický, pokud se palivo (například uhlovodík) a oxidační činidlo (kyslík O<sub>2</sub>) navzájem zcela pohltnou a tvoří pouze oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>) a vodu. V systému může také palivo přebývat nebo může být naopak přebytek kyslíku.

Laboratorní kahan v tomto experimentu produkuje právě laminární plamen způsobený spalováním s předmícháním. Směs je tvořena palivem (propan-butan) a oxidačním činidlem (vzduch). Toto hoření je tedy stechiometrické a konečná stechiometrická rovnice (4.-1) a (4.-2) pro toto spalování je následující

Butan:



Propan:



Tyto rovnice jsou konečné, ale v průběhu spalování probíhá celá řada dílčích reakcí. Jednou z takových je vznik a zánik OH radikálů, které je možné pozorovat. Tohoto jevu je využito v této práci v chemiluminiscenční metodě. Tyto radikály totiž vznikají jako meziproduct při spalování uhlovodíků. Výhodou těchto OH radikálů je fakt, že se nacházejí jak na čele plamene, tak v odhořelé části. Proto je možné je detekovat a odlišit odhořelé a neodhořelé oblasti a zmapovat tak čelo plamene. [4]

## 5. Technika

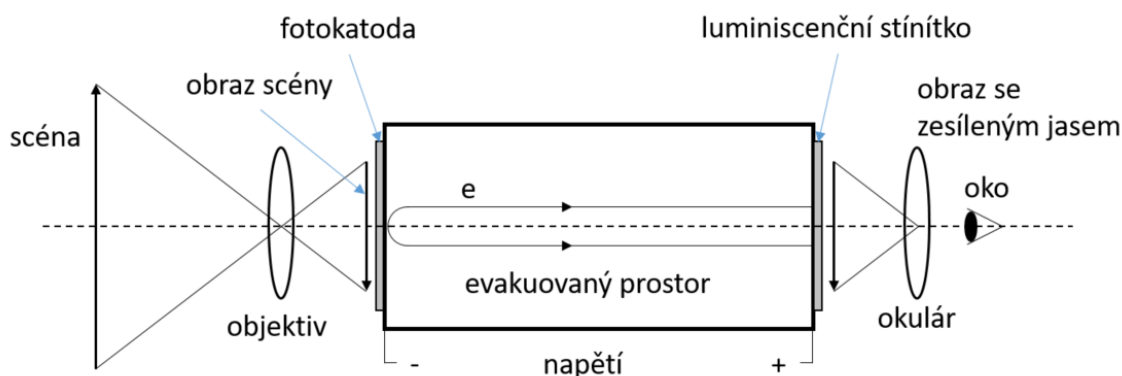
### 5.1. Zesilovač jasu obrazu

Zesilovač je nedílnou součástí techniky nutné pro vizualizaci spalovacích procesů pomocí chemiluminiscence. Druhů zesilovačů je celá řada a pro jejich rozdělení jsou použity čtyři kategorie neboli generace. Pro popis zesilovačů je zapotřebí definovat pojem jas obrazu. Jedná se o významnou fotometrickou veličinu definující vlastnost plošného zdroje světla.

Pokud je jas na ploše nerovnoměrně rozložen a je funkcí souřadnic, nebo také času, stává se taková plocha smysluplným obrazem a zdrojem informací. Pokud je objekt nebo scéna

pozorována za šera, část informace, předávaná jasnem, je pro pozorovatele ztracena. Zesilovače jasu jsou tedy zařízení odstraňující tento nedostatek a umožňující pozorovat scény i za zhoršených světelných podmínek bez zásadní ztráty informace.

Zesilovače jsou většinou elektronky využívající pro svou funkci emisi, sekundární emisi a luminiscenci. Jsou to tedy fotokatody, sekundární emitery a v posledním případě luminiscenční stínítka.



Obrázek 16 - Základní princip funkce zesilovače jasu obrazu, podle [10]

Na obrázku je základní princip zesilovače jasu obrazu. Na průhledné vstupní okno elektronky je promítnut obraz scény. Uvnitř elektronky, na evakuované straně, je nanesena tenká, poloprůhledná fotoemisní vrstva, tedy fotokatoda. Emise fotoelektronů je způsobena zářením absorbovaném ve fotokatodě. Na druhé straně elektronky, tedy naproti fotokatodě, je umístěno luminiscenční stínítko. Mezi těmito dvěma prvky se nachází elektrické pole, které je vyvoláno přiloženým napětím. Fotoelektrony jsou zrychleny a emitovány tímto polem a jejich energie je zvýšena natolik, že dopadem na stínítko vybudí luminiscenci. Tímto je docílen jev zesilovače. Tedy, že jas luminiscenčního záření je na výstupním okénku elektronky rozložen právě tak, jako v obrazu scény, ale je podstatně zvětšen oproti vstupu elektronky a scéně.

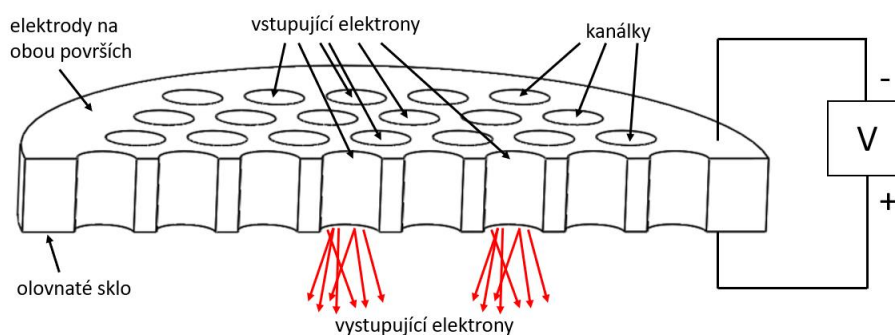
Při následném rozdělení zesilovačů neplatí, že generace IV je nejlepší a nejvyspělejší, ale každá má své výhody a nedostatky. V rozdělení je také brán ohled na experiment popisovaný v této práci, a proto se zaměřuje na první dvě generace.

## Generace I.

Tato první generace využívá pouze jedno elektrické pole pro zrychlení fotoelektronu od jednoho konce elektronky k druhému. Vyniká ovšem vysokou rozlišovací schopností, malým šumem a velkým dynamickým rozsahem neboli schopností rozlišovat a zpracovávat kontrast mezi tmavými a světlými místy obrazu. Zesílení těchto zesilovačů lze definovat jako poměr mezi dopadajícím a vystupujícím světelným tokem a zde je řádově několik stovek lumenů na lumen. Pro zaostření neboli fokusaci elektronového obrazu se používá jedna ze dvou následujících metod. Buď se luminiscenční stínítko umístí velmi blízko k emitujícímu povrchu fotokatody, pak se uspořádání označí jako proximitní (blízkostní) fokusace. Nebo se užije elektronová čočka pro fokusaci fotoelektronů do roviny stínítka.

## Generace II.

Oproti první generaci zesilovačů tato druhá využívá násobiče elektronů, který je založen na využití jevu popisujícím sekundární elektronovou emisi. Zde se zvýší energie původních fotoelektronů. Také se zvýší počet elektronů vystupujících z násobiče, a to vzhledem k počtu fotoelektronů. Násobení elektronů probíhá v tzv. MCP destičce (z anglického výrazu microchannel plate neboli kanálková destička). Ta je tvořena asi 0,5 mm tlustou destičkou z polovodivého skla a velkým počtem děr (kanálků) o průměru 6 až 10  $\mu\text{m}$ . Vnitřní strana kanálků je tvořena tenkou vrstvou vhodného materiálu s dostatečně velkým koeficientem sekundární emise. Jeden fotoelektron může způsobit průchodem přes MCP destičku emisi 4 až 6ti elektronů na výstupu. Do zesilovačů jsou vkládány 1 až 3 kanálkové destičky. Čím více je vloženo destiček, tím větší je zesílení, ale ztrácíme rozlišovací schopnost, která je závislá na rozptylu vystupujících elektronů.



Obrázek 17 - Kanálková destička, podle [10]

Rozlišovací schopnost, a tedy celkový dynamický rozsah, jsou u této generace menší ve srovnání s generací I. Zato zisk vyjádřený poměrem světelných toků je značně větší.

Do této generace spadá zesilovač Hamamatsu řady C9547 – 03L, který je použit v tomto experimentu.

Generace III.

Zde se využívá proximální fokusace v kombinaci s MCP destičkou a galium-arsenidovou katodou. Životnost zesilovače je tu na úrovni druhé generace, ale účinnost je obecně větší. V modrém oboru spektra pak není tato generace o mnoho lepší, než generace I.

Generace IV.

Tento termín je používán hlavně v USA a jedná se o generaci III., která je zbavena iontové pasti. Při nízkých hladinách osvětlení takto dosáhneme výborné citlivosti. [10]

## 5.2. Rám / laboratorní kahan

Celý rám je tvořen z převážné části profily od firmy AluTeckk. Sestává se z části nosné pro kahan a části zajišťující odvod spalin. V pozici za hořákem je uchycena stínící deska, aby mohl být plamen zřetelně pozorován proti kontrastnímu pozadí. Poslední díl konstrukce je otočný díl s ramenem, které nese pozorovací techniku. Rameno má osu otáčení v ose hořáku tak, aby bylo možné optimálně nastavit pozorovací techniku vzhledem k plamenu. Možnost zaaretovat rameno, jak v ose otáčení na mechanismu dodaném firmou AluTeckk, tak na otočném kolečku na druhé straně, zajišťuje stálost systému při měření.

Palivo dodává propan-butanová lahev umístěná pod laboratorním kahanem. Přívod paliva je regulován ventilem na lahvi a taktéž uzavíracím ventilem těsně pod hořákem. Kahan je navíc posuvný ve smyslu rotace podél svislé osy, což umožňuje regulaci přívodu vzduchu a taktéž regulaci plamene. Hořák byl pevně uchycen k loži na rámu. Rameno s měřicí technikou bylo umístěno do takové polohy, aby byl plamen zřetelně viditelný. Následně byla vyrovnána výšková dilatace mezi plamenem a osou měřicí techniky.

Rameno s měřicí technikou se skládá z pozorovací kamery, dále ze zesilovače jasů a filtru pro OH částice. Na zesilovač je připojen ještě manuální ovladač. Vše je propojeno skrz Timerbox do počítače. Ovládání systému je zprostředkováno softwarem Dantec DynamicsStudio.

### 5.3. Software

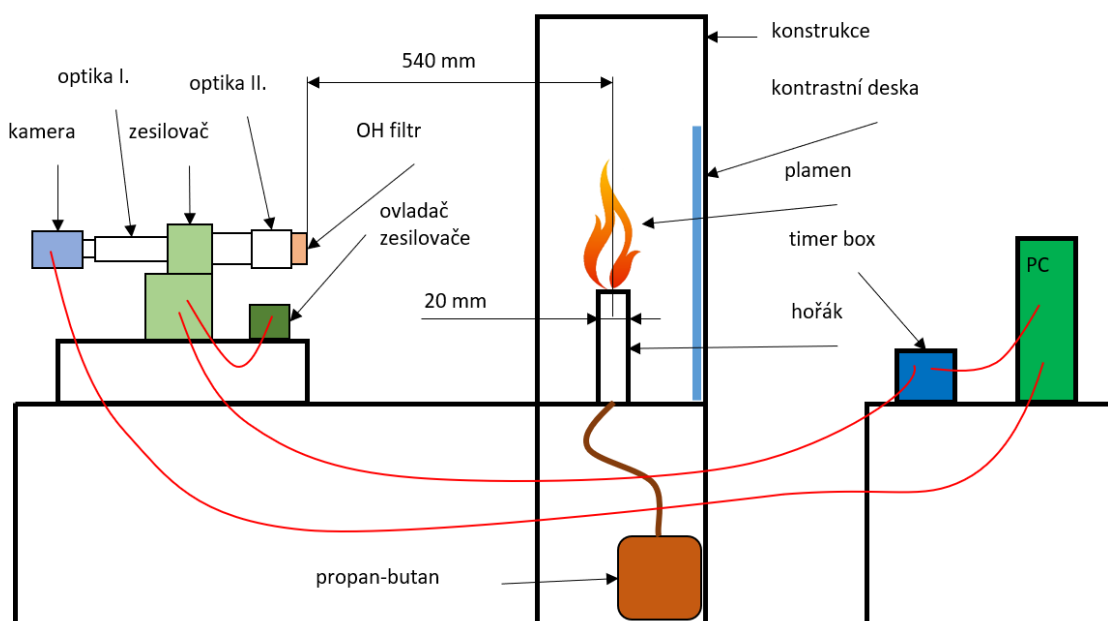
Hlavním softwarem pro kalibraci dat, jejich záznam a třídění byl použit program společnosti Dantec Dynamics – softwarová platforma DynamicsStudio. Tato platforma nabízí mnoho funkcí – od rutinní kalibrace měřicí techniky až po správu dat, analýzu a jejich prezentaci po úspěšném měření. Její databázová struktura zvládne pojmout velké množství dat se širokou škálou analytických modulů. Celá struktura je také velmi variabilní a může být přizpůsobena různorodým měřicím situacím a konfiguracím.

Zpracování dat získaných měřeními a exportovaných do formátu .tif z DynamicStudia, proběhlo pomocí programu MatLab.

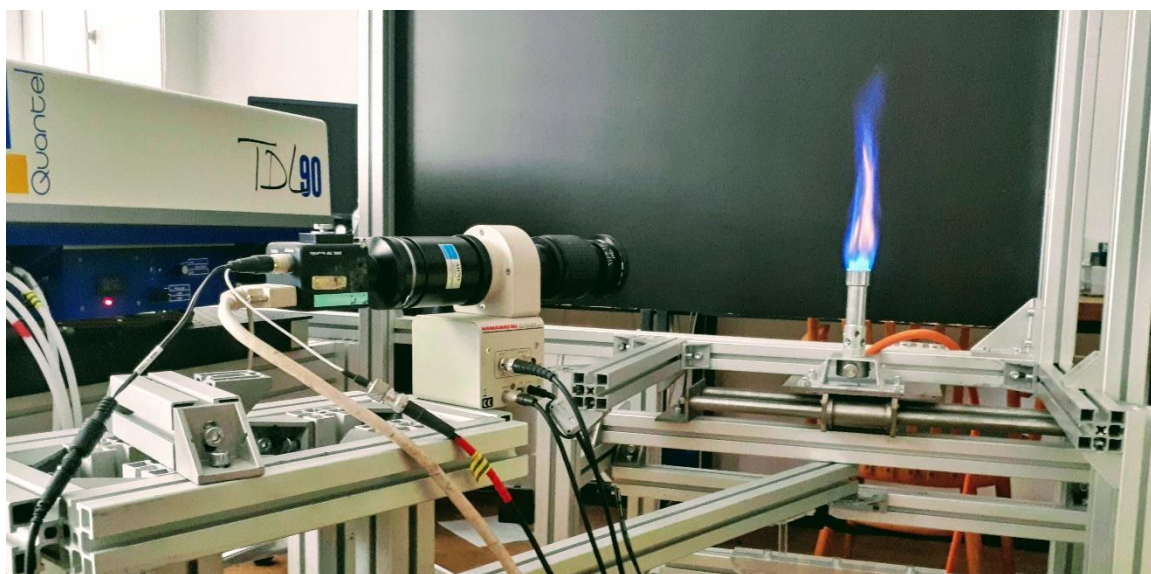
## 6. Experiment

Experiment byl prováděn v laboratořích ČVUT Fakulty strojní v Praze. Jeho úkolem bylo pomocí chemiluminiscenční metody vizualizovat meziproducty spalování při procesu hoření plynné směsi, v tomto případě propan-butanu. Experiment se skládá z nosného rámu, laboratorního kahanu s propan-butanovou kartuší, pozorovací optiky, timer boxu a počítače se softwarem Dynamics Studio. Optická sestava se skládala z kamery Dantec Dynamics FlowSense 4M MkII, zesilovače Hamamatsu C9547 03L, filtru OH částic a dvou optických částí umístěných za kamerou a zesilovačem. Tyto optické části jsou vyrobeny z křemičitého skla (quartz glass) pro propustnost vlnových délek v UV oblasti. Tato zakázková optika byla poskytnuta laboratořemi ČVUT bez známostí dalších parametrů.

Obrázek 18 ukazuje schéma experimentu a Obrázek 19 reálného měření v laboratoři.



Obrázek 18 – schéma experimentu pro vizualizaci spalování pomocí Chemiluminiscence OH radikálů



Obrázek 19 - experiment pro vizualizaci spalování pomocí Chemiluminiscence OH radikálů

## 6.1. Použitá technika

### 6.1.1. Kamera



Obrázek 20 – Kamera FlowSense 4M Mk II Dantec Dynamics [17]

K záznamu byla použita kamera FlowSense 4M Mk II společnosti Dantec Dynamics.

Rozlišení této kamery je 2048x2048 obrazových bodů, tedy 4 Megapixely. Bitová hloubka činí 12 bitů neboli 4096 stupňů šedi. V experimentu byla použita stupnice do 250 stupňů šedi, což je pro experiment dostačující. Použitá vzorkovací frekvence pro experiment 10 Hz.

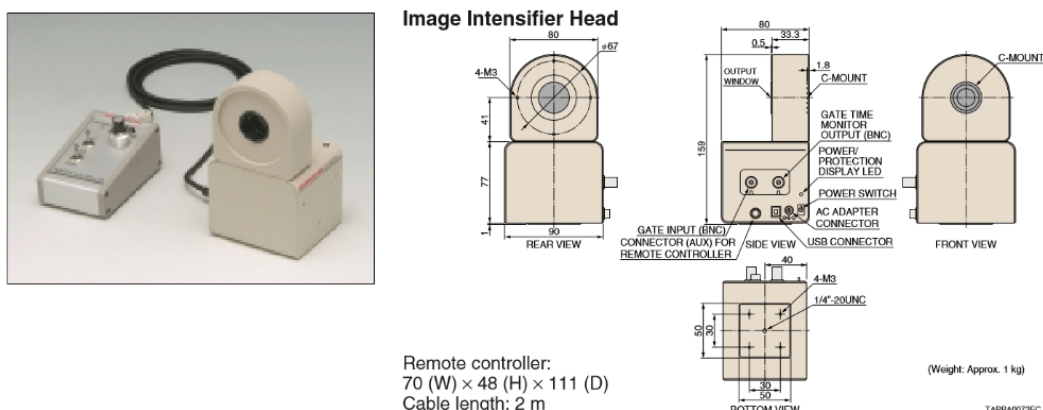
kamera	rychlost	rozlišení	rozlišení	rychlost snímání	velikost pixelu	bitová hloubka
	(8 bit)	(MP)	(Pixel x Pixel)	(ns)	( $\mu\text{m}$ )	(bit)
FlowSense EO 4M Mk II	32 (fps)	4	2,048 x 2,048	200	7,4	12

Obrázek 21 – hlavní parametry kamery FlowSense 4M Mk II Dantec Dynamics [17]



## 6.1.2. Zesilovač

### ③ C9547 Series : Input / Output Area: $\phi 25$ mm, High speed gating (5 ns / 10 ns to DC)



Obrázek 22 – schéma zesilovače Hamamatsu řady C9547 – 03L [13]

Zesilovač společnosti Hamamatsu řady C9547 – 03L umožňoval díky ovladači měnit hodnotu zesílení zesilovače. Luminofor v zesilovači je typu P43 – tedy fosfor. Obrázek 23 a 24 ukazují nalezení parametrů, kterými byl zesilovač pro tento experiment nastaven.

Figure 3: C9546 · C9547 series  
gate time input / output characteristics

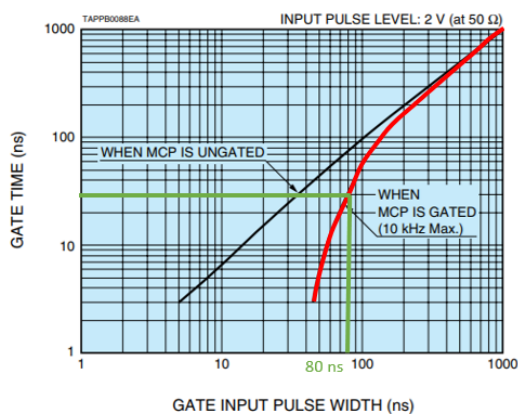
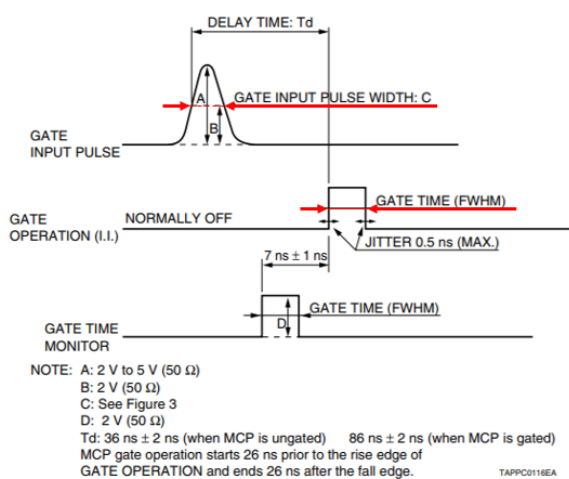
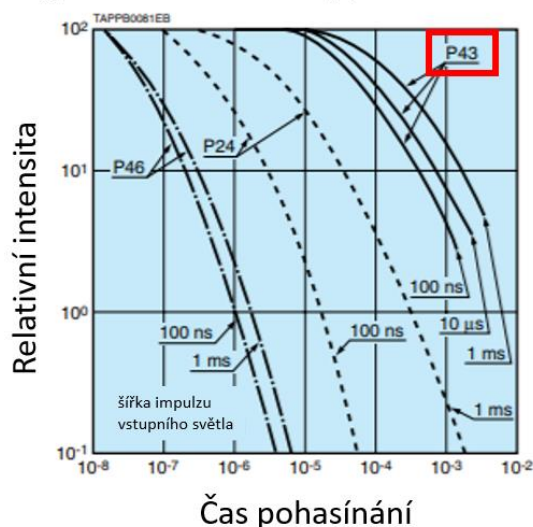


Figure 4: C9546 · C9547 series  
time sequence



Obrázek 23 – parametry zesilovače Hamamatsu řady C9547 – 03L [13]

## Typické charakteristiky pohasínání fosforu



Obrázek 24 – Typické pohasínání luminoforu pro zesilovač [13]

### 6.1.3. Filtr

Pro možnost pozorovat OH radikály při procesu hoření chemiluminiscenční metodou byl použit filtr OH částic. Použitý filtr má největší propustnost ve vlnové délce 310 nm. Byl dodán laboratořemi ČVUT a další parametry nejsou známy.

### 6.1.4. Časovač – Timer box

Pro synchronizaci dat z kamery a zesilovače společně se Softwarem Dynamic Studio byl použit časovač od téže společnosti. Časovač byl dodán laboratořemi ČVUT a jeho další parametry nebyly známy.

## 6.2. Průběh měření a vyhodnocování

Měření probíhalo v několika krocích stručně popsanych v následujících bodech:

1. Vytvoření experimentu v laboratořích ČVUT, sestavení a zapojení techniky
2. Prvotní měření za účelem kalibrace a synchronizace techniky
3. Zvolení parametrů a kombinací hodnot pro měření
4. Naměření dat pro zvolené hodnoty (100 snímků)
5. Export dat ve formátu .tif
6. Zvolení roviny pro vyhodnocování velikosti signálu

7. Sloučení signálu 100 snímků záznamu v řezu po řádcích do jedné matice
8. Vyhodnocení průběhu střední hodnoty pro sloučený signál
9. Zjištění velikosti maximálního gradientu pro každou sérii
10. Vybrání série s největším gradientem

Měření pomocí chemiluminiscenční metody obsahovalo velké množství sérií dat, a proto musel být vytvořen třídící systém s kódovými označeními pro jednotlivá měření. Tento systém je zobrazen v tabulce níže. Je v něm vidět vždy označení pod jedinečným kódem pro jednotlivé kombinace nastavení kamery, zesilovače a hodnoty gain – zesílení zesilovače. U kamery byl nastavován čas expozice (exposure time) v  $\mu\text{s}$ , u zesilovače zpoždění pulsu (gate pulse delay) v  $\mu\text{s}$ , a hodnota zesílení zesilovače. Následným zpracováním dat bude možné určit, které nastavení je pro chemiluminiscenční metodu, pro takto nastavený experiment, nejlepší pro další zpracování dat. Následná tabulka 3 ukazuje kompletní seznam pořízených záznamů.

kódová označení pro měření												
kód		Kamera - Čas expozice ( $\mu\text{s}$ )										
		715	812.5	910	1007.5	2015	5005	5005	7507.5	7507.5	10010	10010
Zesilovač - Zpoždění pulsu ( $\mu\text{s}$ )	0	101	201	301	401	501	601	601a	701a	701	801a	801
	-5							600				
	-500	102	202	302	402	502	602	602a	702a	702	802a	802
	-1000	103	203	303	403	503	603	603a	703a	703	803a	803
	-1500	104	204	304	404	504	604	604a	704a	704	804a	804
	-2000	105	205	305	405	505	605	605a	705a	705	805a	805
	-2500	106	206	306	406	506	606	606a	706a	706	806a	806
	-3000	107	207	307	407	507	607	607a	707a	707	807a	807
	-3500	108	208	308	408	508	608	608a	708a	708	808a	808
	-4000	109	209	309	409	509	609	609a	709a	709	809a	809
	-5000	110	210	310	410	510	610		710a	710	810a	810
	gain (%)		50	50	50	50	50	50	100	30	50	30

Tabulka 3 - kódová označení pro měření - kompletní

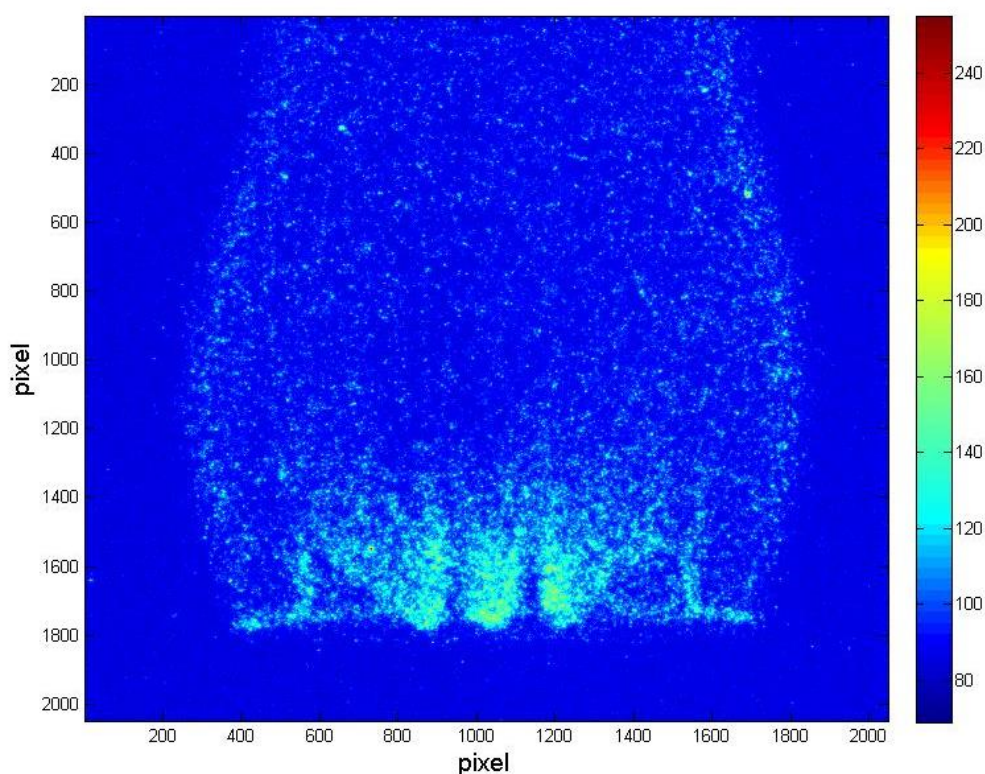
### 6.2.1. Vysvětlení tabulky kódových označení

První číslo kódu značí nastavení kamery, druhá dvě poté nastavení zesilovače. V tomto pořadí byla i měření prováděna. Dodatečné písmeno „a“ u některých sérií značí opakování

měření s odlišnou hodnotou zesílení zesilovače. Tyto hodnoty byly určeny pro odhad prvotního nastavení.

Záznam s označením 600 vznikl pro prvotní odhad nastavení a dále již nebude zapotřebí. Pro průběh experimentu byl nicméně podstatný, a proto je zde uváděn v šedém řádku.

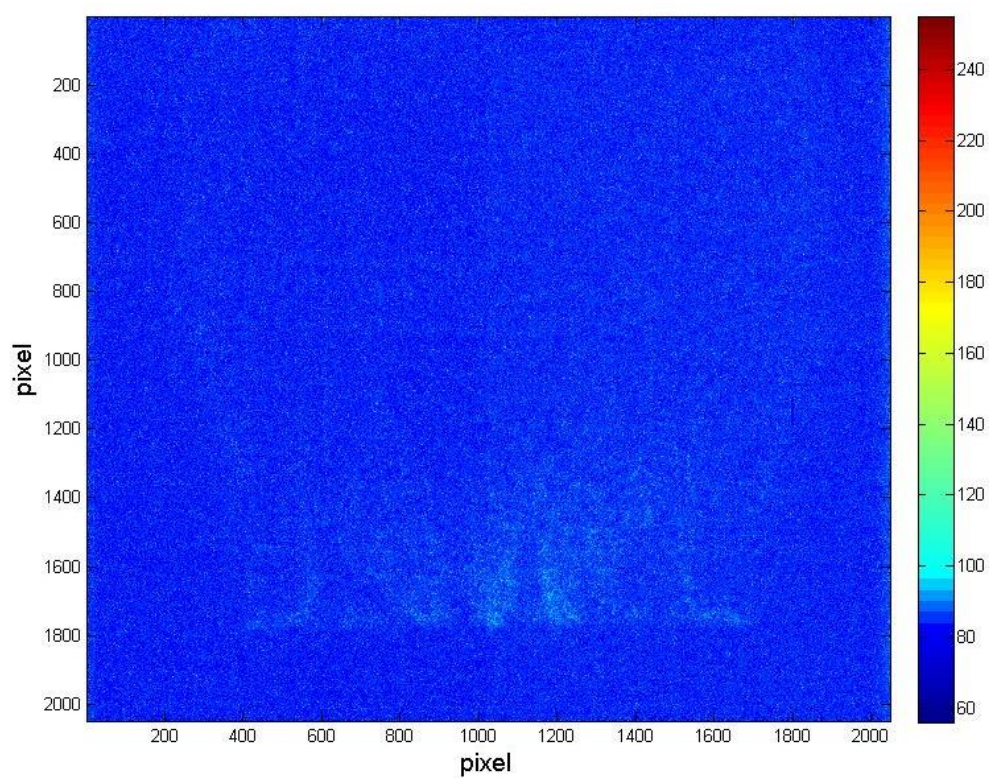
Série záznamů 601a – 609a také dále nebude zpracovávána, protože záznam nebyl, jak je vidět dále, zřetelný a čitelný (Obrázek 25). Toto je způsobeno řešením kahanové hlavice, Obrázek 26. Ta obsahuje na výstupu mřížku, která utváří vnitřní strukturu plamene. Bylo tedy nutné nastavit měřící techniku tak, aby směr optiky byl shodný se směrem mřížky na kahanu. Dále byla také pro další měření upravena hodnota zesílení zesilovače, která při vysokých hodnotách zesilovače, v nastavené hodnotě 10 %, nezobrazovala viditelné výsledky (Obrázek 27).



Obrázek 25 - zkreslení měřením přes mřížku - měření 605a obraz 6/100

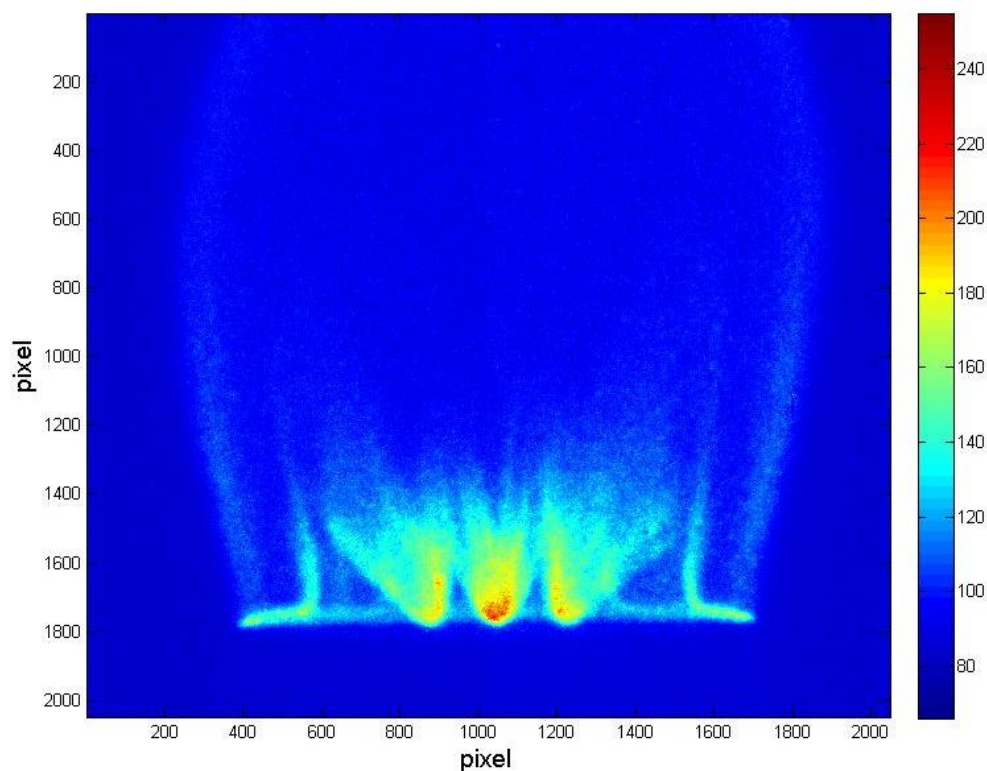


Obrázek 26 - pozorování přes mřížku a ve směru mřížky hořáku



Obrázek 27 - nevhodné nastavení hodnoty zesílení zesilovače – měření 609a obraz 6/100

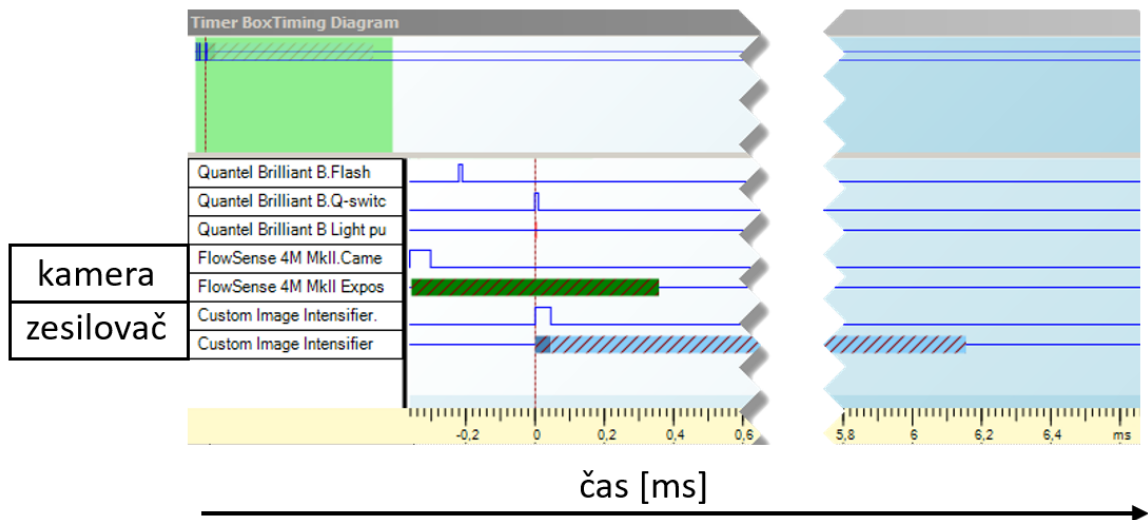
Oproti tomu správně zaznamenaná data pomocí chemiluminiscence tvoří již na první pohled zřetelné obrysy plamene a vypadají například následovně (Obrázek 28):



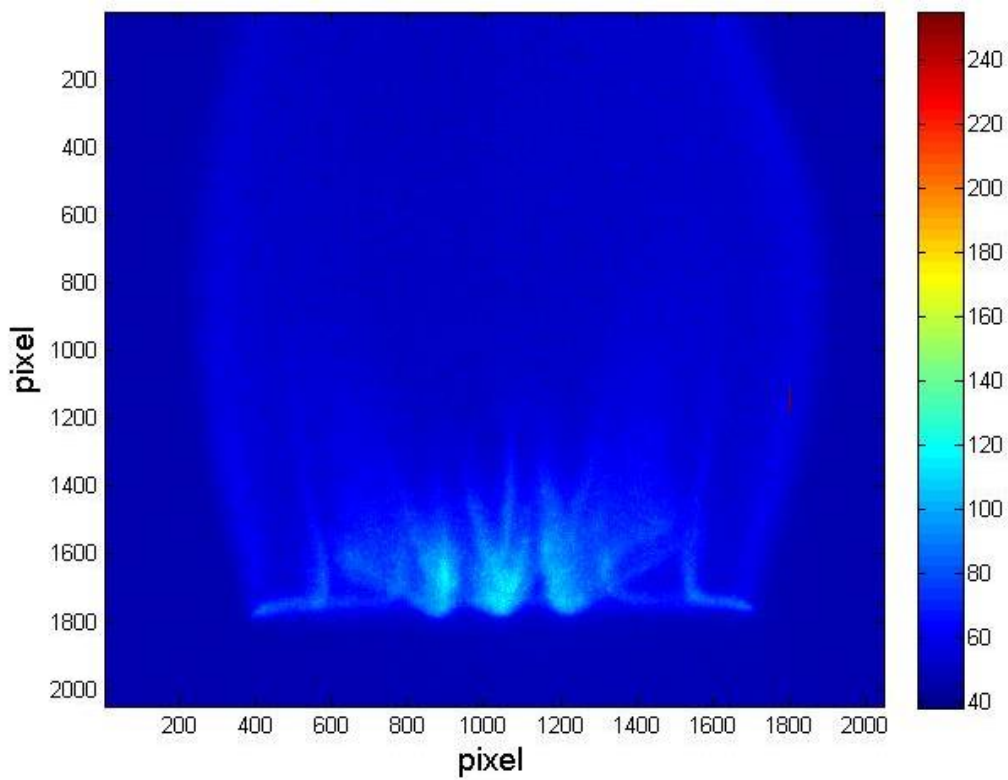
Obrázek 28 - správné zobrazení chemiluminiscence - měření 110 obraz 6/100

### 6.2.2. Vyhodnocení jedné série

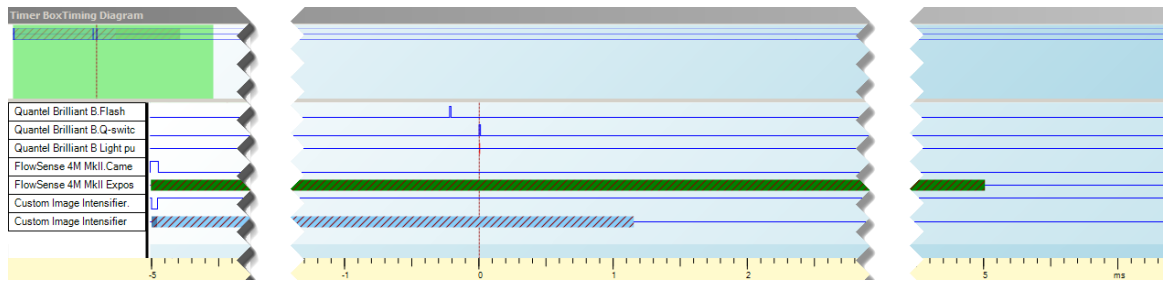
Jedna série dat, tedy například série s označením 101, obsahovala 100 snímků zachycujících během několika sekund vývoj plamene v čase. Byl pořízen časový diagram synchronizace nastavení zpoždění zesilovače oproti kameře z programu Dynamics Studio (Obrázek 29 a 31). FlowSense 4M MkII je nastavení pro kameru, Custom Image Intensifier je nastavení pro zesilovač. Pořízená data/snímky byla následně exportována ve formátu .tif do složek podle tabulkové struktury. Příklad výsledku je ze série 101 (Obrázek 300) a pro porovnání obrazový záznam ze série 810 (Obrázek 32). Tedy měření z opačných konců nastavení.



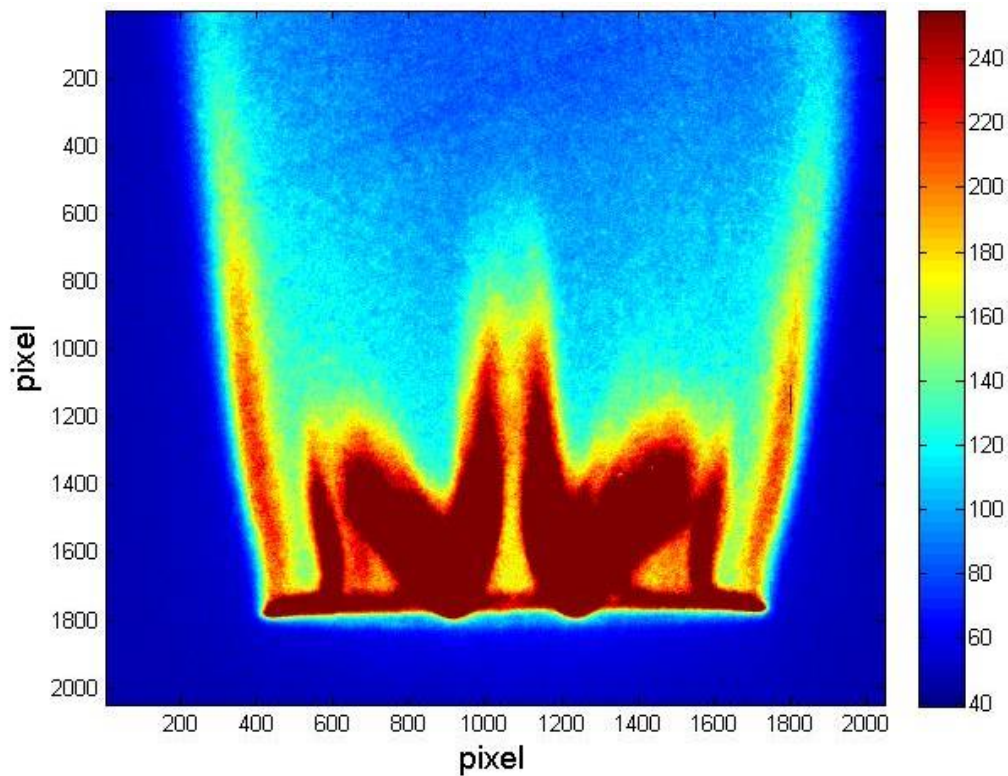
Obrázek 29 - grafické znázornění nastavení zesilovače a kamery pro sérii 101



Obrázek 300 - měření 101 obraz 50/100



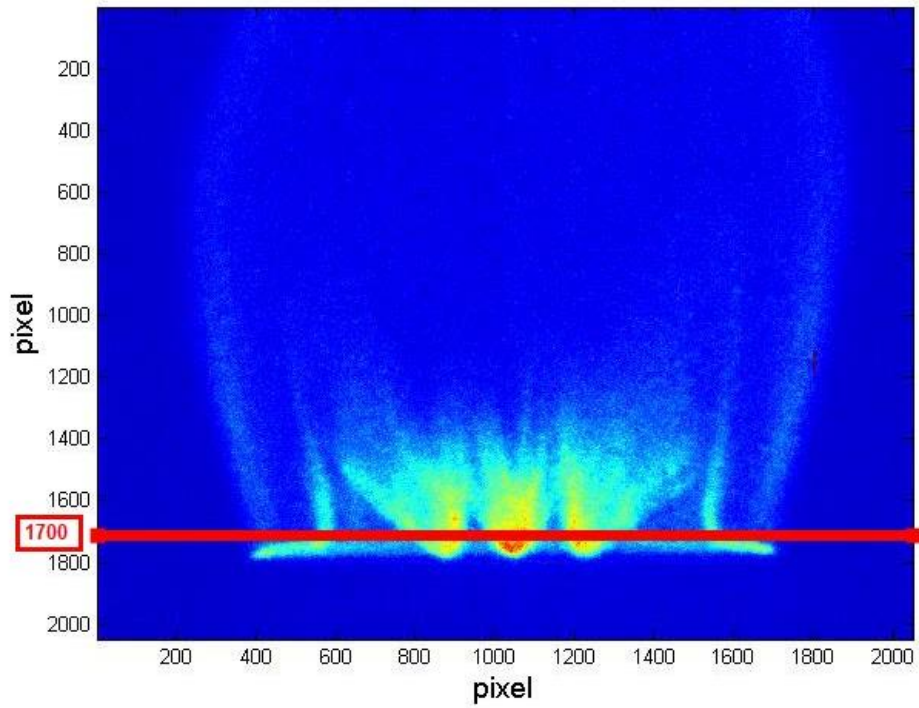
Obrázek 31 - grafické znázornění nastavení zesilovače a kamery pro sérii 810



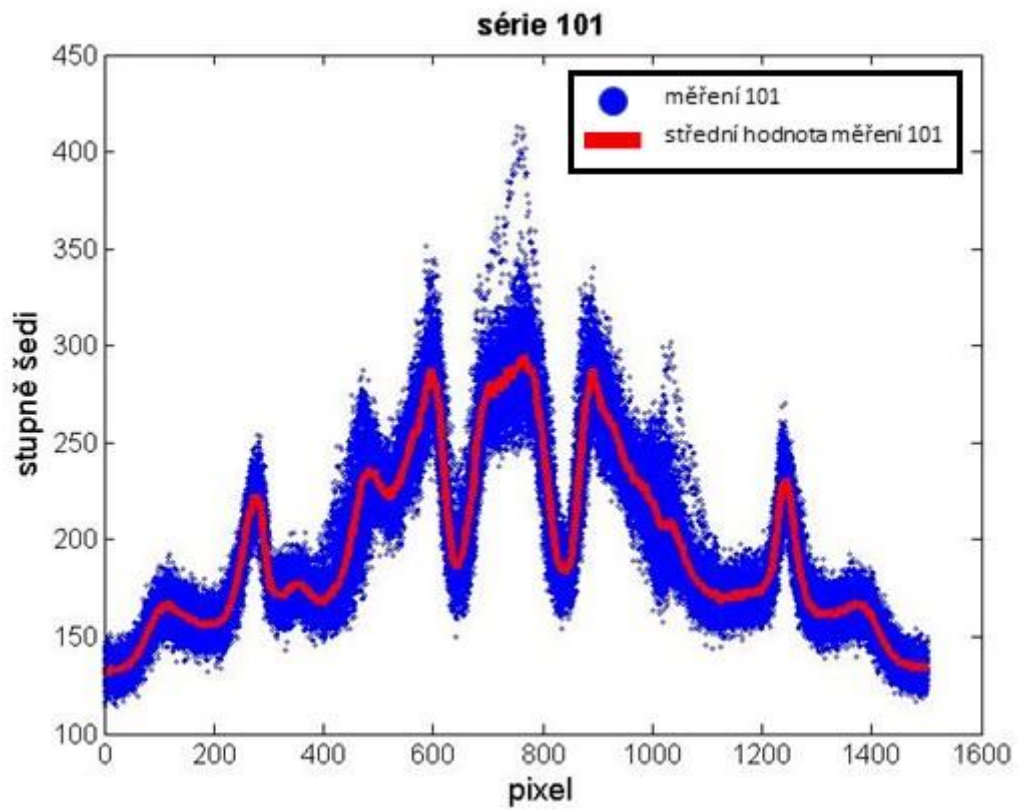
Obrázek 32 - měření 810 obraz 50/100

Následně proběhlo vyhodnocení v programu Matlab. Pro každou sérii byl vyhodnocen signál v řezu pro všech 100 snímků série, který byl následně sloučen po řádcích do jedné matice, ze které byla vyhodnocena střední hodnota. V grafech je sloučení signálů všech 100 snímků zobrazeno modrou barvou a střední hodnota červenou. Data byla vybrána ve vodorovné rovině v hodnotě 1700 pixel, jak ukazuje (Obrázek 33), protože je zde vizuálně signál nejsilnější. Výsledek lze vidět níže na grafu 1. Následný graf 2 pak ukazuje opět srovnání série 101 se sérií 810 z opačného konce tabulky.

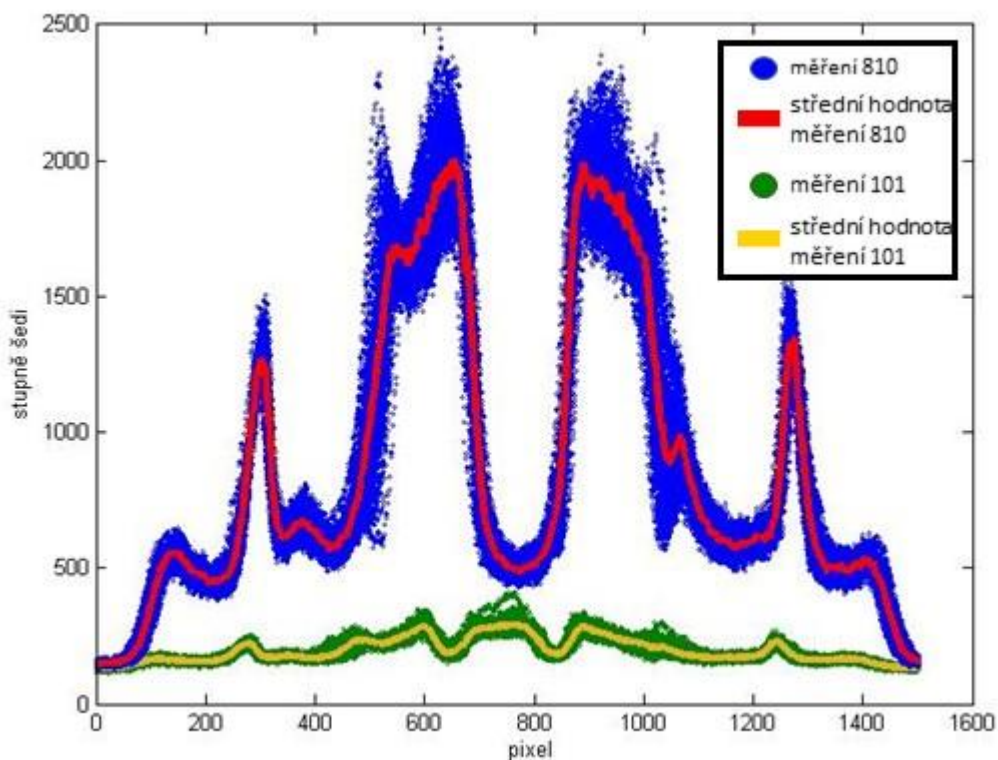




Obrázek 33 – hodnota roviny řezu pro určení velikosti signálu – 1700 pixel



Graf 1 – vyhodnocení série 101



Graf 2 – porovnání série 101 a 810

Po vyhodnocení všech sérií byla vybrána metoda největšího gradientu. Ta je teoreticky popsána v kapitole 3.2 Laserem Indukovaná Fluorescence (LIF). V rámci názornosti je v tomto experimentu zvoleno řešení v jedné ose  $x$ , a proto je možno rovnici (6.2.2.-1) použít ve zkrácené podobě, kde je použita pouze jedna část pro stanovení maximální hodnoty gradientu na průběhu střední hodnoty.

$$\nabla f(x, y) = \frac{\partial f}{\partial x} \quad (6.2.2.-1)$$

Byla také sestavena nová organizační tabulka pro potřeby vyhodnocení nejlepšího nastavení. V té jsou zahrnuty pouze série měření, které byly pro vyhodnocení relevantní. Obdobná tabulka ukazuje hodnoty maximálního gradientu pro střední hodnotu odpovídající série.

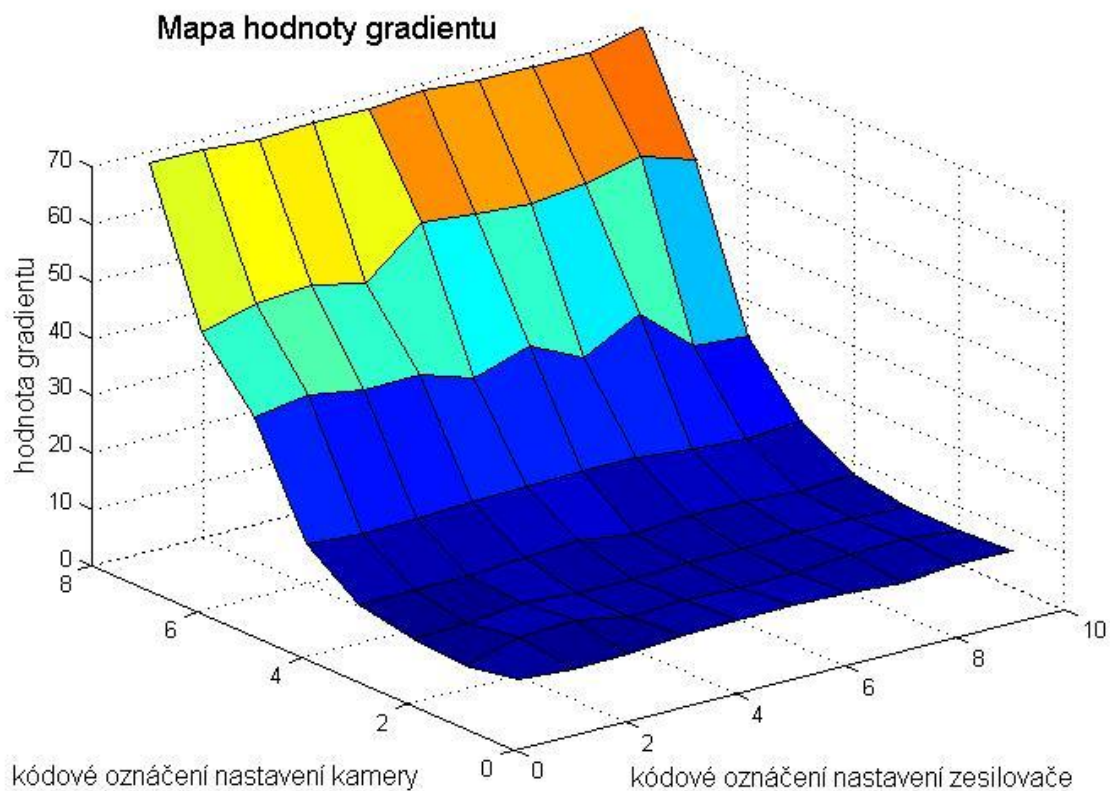
kódová označení pro vyhodnocení gradientu									
kód		Kamera - Čas expozice ( $\mu\text{s}$ )							
		715	812.5	910	1007.5	2015	5005	7507.5	10010
Zesilovač - Zpoždění pulsu ( $\mu\text{s}$ )	0	101	201	301	401	501	601	701	801
	-500	102	202	302	402	502	602	702	802
	-1000	103	203	303	403	503	603	703	803
	-1500	104	204	304	404	504	604	704	804
	-2000	105	205	305	405	505	605	705	805
	-2500	106	206	306	406	506	606	706	806
	-3000	107	207	307	407	507	607	707	807
	-3500	108	208	308	408	508	608	708	808
	-4000	109	209	309	409	509	609	709	809
	-5000	110	210	310	410	510	610	710	810
gain (%)		50	50	50	50	50	50	50	50

Tabulka 4 - kódová označení pro vyhodnocení gradientu

hodnoty gradientu										
GRADIENT		Kamera - Čas expozice ( $\mu\text{s}$ )								
		1	2	3	4	5	6	7	8	
		715	812.5	910	1007.5	2015	5005	7507.5	10010	
Zesilovač - Zpoždění pulsu ( $\mu\text{s}$ )	1	0	5,925	4,305	5,015	6,805	13,540	31,840	42,700	68,190
	2	-500	5,175	6,685	5,160	7,130	12,810	33,070	45,240	68,205
	3	-1000	5,265	7,340	6,360	7,055	13,020	31,600	46,090	67,580
	4	-1500	6,080	5,505	5,480	7,740	13,540	31,900	43,850	68,120
	5	-2000	6,395	5,525	6,130	7,050	13,995	31,900	51,105	68,825
	6	-2500	6,515	5,525	6,130	7,050	13,995	31,900	51,105	68,825
	7	-3000	6,120	5,825	5,855	7,740	14,025	27,340	50,530	68,030
	8	-3500	5,665	6,605	6,415	7,825	13,065	32,640	51,595	67,865
	9	-4000	6,345	6,660	6,230	7,145	12,110	24,595	53,725	67,745
	10	-5000	6,140	5,760	5,980	7,620	13,185	23,775	50,705	69,955
gain (%)		50								

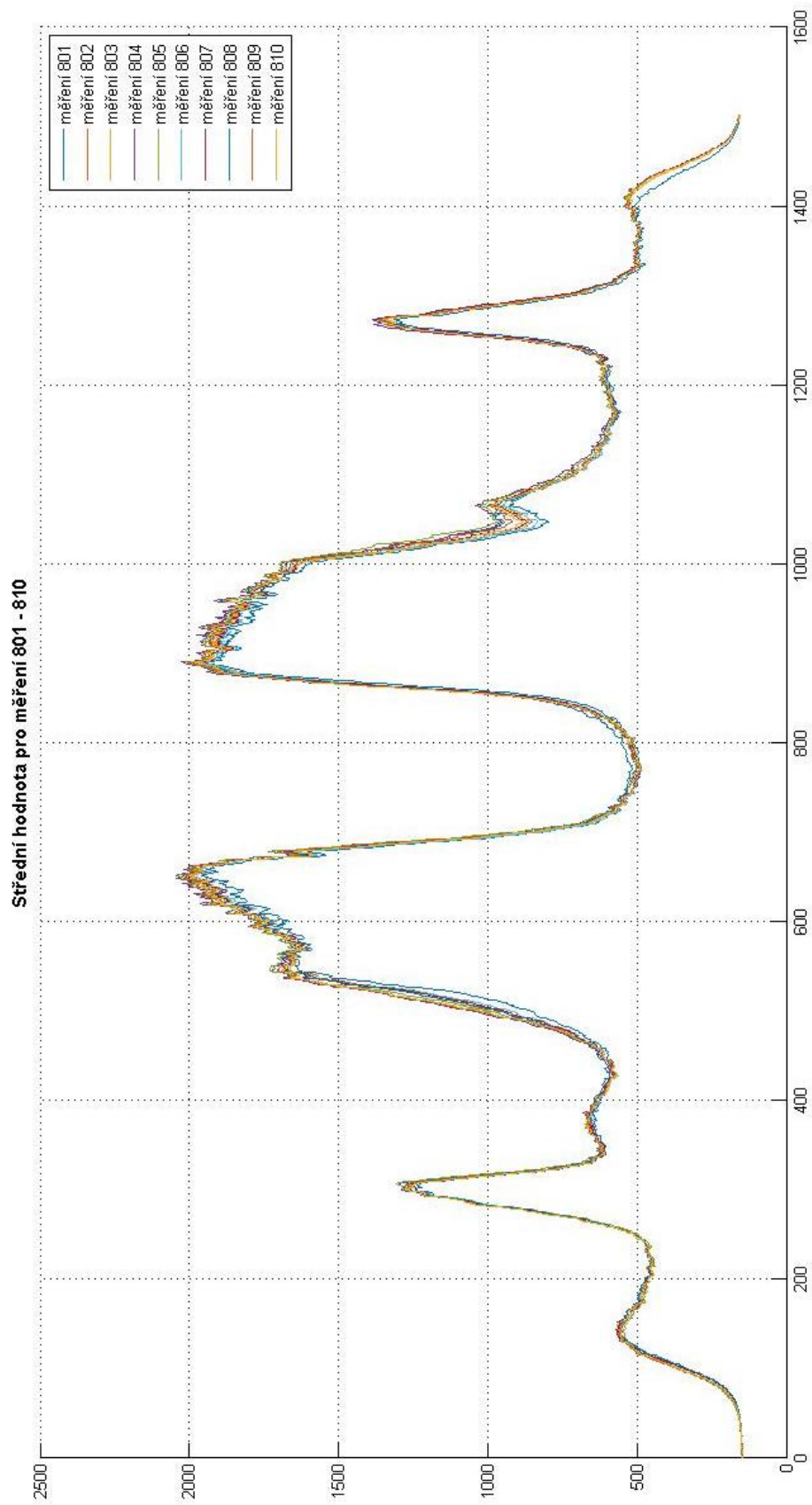
Tabulka 5 - hodnoty gradientu

Grafické znázornění mapy velikostí gradientů (graf 3) pro jednotlivé série jasně ukazuje, že největší gradient se nachází po celé sérii 8. Tedy pro nastavení expozice kamery 10.010  $\mu$ s a zpoždění pulsu zesilovače od 0  $\mu$ s do 5.000  $\mu$ s.



*Graf 3 – pole velikostí gradientů – hodnoty pro kódová označení v tabulce 5*

Vyrovnanost velikosti gradientu v poslední sérii lze doložit grafem středních hodnot pro série 801 – 810. A také grafem 4 velikosti gradientů pro tuto řadu.

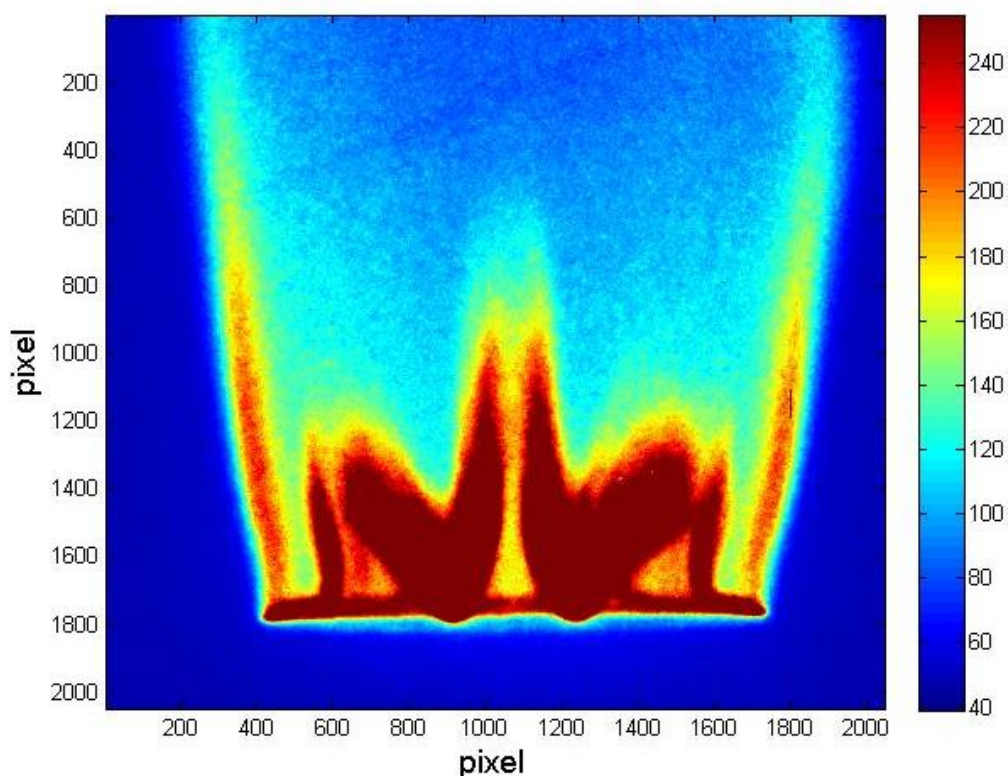


Graf 4 – střední hodnota pro měření 801 - 810

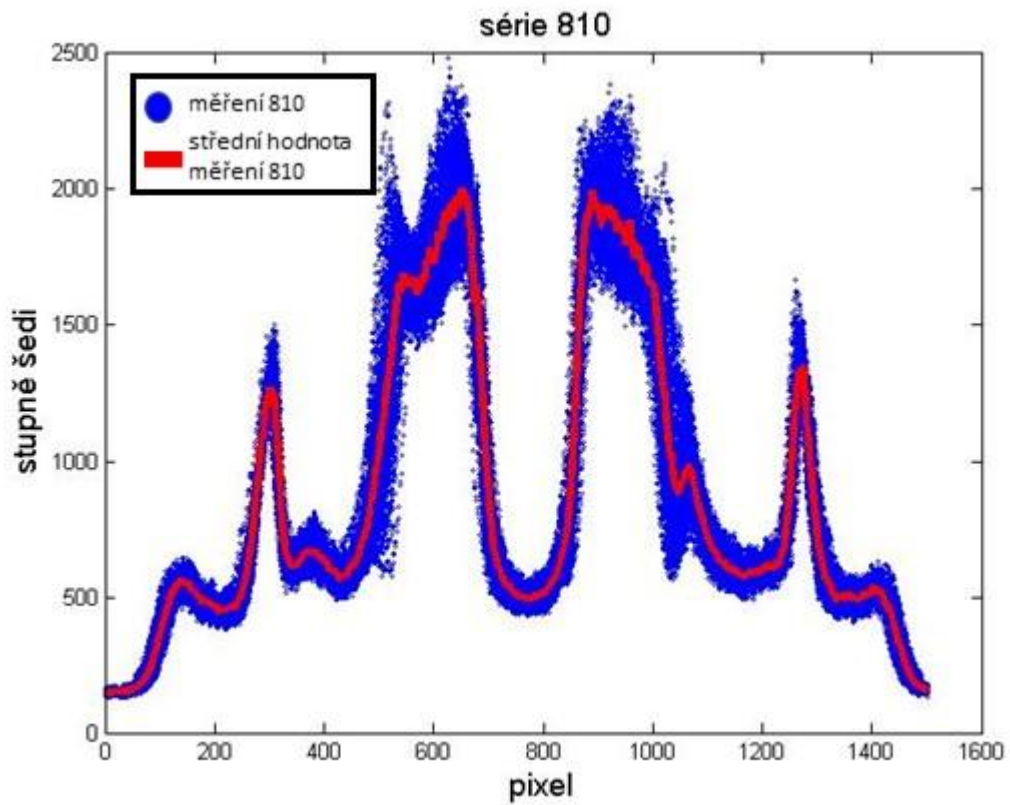
Z předešlých interpretací zvolené metody největšího gradientu vyplývá, že nejlepší nastavení pro tento experiment je 810, jelikož má největší hodnotu gradientu, tedy 69,955. Vzhledem k velmi shodným hodnotám lze ale říci, že celá série 8, tedy nastavení expozice kamery 10.010  $\mu\text{s}$ , je pro měření hoření pomocí chemiluminiscence v podmínkách tohoto experimentu vhodná.

### 6.2.3. Série 810

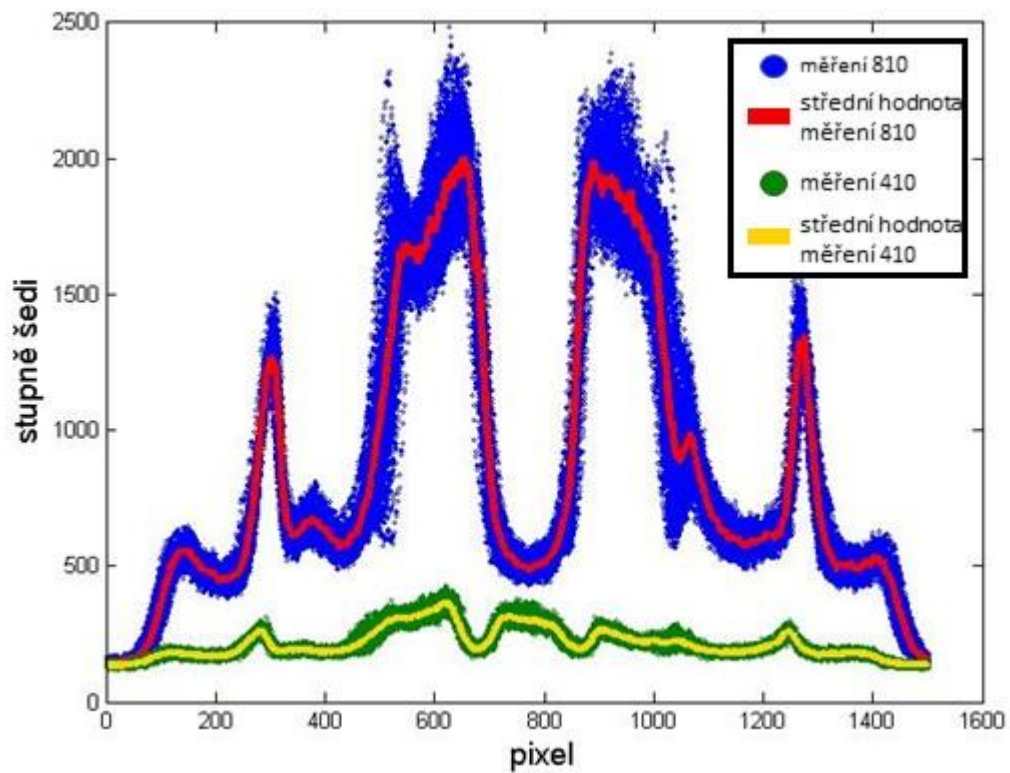
Série 810 byla vyhodnocena jako nejlepší v podmínkách tohoto experimentu. Hodnota nastavení expozice kamery zde je 10.010  $\mu\text{s}$  a zpoždění pulsu zesilovače 5.000  $\mu\text{s}$ . Níže je uveden chemiluminiscenční záznam z kamery (Obrázek 34), vyhodnocení série všech 100 snímků s vyznačenou střední hodnotou a porovnání série 810 s 410 (graf 5- 6). V sérii 410 je stěžejní parametr – hodnota expozice kamery – asi v desetinové výši, tedy 1.007,5  $\mu\text{s}$ .



Obrázek 34 - měření 810 obraz 50/100



Graf 5 - vyhodnocení série 810



Graf 6 - porovnání série 410 a 810

## 6. Závěr

Tato práce měla za úkol zabývat se vizualizací meziproduktů spalování při procesu hoření plynné směsi. Byla zpracována rešerše na téma vizualizace spalovacích procesů pomocí Chemiluminiscence a Laserem Indukované Fluorescence (LIF). Úvodní část práce je rešerše, která se zabývá fyzikální podstatou obou metod, tedy luminiscenčním, fotoluminiscenčním, fluorescenčním a chemiluminiscenčním jevem. Jsou znázorněny obecné fyzikální principy a poznatky v návaznosti na pozdější využití v experimentu. Díky těmto znalostem z rešeršní práce bylo v laboratořích Fakulty strojní ČVUT v Praze sestaveno měřicí stanoviště, které nabízelo možnosti měření jak pro chemiluminiscenční metodu, tak pro Laserem Indukovanou Fluorescenci.

Pro experiment bylo vybráno měření pomocí Chemiluminiscenční metody. Připravení experimentu v laboratoři sestávalo z vybrání vhodné měřicí a pozorovací techniky a konstrukčního řešení sestavení experimentu. Byly vybrány dva parametry, kterými lze výsledky měření ovlivňovat. Jedná se o expozici kamery a zpoždění pulsu zesilovače. Pro ně byla zvolena kombinace, s ohledem na smysluplnost výsledků, celkem 90ti sad měření. V každé se nacházelo 100 snímků sledovaného plamene pořízených s vzorkovací frekvencí 10 Hz. Grafickým zpracováním každé sady v programu Matlab byla získána střední hodnota signálu ve stupních šedi. Následně byla použita metoda největšího gradientu středních hodnot signálů pro výběr optimálního nastavení. Po sestavení mapy největšího gradientu bylo patrné, že nejlepší nastavení pro chemiluminiscenční měření v podmínkách tohoto experimentu je měření s označením 810. Konkrétně se tedy jedná o nastavení expozice kamery 10.010  $\mu$ s a zpoždění pulsu zesilovače 5.000  $\mu$ s. Hodnota zesílení zesilovače byla při měření na hodnotě 50 %.

Z výsledků je patrné, že vhodnost nastavení nejvíce ovlivňuje expozice kamery, naopak nastavení zesilovače nemá velký vliv. Tento fakt dokládá obdobná hodnota nejvyššího gradientu pro všechny sady měření se stejným nastavením expozice kamery.

Tato práce pro experiment sestavený v laboratořích ČVUT určila ideální nastavení Chemiluminiscenční metody, které je možné využít pro další zpracování, například detekci hrany plamene.



Byly tedy splněny cíle práce vytečené v úvodu, kdy byl zpracován fyzikální základ pro metody schopné vizualizovat procesy hoření. Bylo provedeno kvalitativní měření a jeho výsledky přehledně vizualizovány a zpracovány pomocí metody největšího gradientu.

## Bibliografie

- [1] GREMLICA, Miroslav. Fluorescenční spektrofotometrie a její aplikace v materiálově orientovaných vědách. Zlín, 2010. Bakalářská práce. Univerzita Tomáš Bati vez Zlíně. Vedoucí práce Prof. Ing. Lubomír Lapčík, Ph.D.
  
- [2] BOZKURT, Metehan. Shock-tube investigation of key reactions for chemiluminescence in various combustion systems [online]. Duisburg-Essen, 2013 [cit. 2018-08-22]. Dostupné z: [https://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-33505/Bozkurt\\_Dissertation.pdf](https://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-33505/Bozkurt_Dissertation.pdf). Disertace. University of Duisburg-Essen.
  
- [3] DIVÍŠKOVÁ, Eva. Využití chemiluminescence ve studiu biooxidace sirných látek. Brno, 2006. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, Katedra biochemie. Vedoucí práce Doc. Ing. Martinu Mandlovi, CSc.
  
- [4] WARNATZ, J., U. MAAS a Robert W DIBBLE. Combustion: physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation. 4th ed. New York: Springer, c2006. ISBN isbn3-540-25992-9.
  
- [5] KOHSE-HÖINGHAUS, Katharina. Laser techniques for the quantitative detection of reactive intermediates in combustion systems: Progress in Energy and Combustion Science [online]. 1994, , 203-279 [cit. 2018-08-22]. ISSN 0360-1285. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360128594900159>
  
- [6] F., Grisch a Orain M. Role of Planar Laser-Induced Fluorescence in combustion research: Optical Diagnostics of Flows. AerospaceLab Journal [online]. 2009 [cit. 2018-08-22]. Dostupné z: <http://www.aerospacelab-journal.org/al1/Role-of-Planar-Laser-Induced-Fluorescence-in-combustion-research>
  
- [7] VRBOVÁ, Miroslava, Helena JELÍNKOVÁ a Petr GAVRILOV. *Úvod do laserové techniky*. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01108-9.

- [8] SCHULTZ, Christof a Volker SICK. Tracer-LIF diagnostics: quantitative measurement of fuel concentration, temperature and fuel/air ratio in practical combustion systems: *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2005, Pages 75-121 [cit. 2018-08-22]. ISSN 0360-1285. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128504000619>
- [9] M.K., Le, Kook S., Chan Q.N. a Hawkes E.R.: *Comparison between OH\* Chemiluminescence and OH Planar Laser-Induced Fluorescence Images in a Light-Duty Optical Diesel Engine* [online]. 2014 [cit. 2018-08-22]. Dostupné z: <https://people.eng.unimelb.edu.au/imarusic/proceedings/19/434.pdf>
- [10] JEDLIČKA, Miroslav. Zesilovače jasu obrazu. *Světlo: časopis pro světlo a osvětlování* [online]. 2006 [cit. 2018-08-22]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/zesilovace-jasu-obrazu--16166>
- [11] WELSH, Emma. What is chemiluminescence?. *Science in School: The European journal for science teachers* [online]. 2011 [cit. 2018-08-22]. Dostupné z: <https://www.scienceinschool.org/2011/issue19/chemiluminescence>
- [12] KOUBA, J., NOVOTNÝ, J., NOŽIČKA., J., Experimental setup of LIF measurement. Fakulta strojní, České Vysoké Učení Technické v Praze, 2015.
- [13] High-speed gated image intensifier unit. Hamamatsu. 2014.

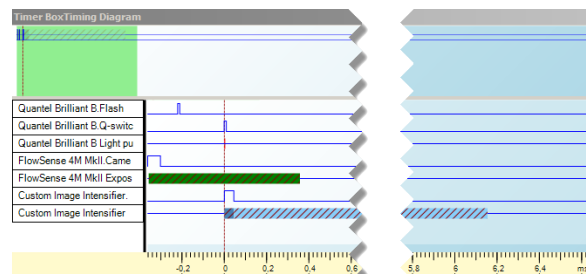
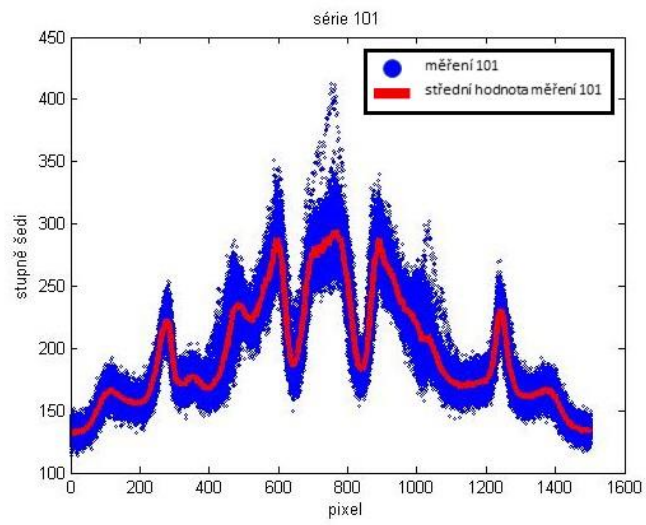
- [14] *COMBUSTION DIAGNOSTICS: Advanced Optical Measurement Solutions* [online]. Nova Instruments [cit. 2018-08-22]. Dostupné z: [https://www.dantecdynamics.com/docs/products-and-services/combustion/Combustion\\_diagnosics\\_247.pdf](https://www.dantecdynamics.com/docs/products-and-services/combustion/Combustion_diagnosics_247.pdf)
- [15] Advances and challenges in laminar flame experiments and implications for combustion chemistry: Progress in Energy and Combustion Science [online]. **2014**(Volume 43, Pages 36-67) [cit. 2018-08-22]. ISSN 0360-1285. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128514000252>
- [16] GUILBAULT, George G a George G GUILBAULT. *Practical fluorescence*. 2nd ed., rev. and expanded. New York: M. Dekker, c1990. ISBN 08247-83506.
- [17] *FlowSense & HiSense cameras: High-resolution cameras for demanding applications* [online]. Nova Instruments, 2018 [cit. 2018-08-22]. Dostupné z: [https://www.dantecdynamics.com/docs/products-and-services/fluid-mechanics/piv/DS%200500\\_v5%20FlowSense%20&%20HiSense%20cameras..pdf](https://www.dantecdynamics.com/docs/products-and-services/fluid-mechanics/piv/DS%200500_v5%20FlowSense%20&%20HiSense%20cameras..pdf)
- [18] Chemiluminescence. Universitat Duisburh Essen [online]. [cit. 2018-08-22]. Dostupné z: [https://www.uni-due.de/ivg/rf/chemilumineszenz\\_en.php](https://www.uni-due.de/ivg/rf/chemilumineszenz_en.php)
- [19] Fluorochromy. *Lab Guide* [online]. [cit. 2018-08-22]. Dostupné z: <http://labguide.cz/fluorochromy/>

## 7. Příloha 1

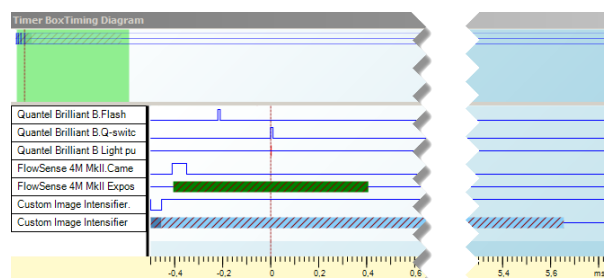
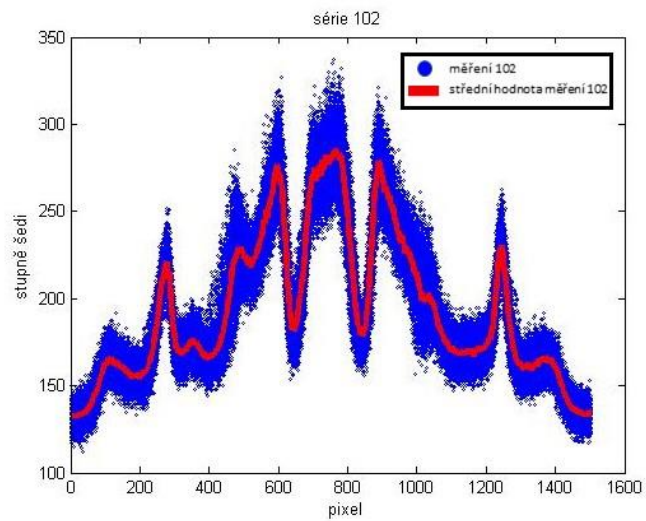
V příloze je vyhodnocení každé série, podle tabulky 4, z Matlabu. Je zde vyobrazen sloučený signál v řezu (modrá barva) a střední hodnota (červená barva). Data byla vybrána ve vodorovné rovině v hodnotě 1700 pixel.

Dále pro každou sérii je zde grafická vizualizace nastavení zpoždění zesilovače oproti kameře z programu Dynamics Studio.

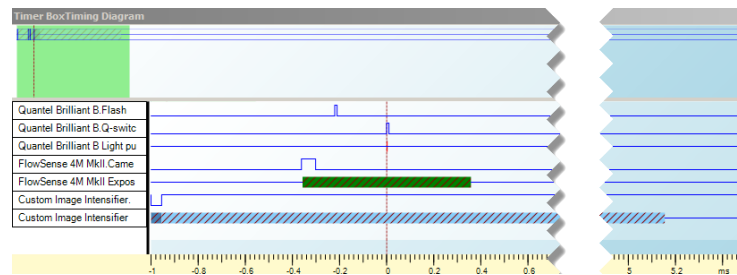
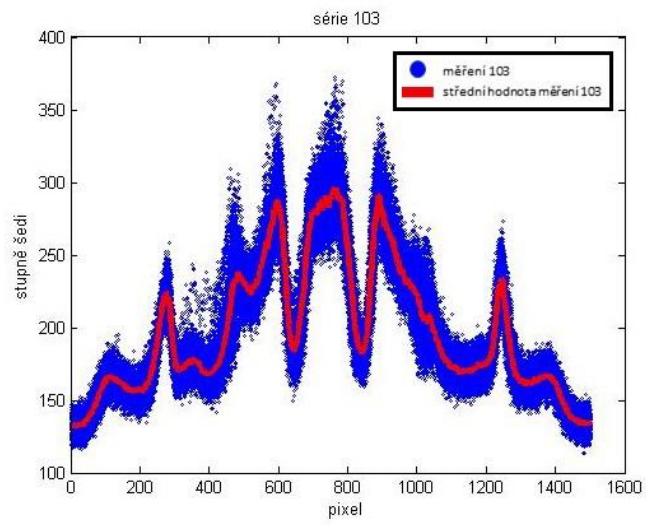
## Série 101



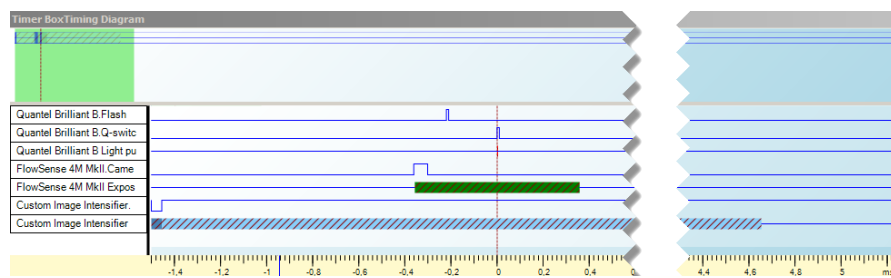
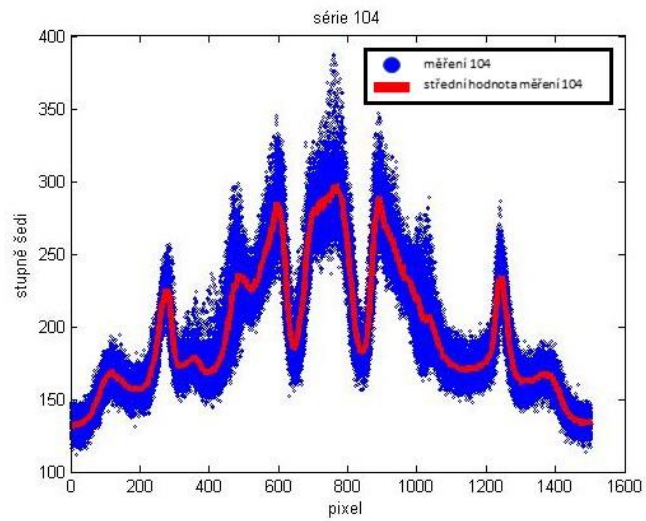
## Série 102



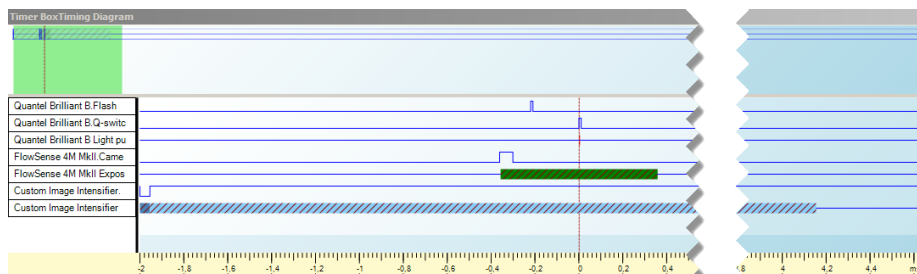
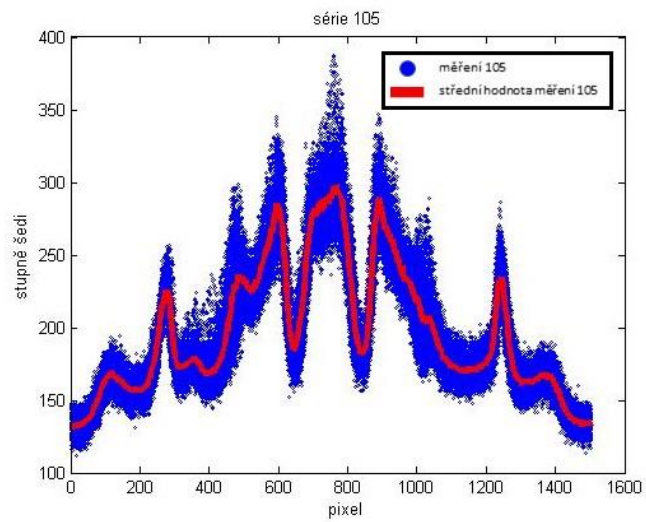
## Série 103



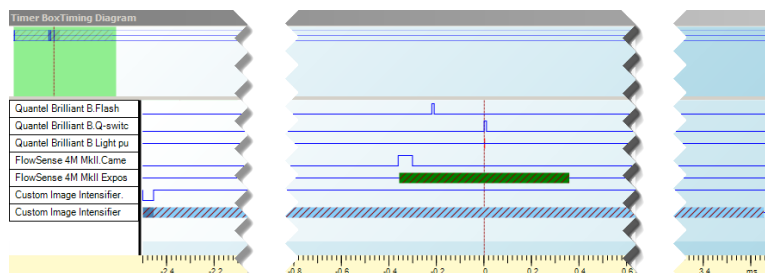
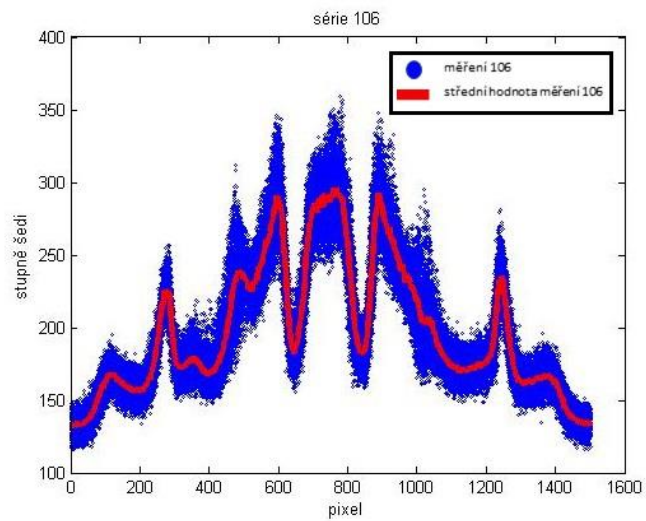
## Série 104



## Série 105

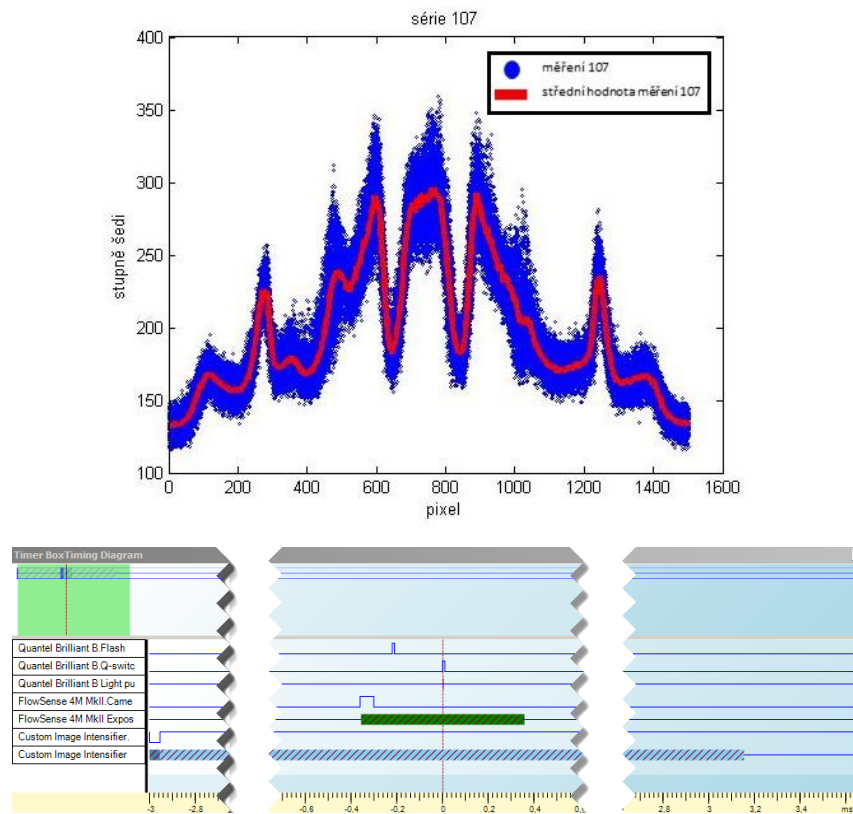


## Série 106

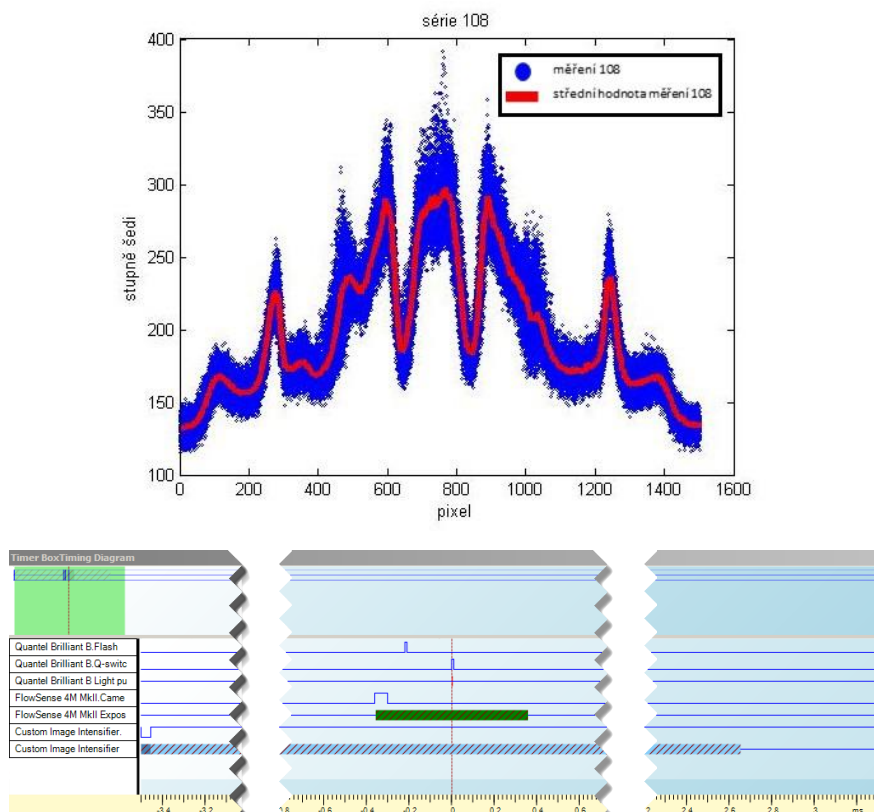




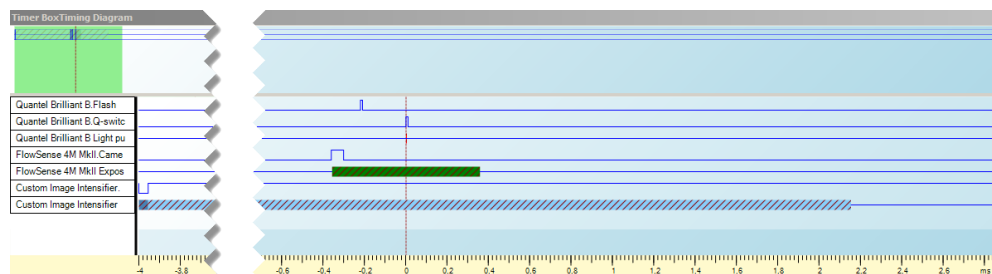
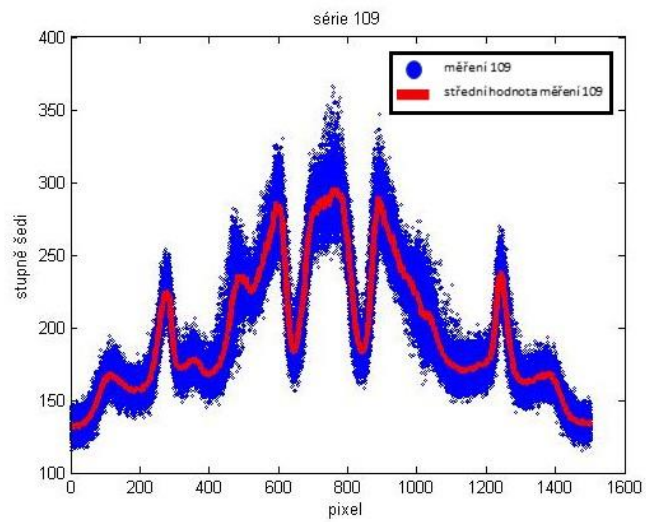
## Série 107



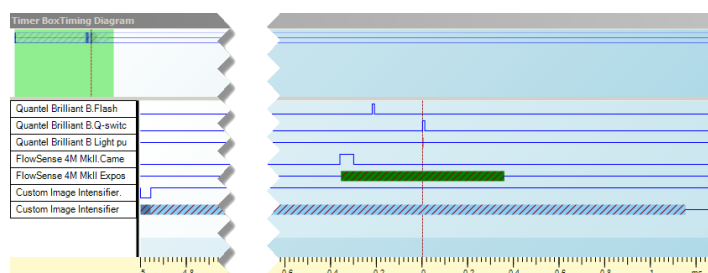
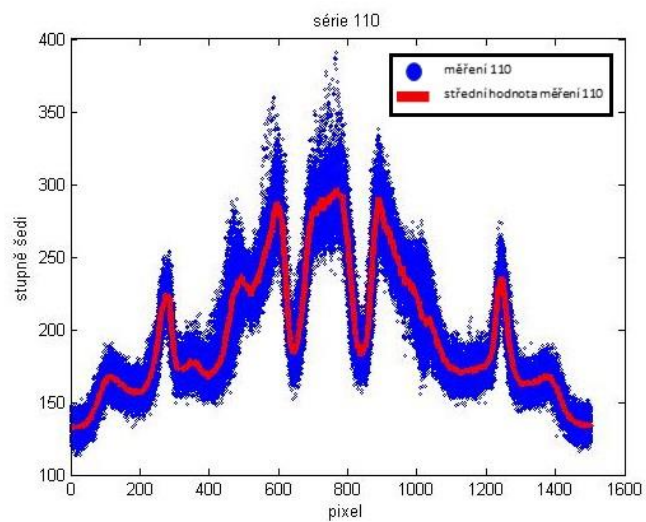
## Série 108



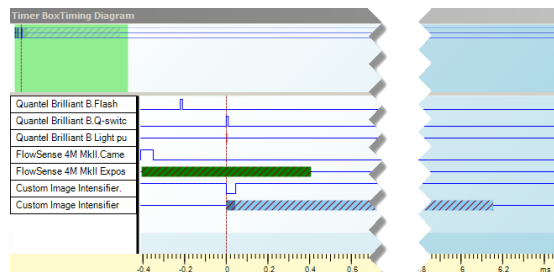
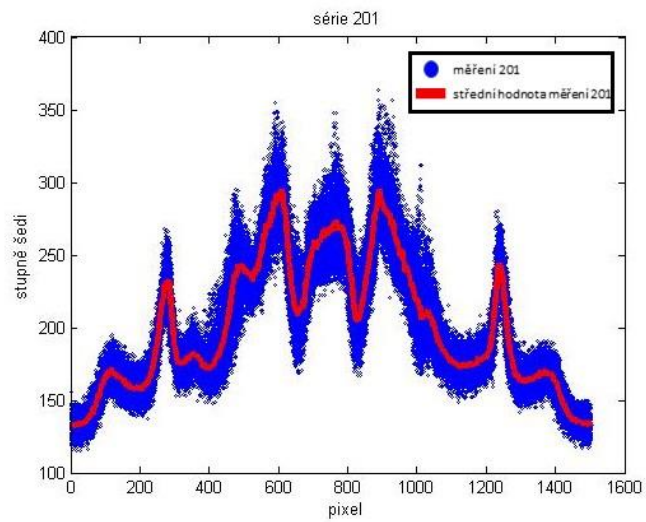
## Série 109



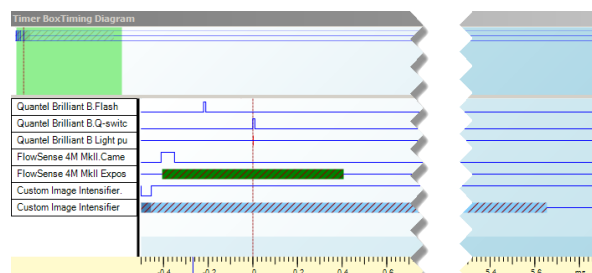
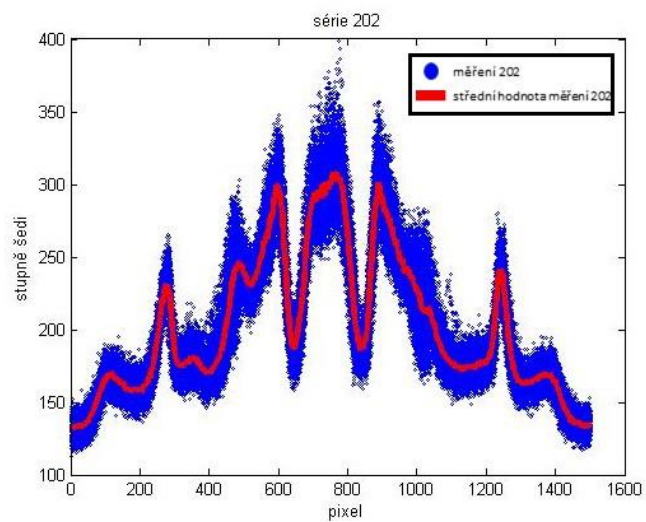
## Série 110



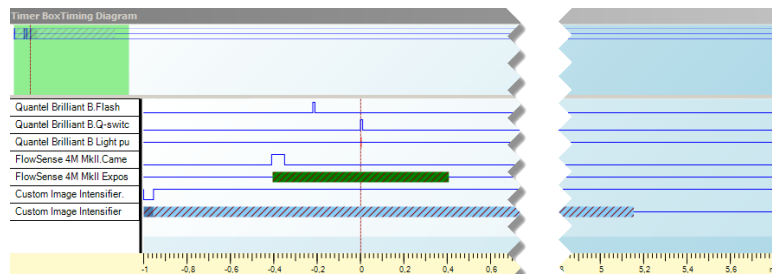
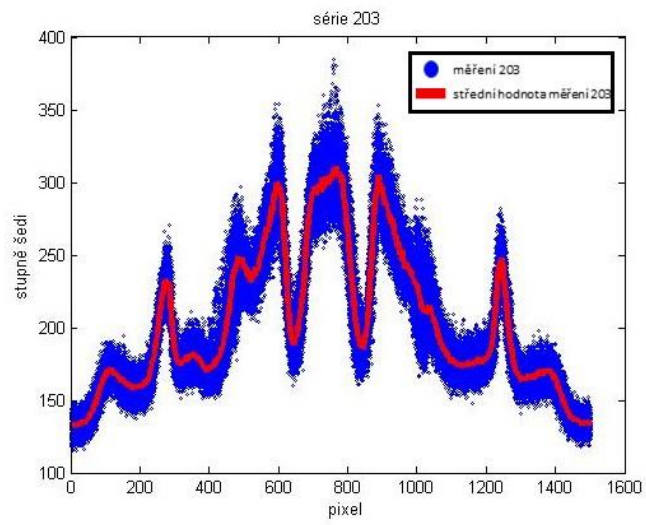
## Série 201



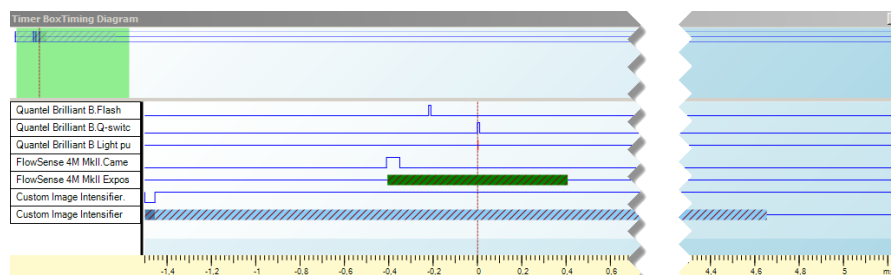
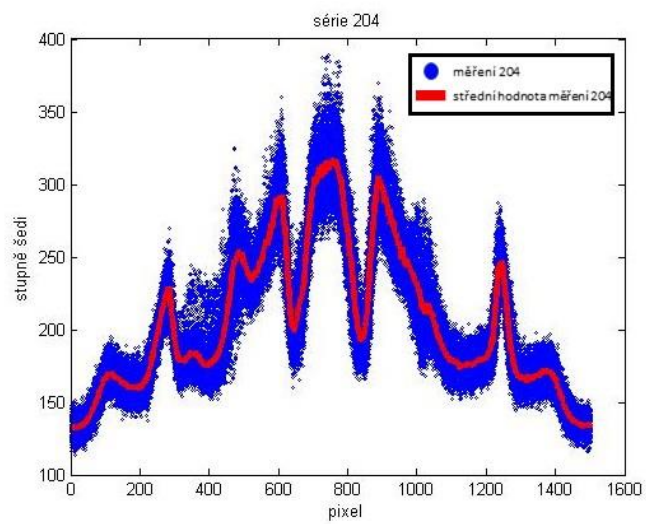
## Série 202



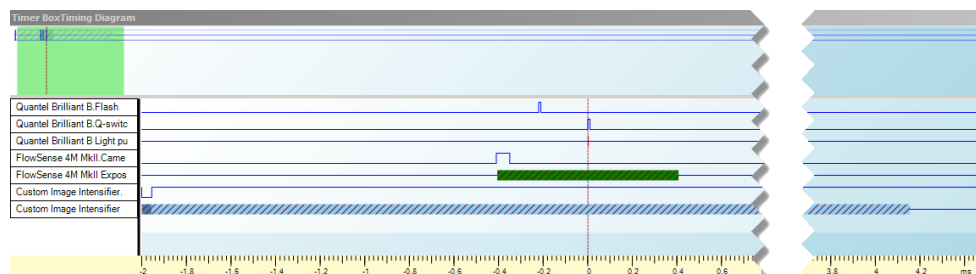
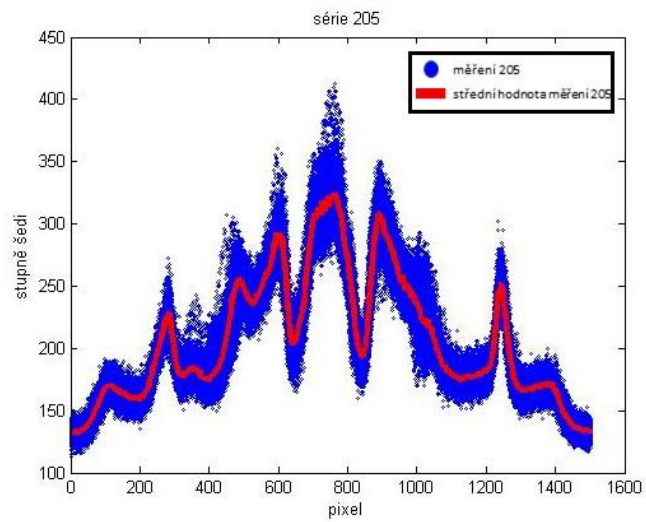
## Série 203



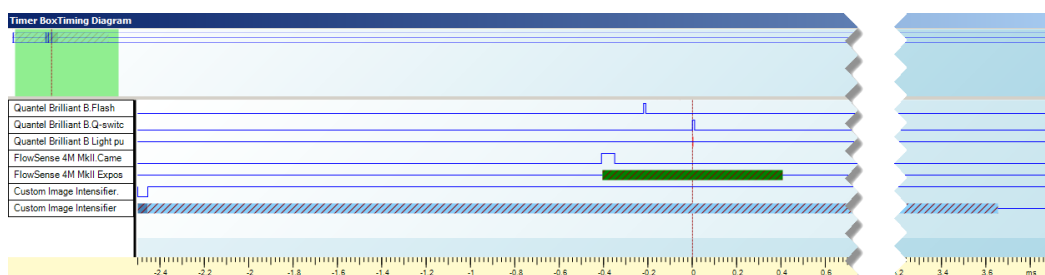
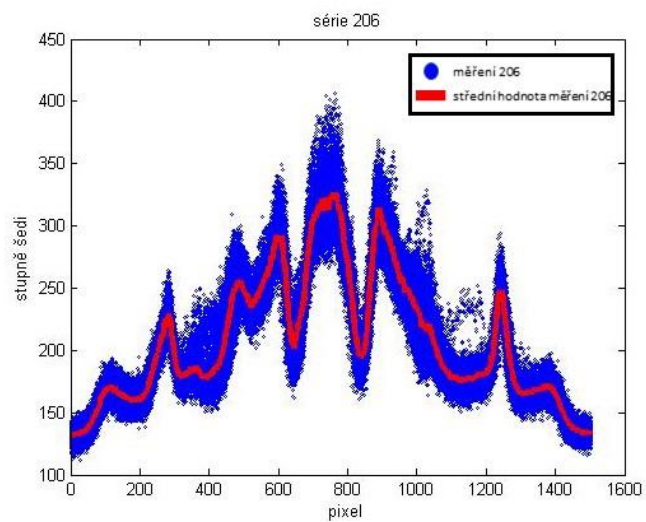
## Série 204



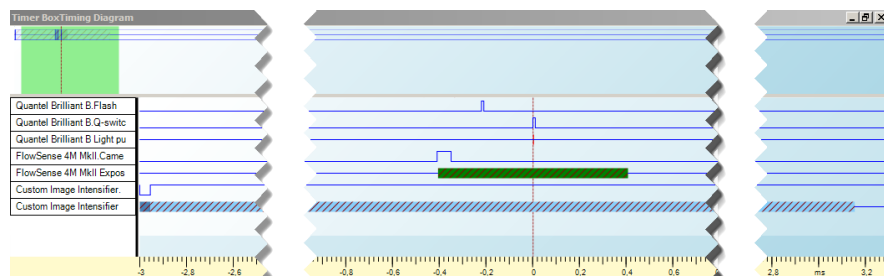
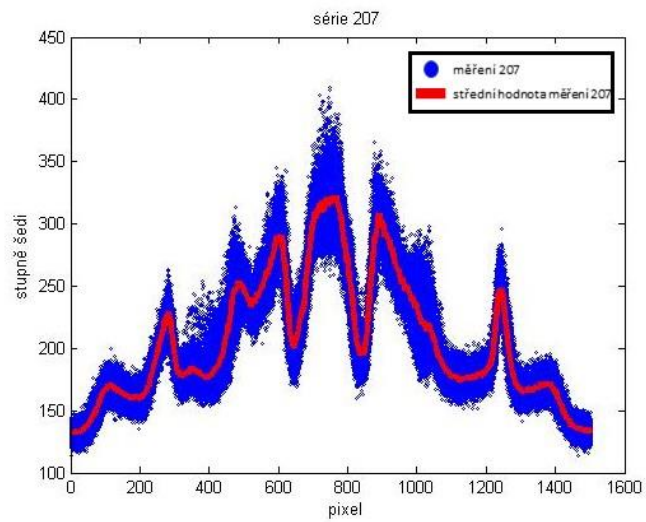
## Série 205



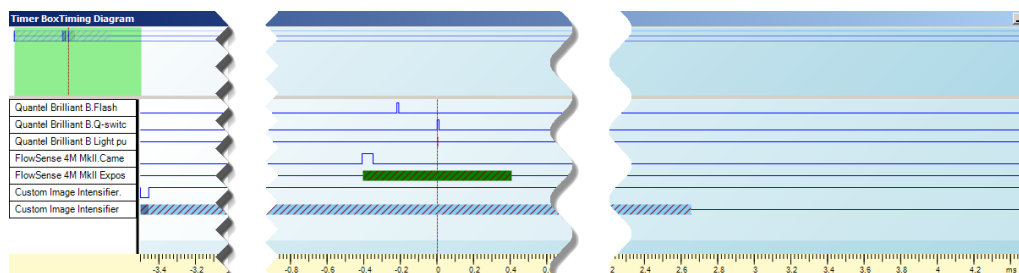
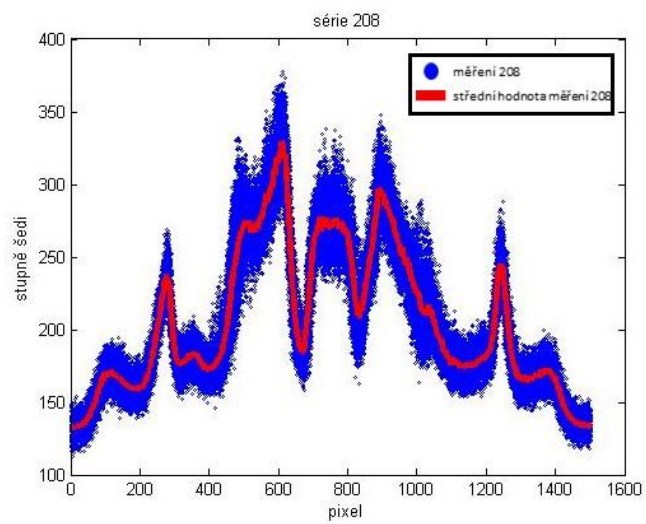
## Série 206



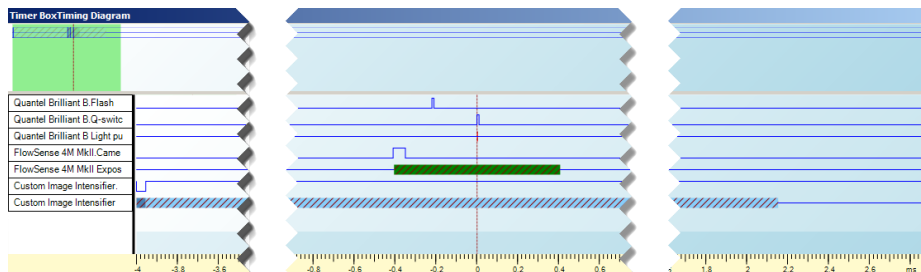
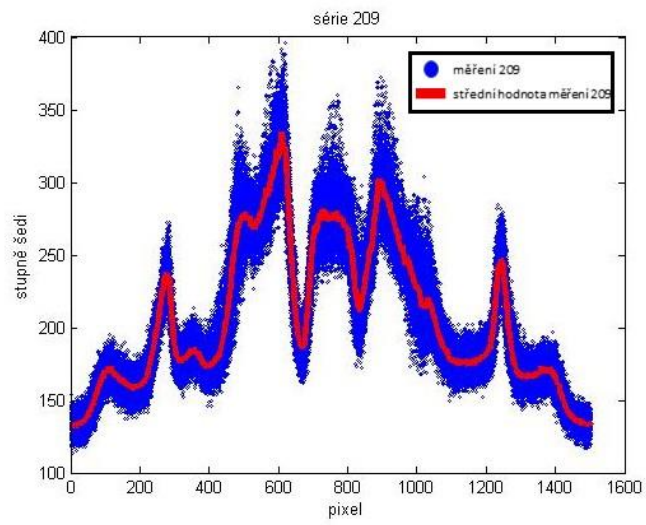
## Série 207



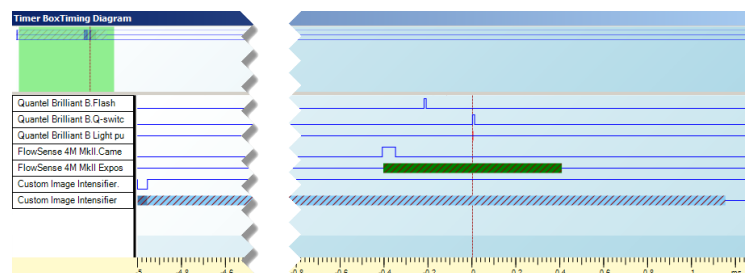
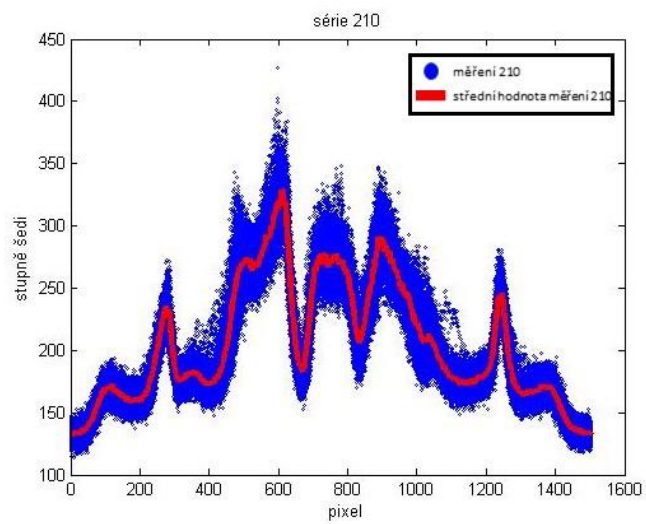
## Série 208



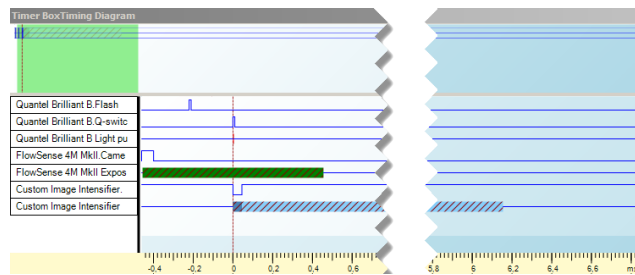
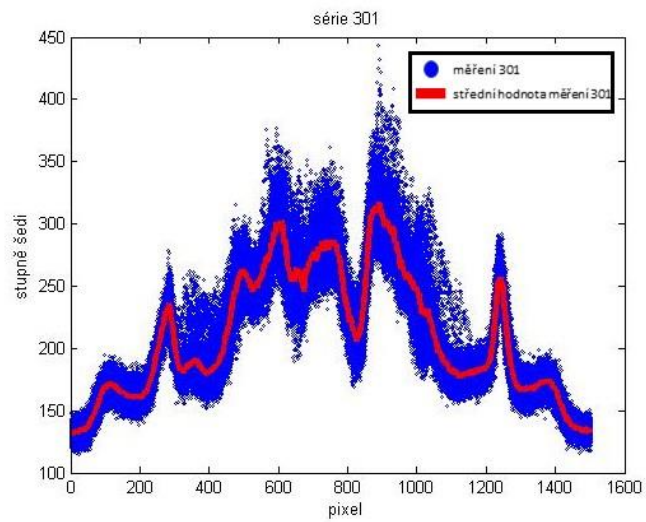
## Série 209



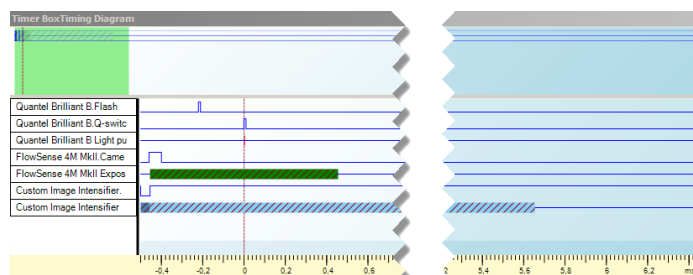
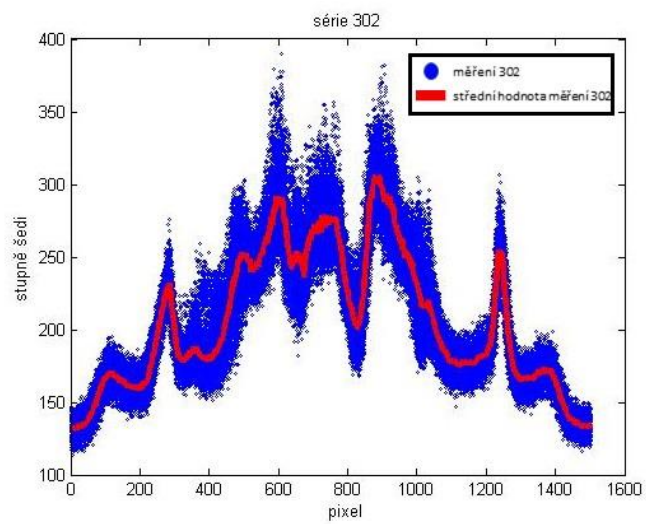
## Série 210



## Série 301

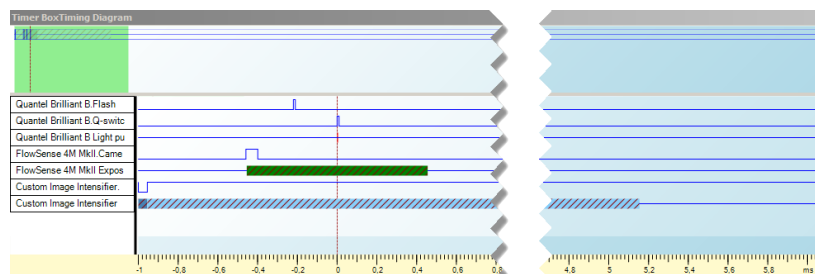
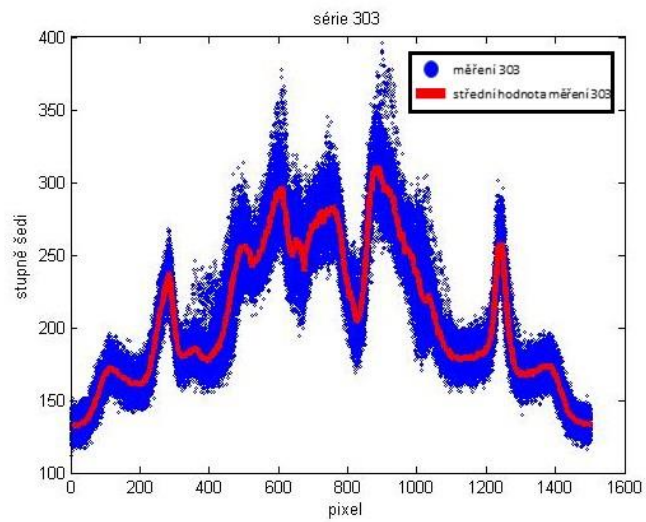


## Série 302

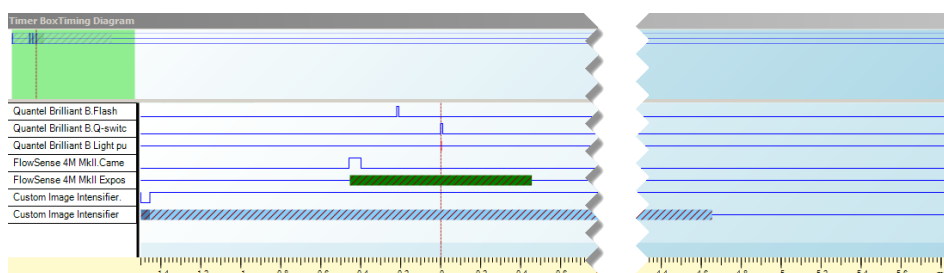
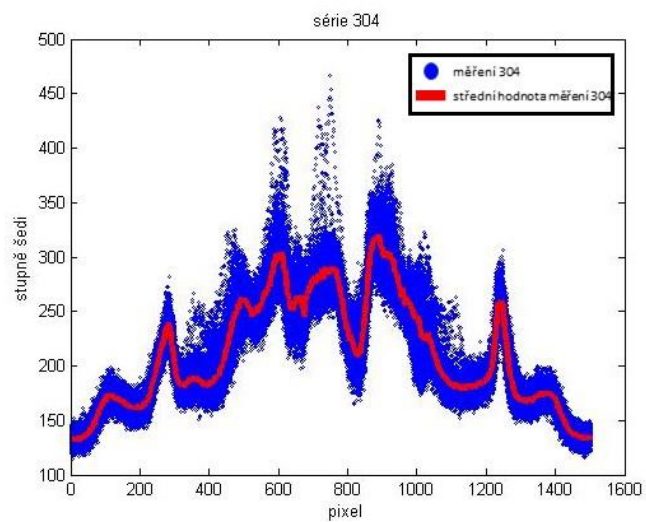




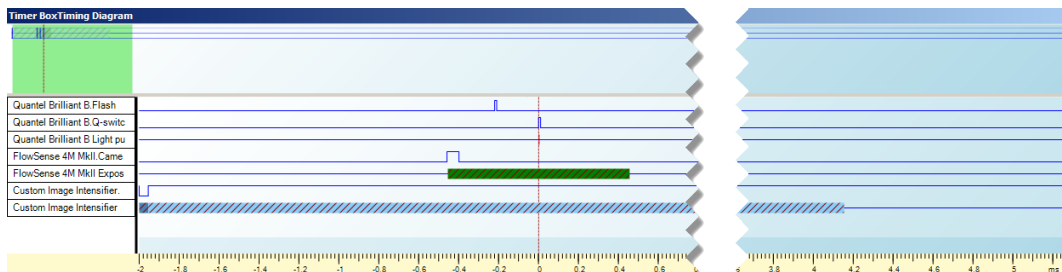
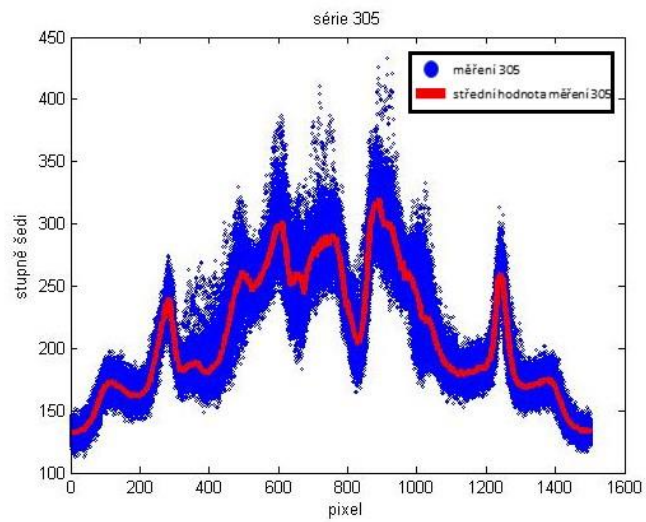
## Série 303



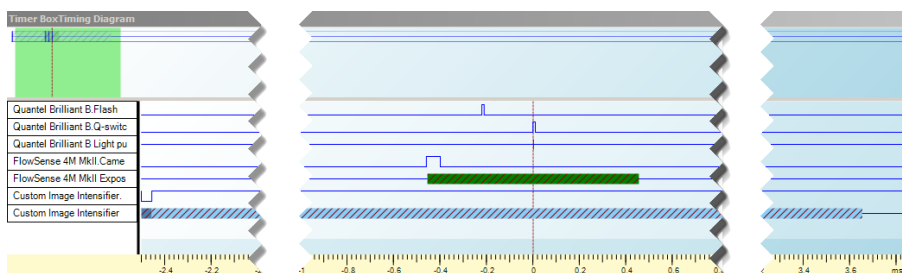
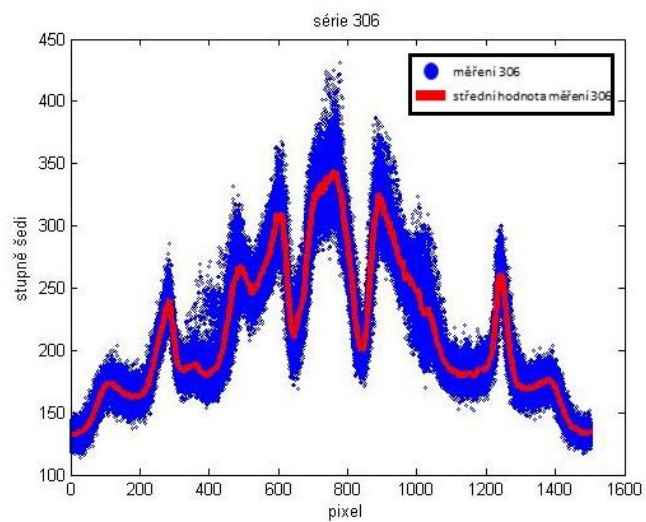
## Série 304



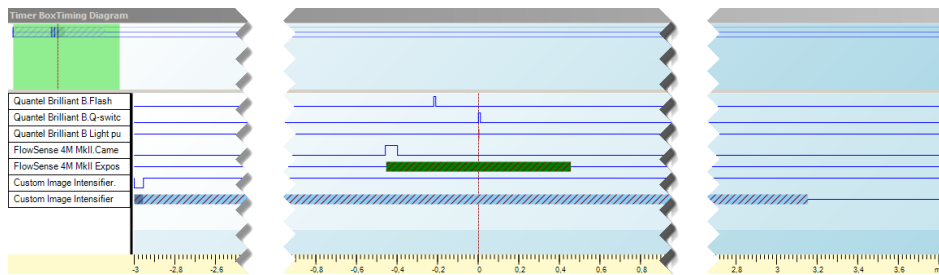
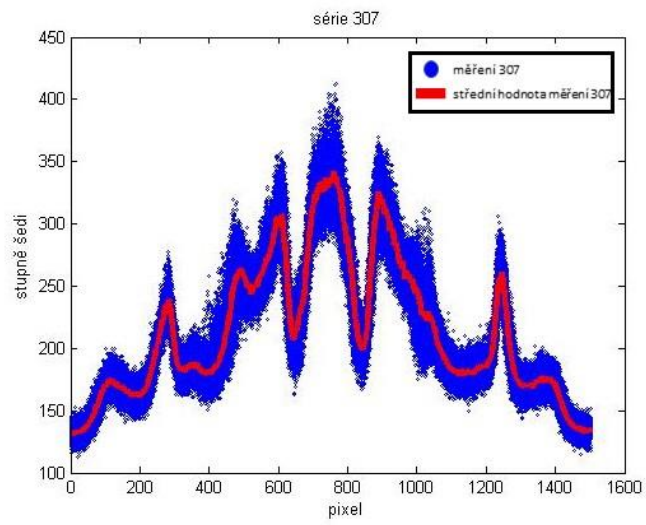
## Série 305



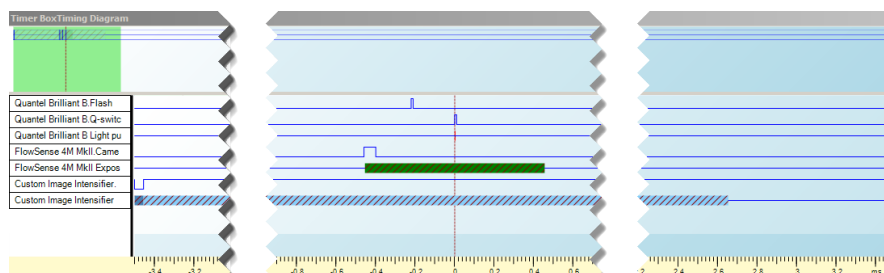
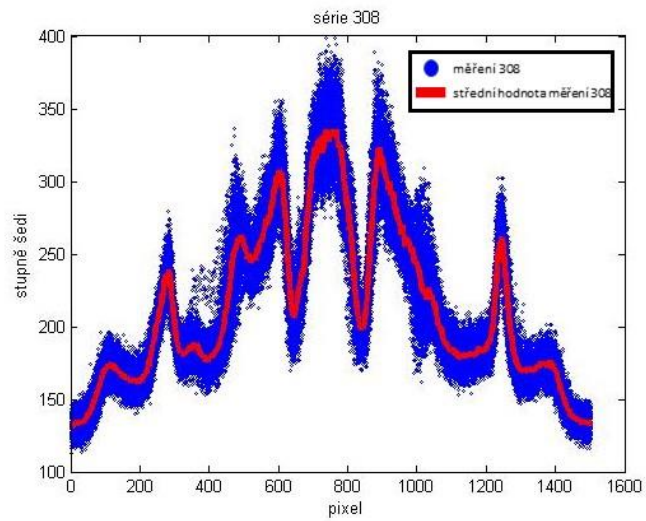
## Série 306



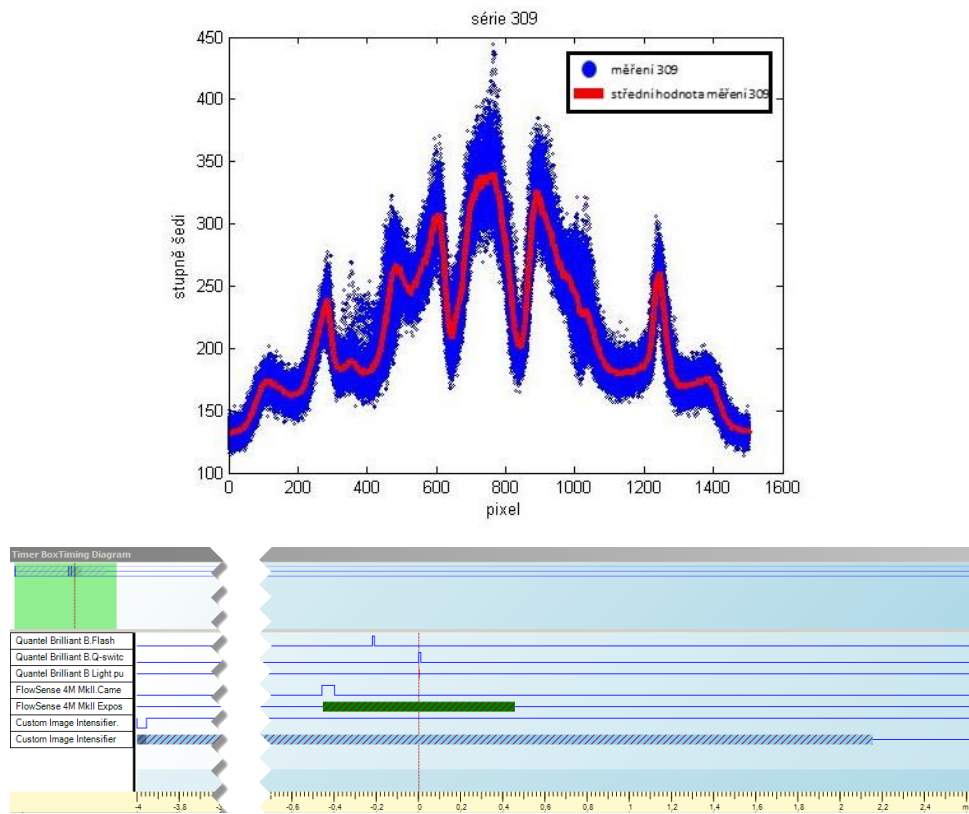
## Série 307



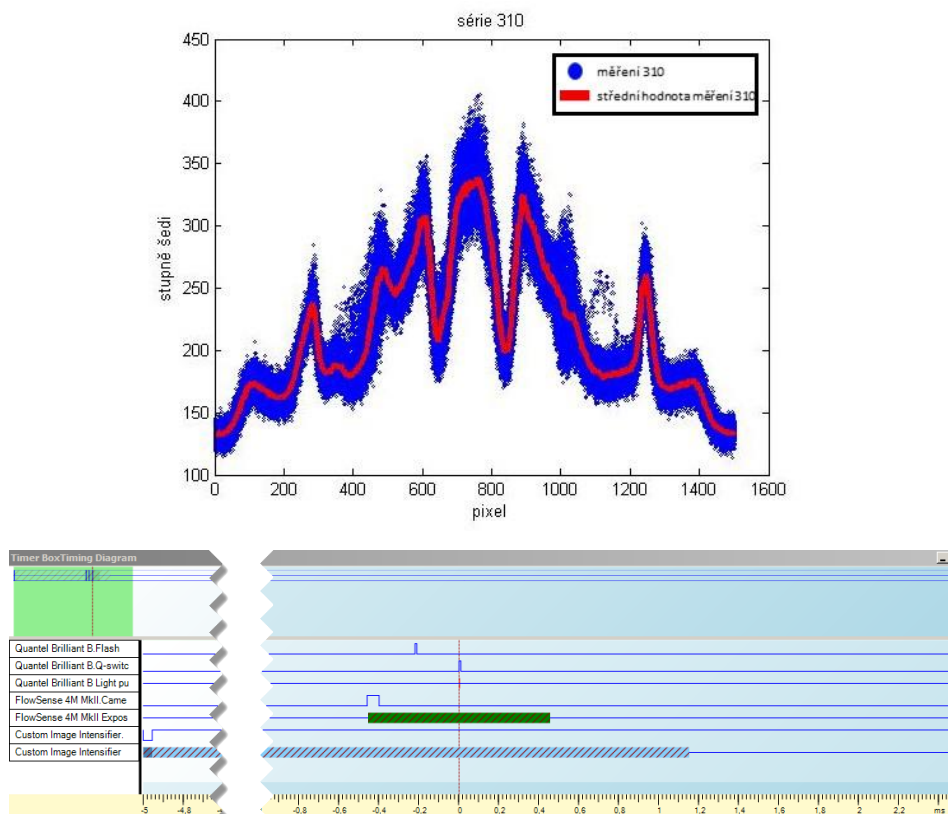
## Série 308



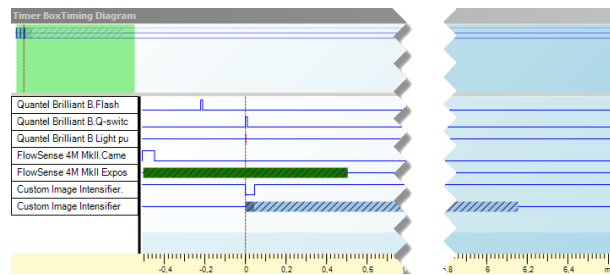
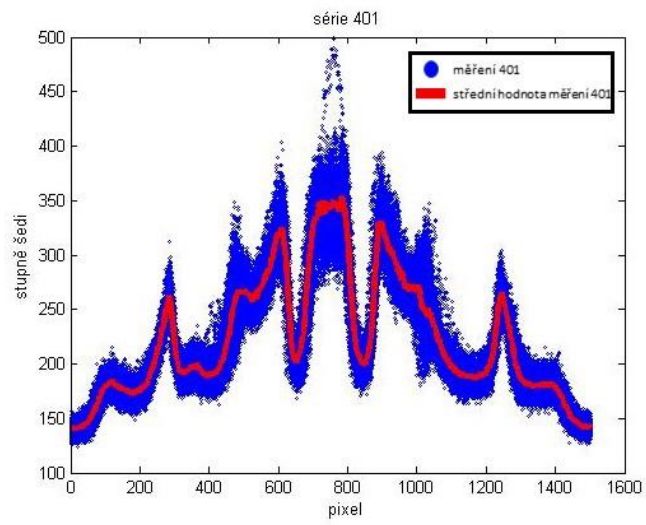
## Série 309



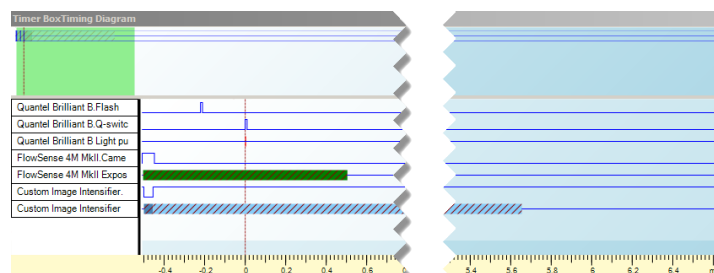
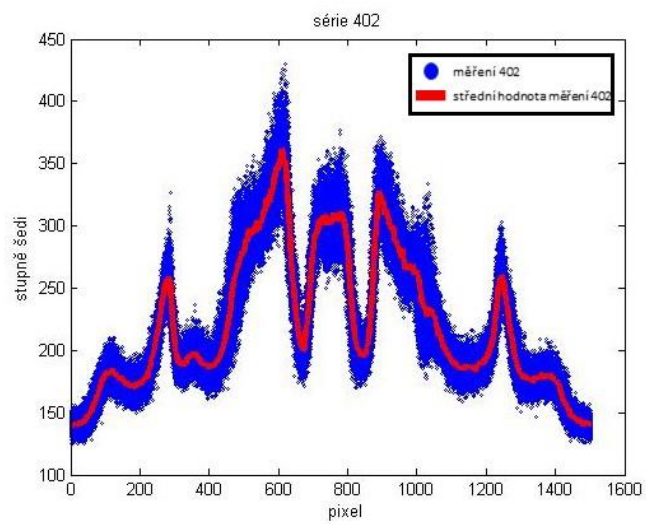
## Série 310



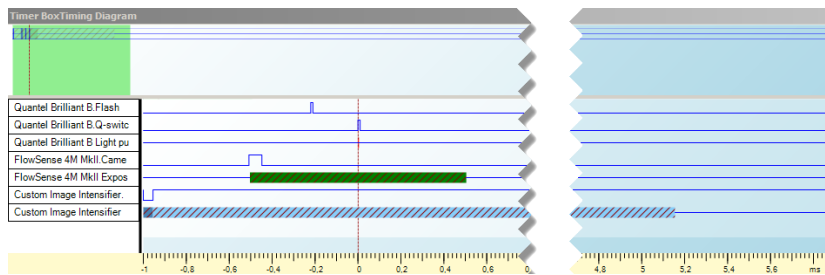
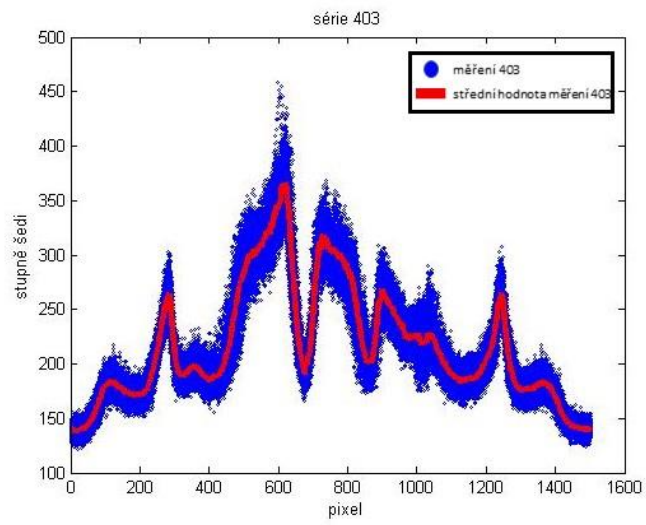
## Série 401



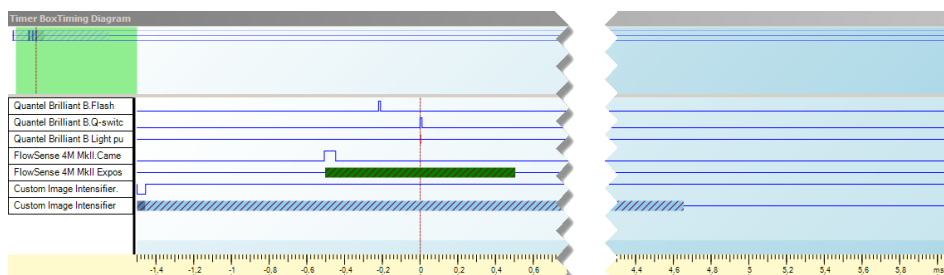
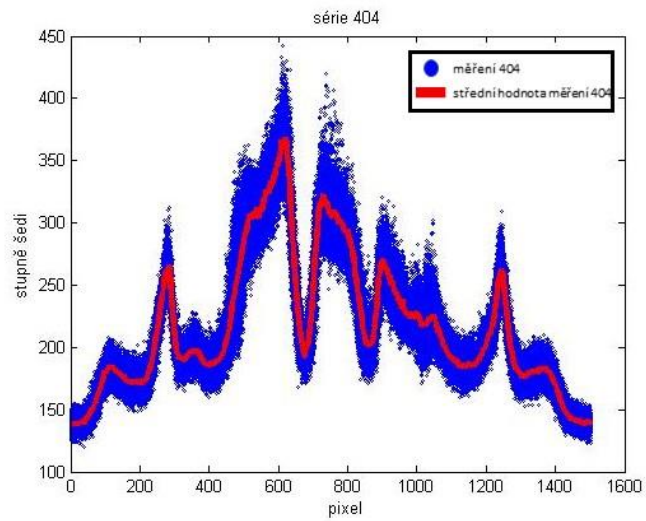
## Série 402



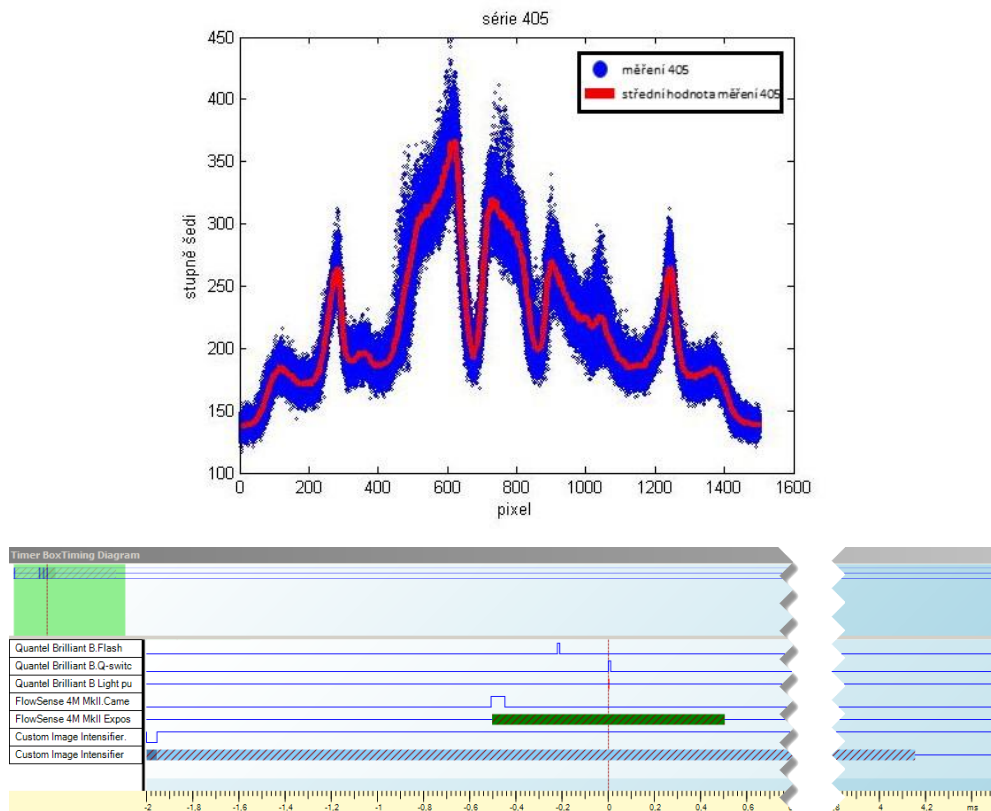
## Série 403



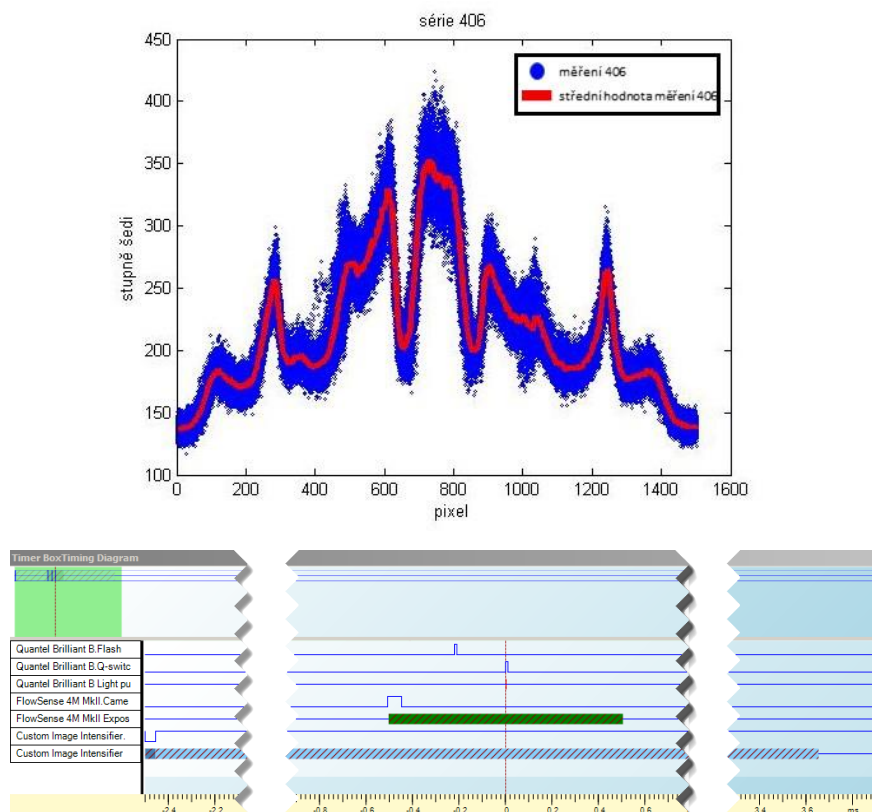
## Série 404



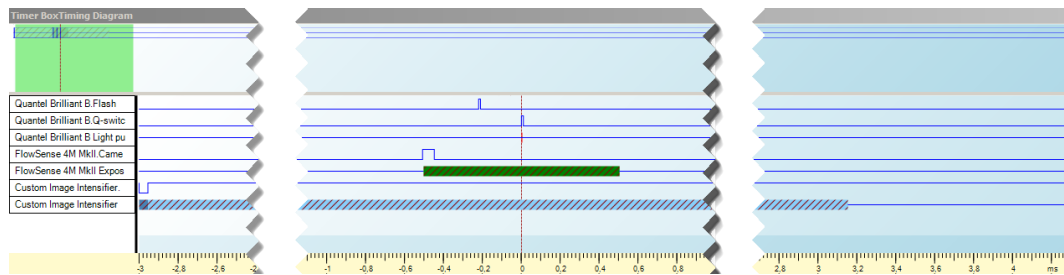
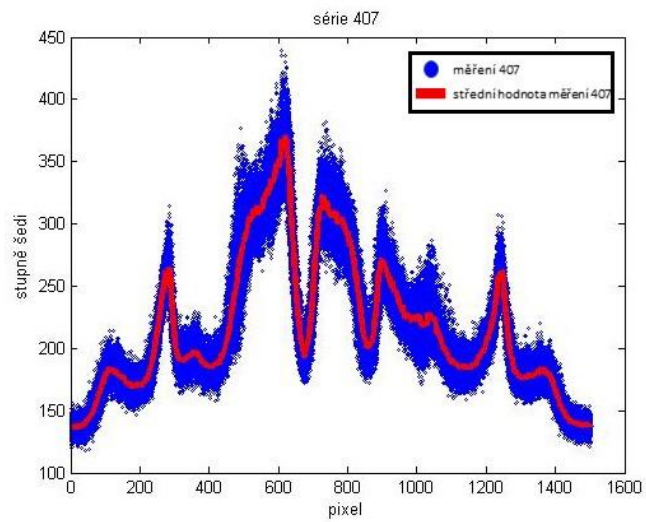
## Série 405



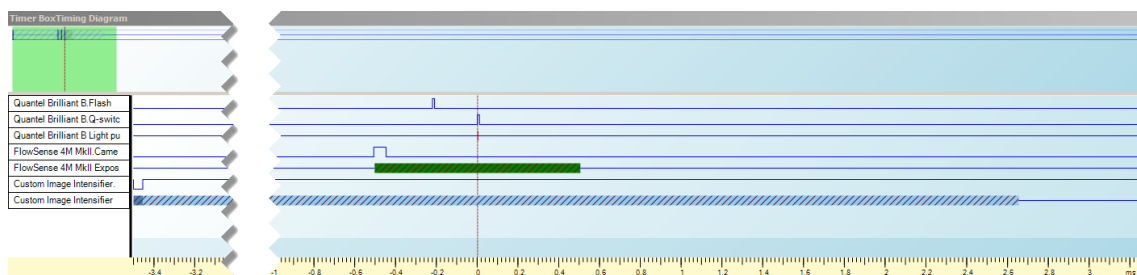
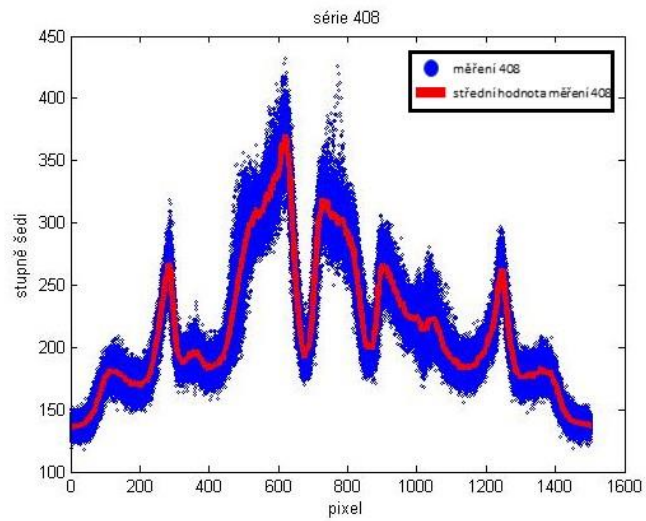
## Série 406



## Série 407

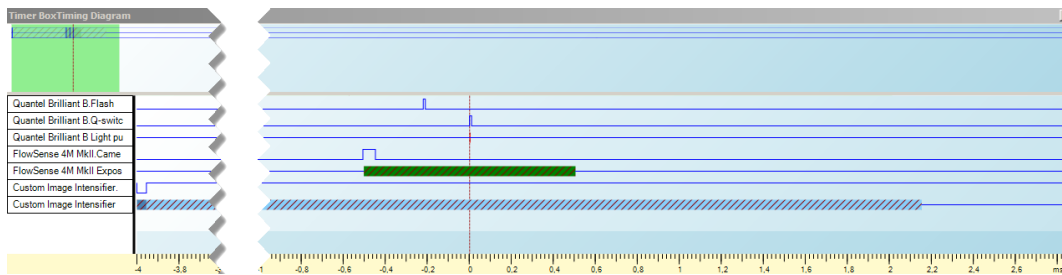
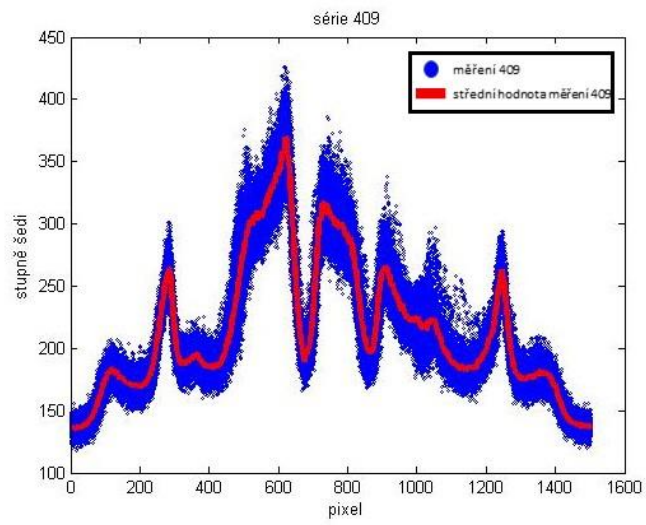


## Série 408

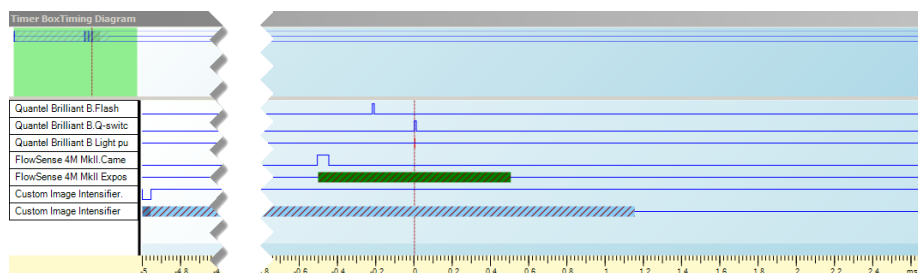
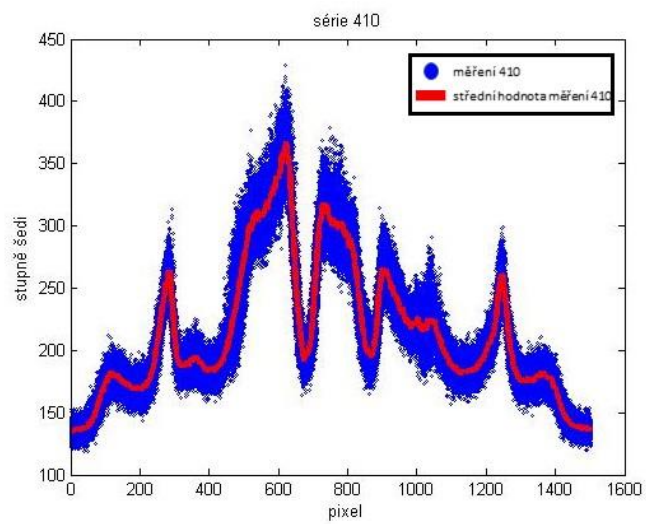




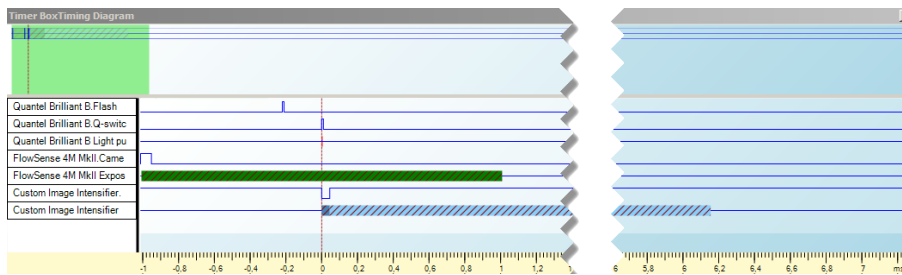
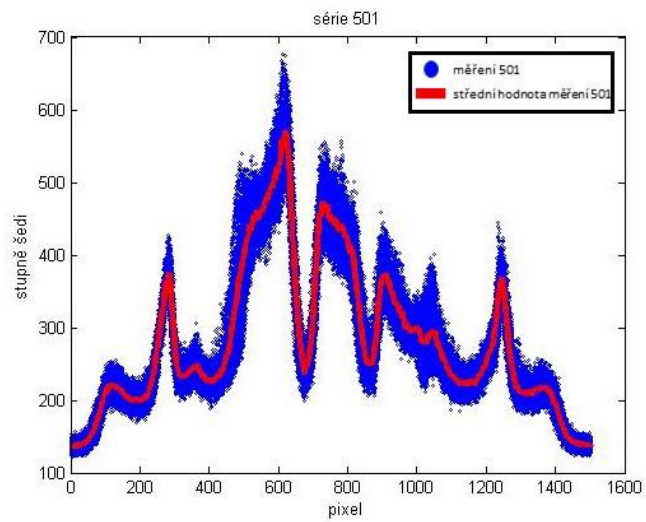
## Série 409



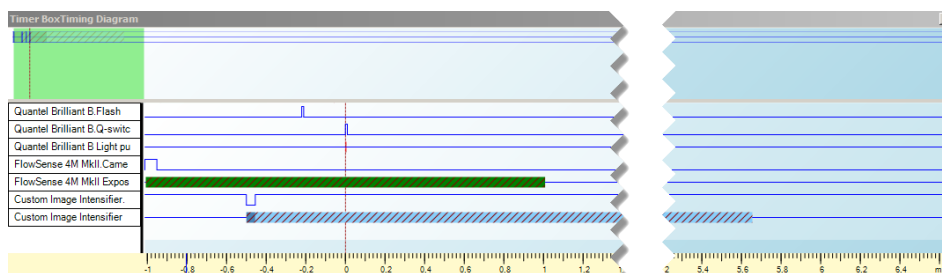
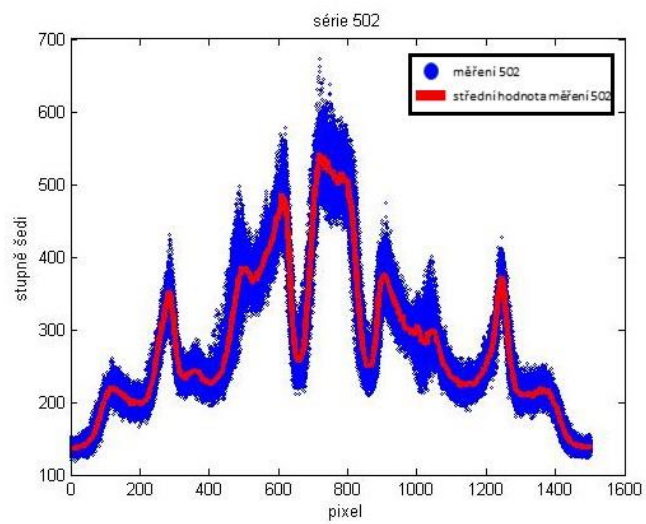
## Série 410



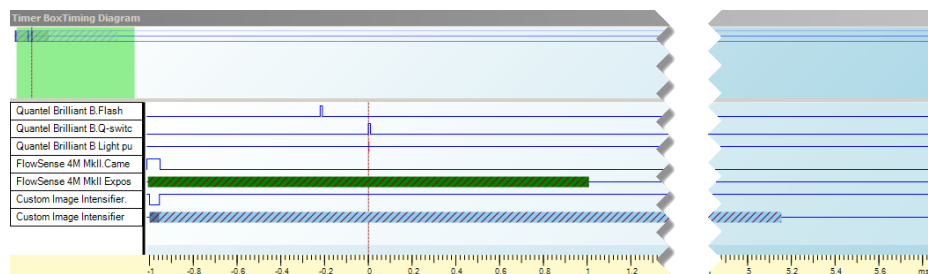
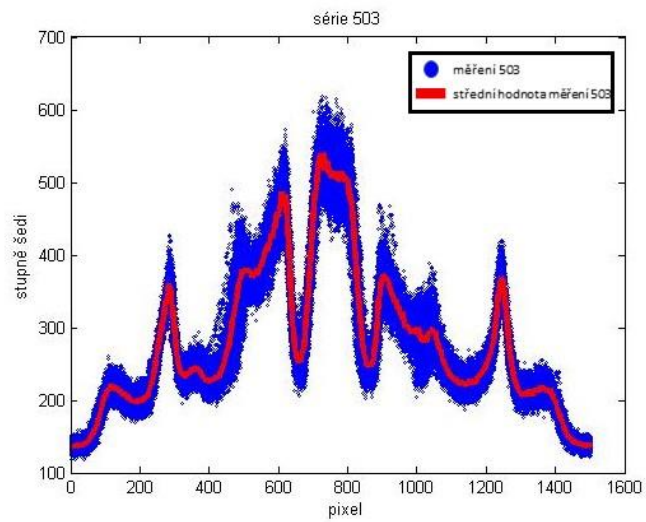
## Série 501



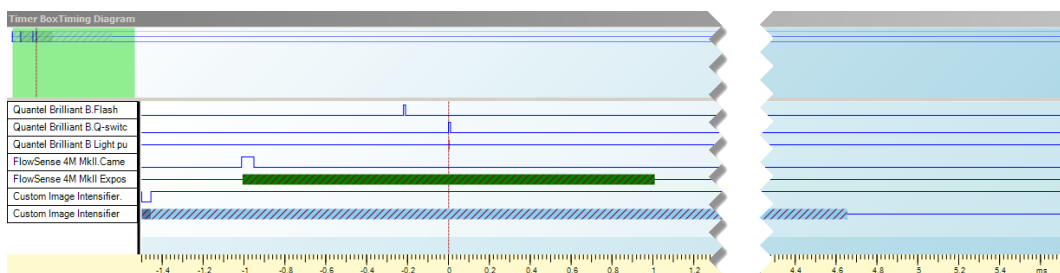
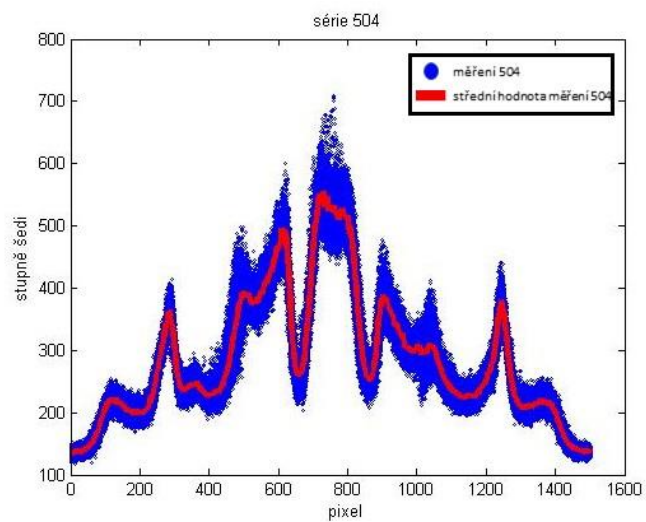
## Série 502



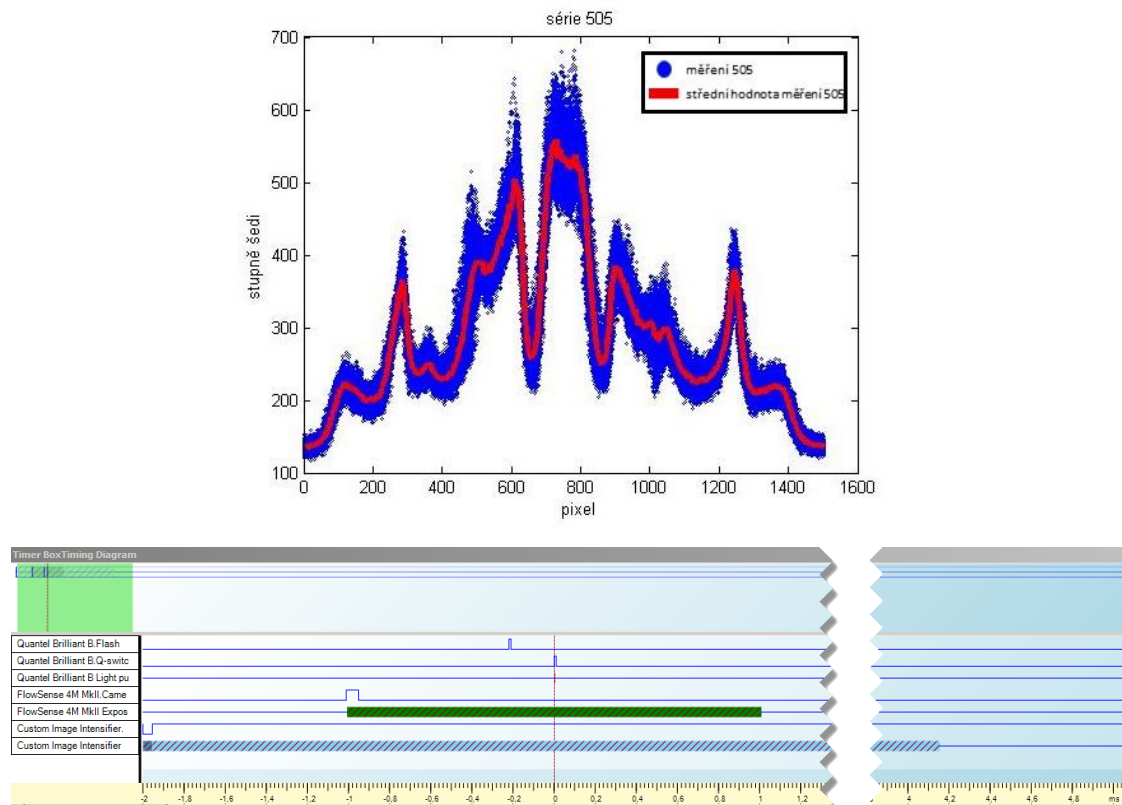
## Série 503



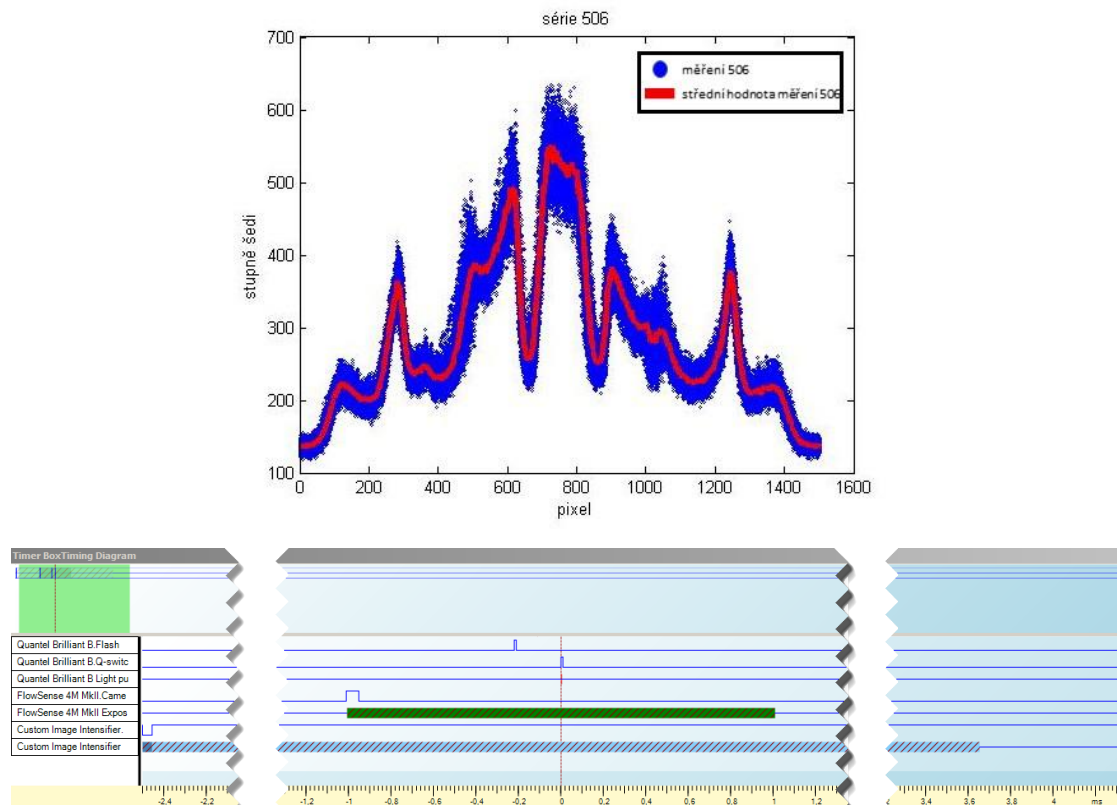
## Série 504



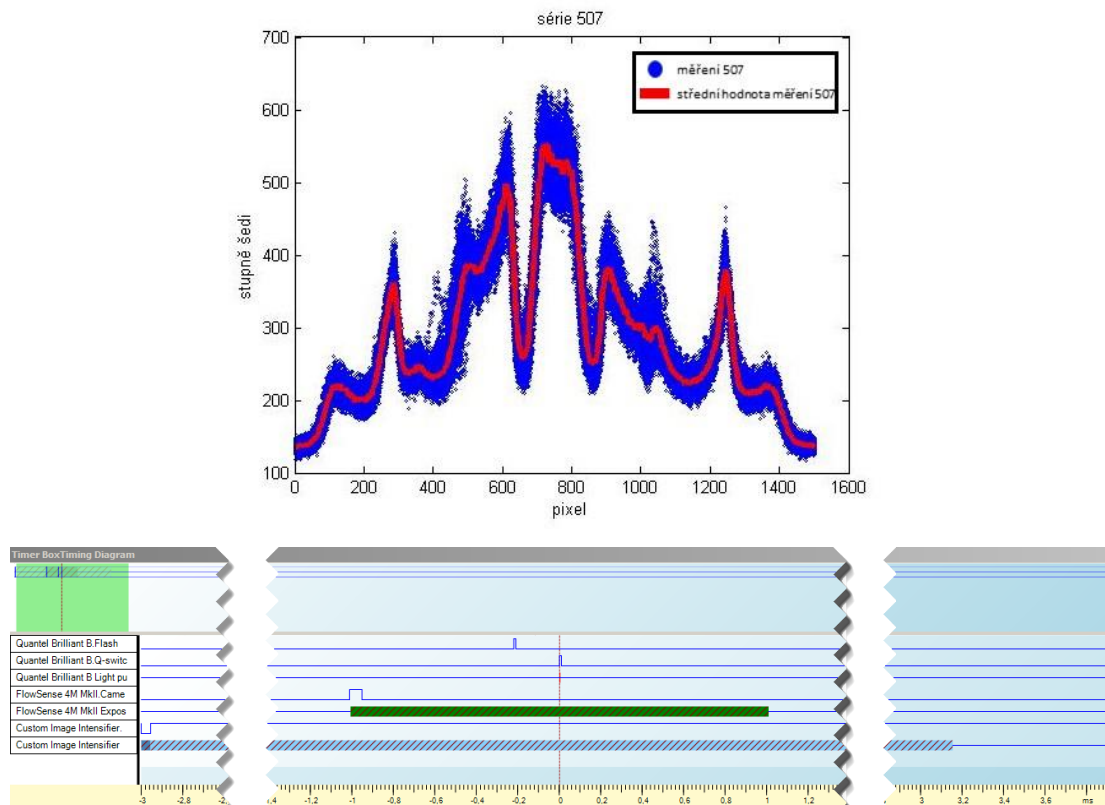
## Série 505



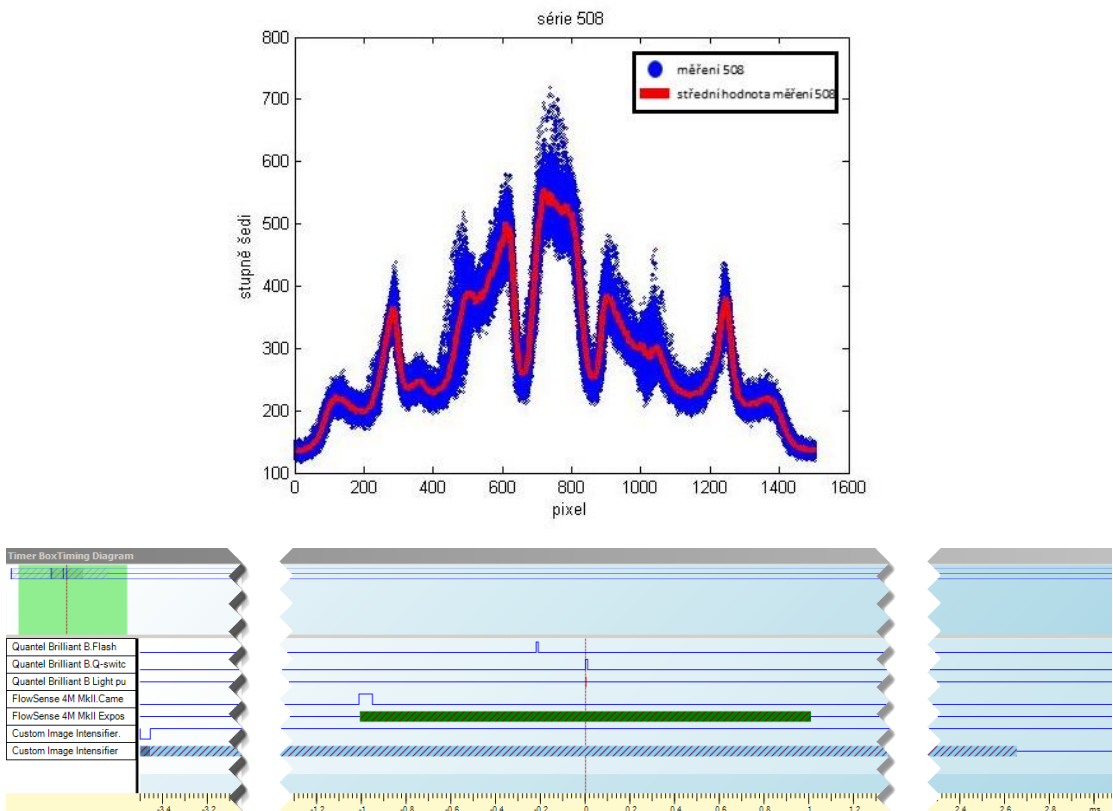
## Série 506



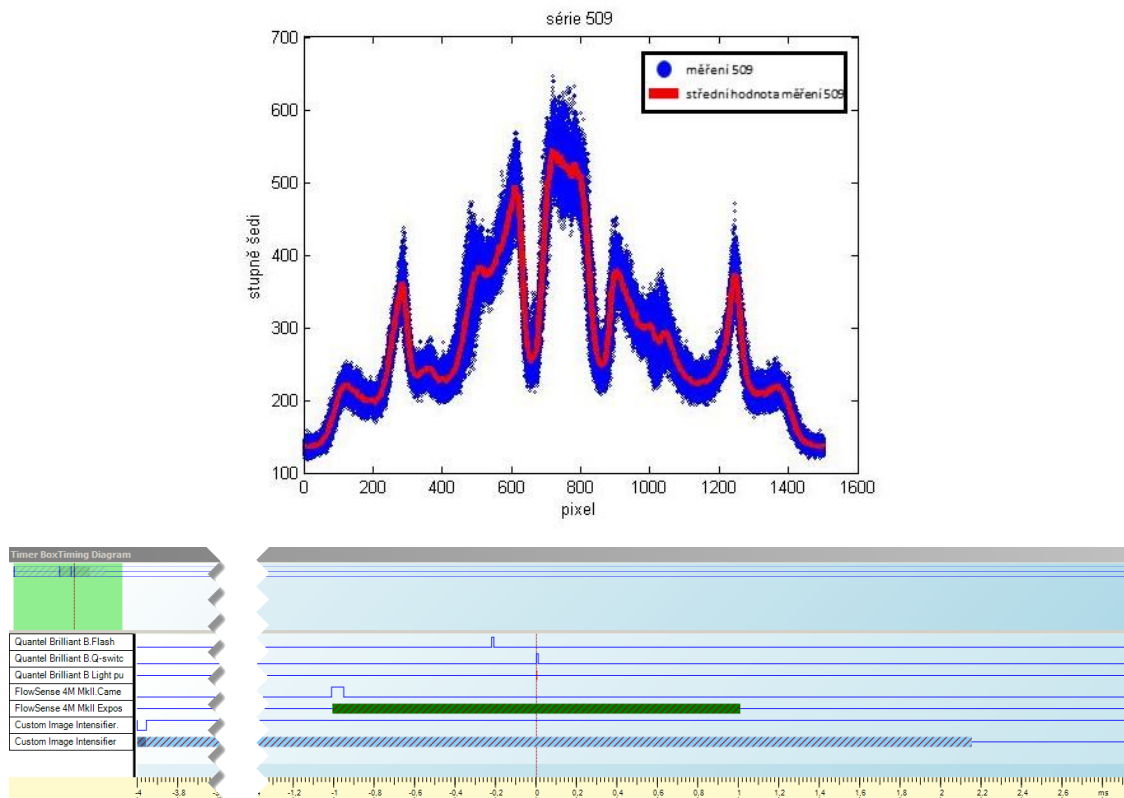
## Série 507



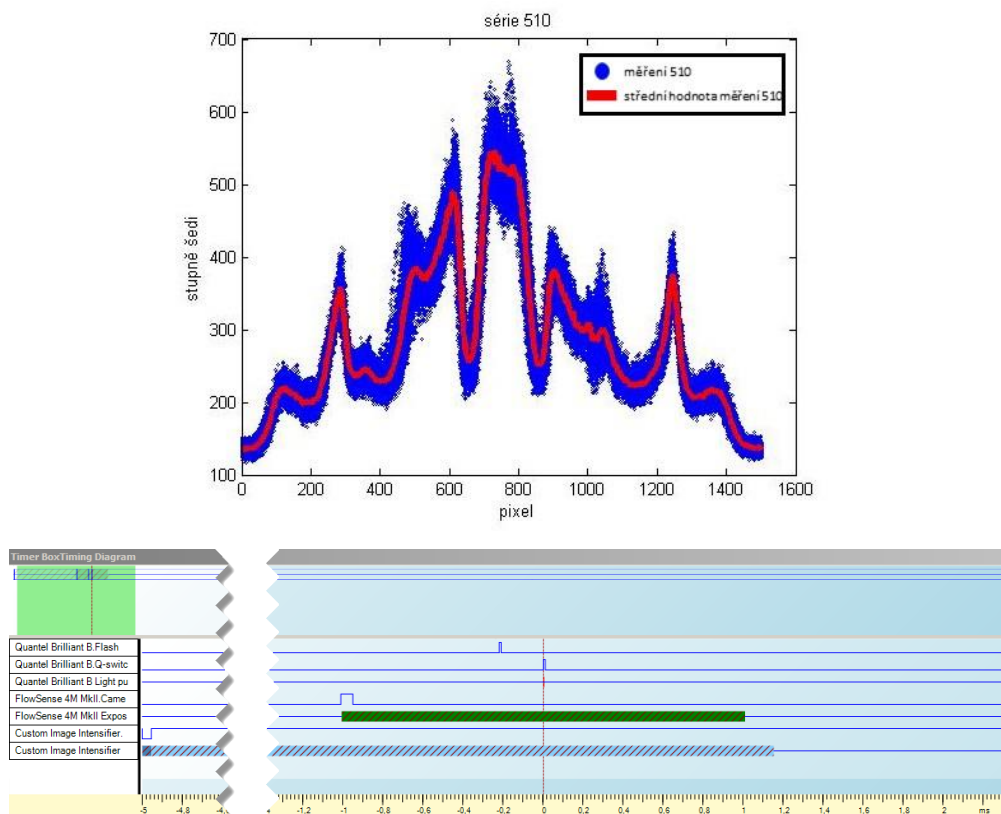
## Série 508



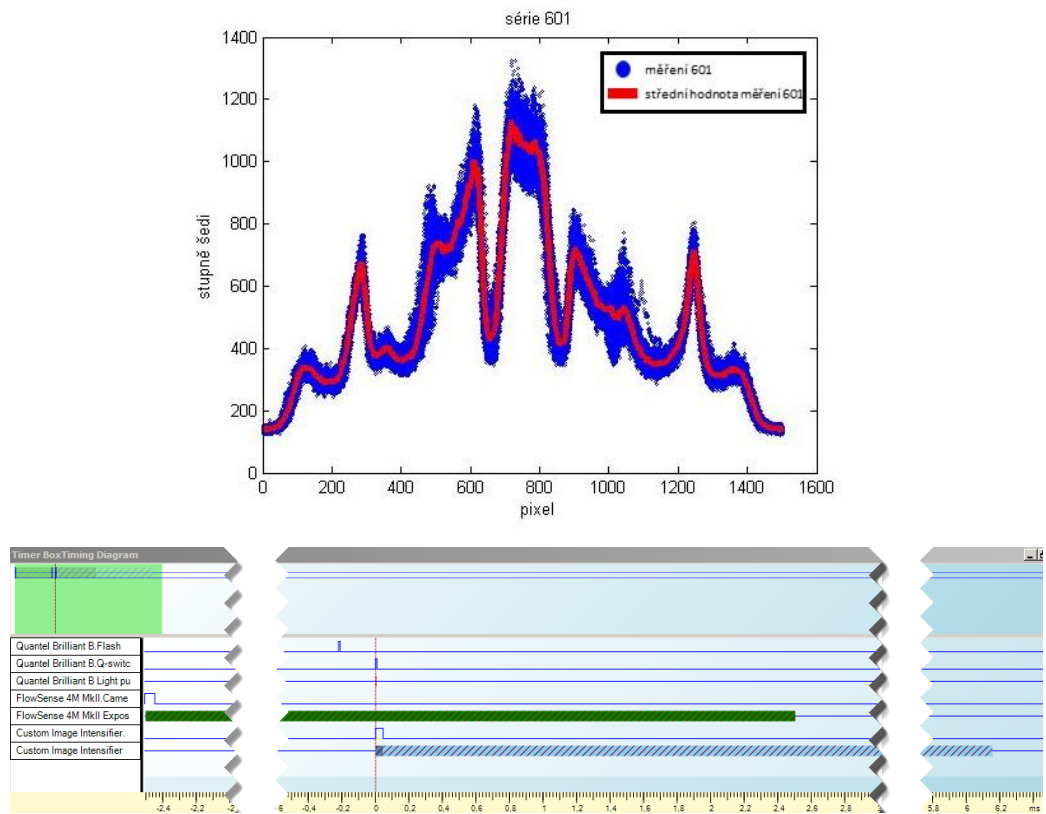
## Série 509



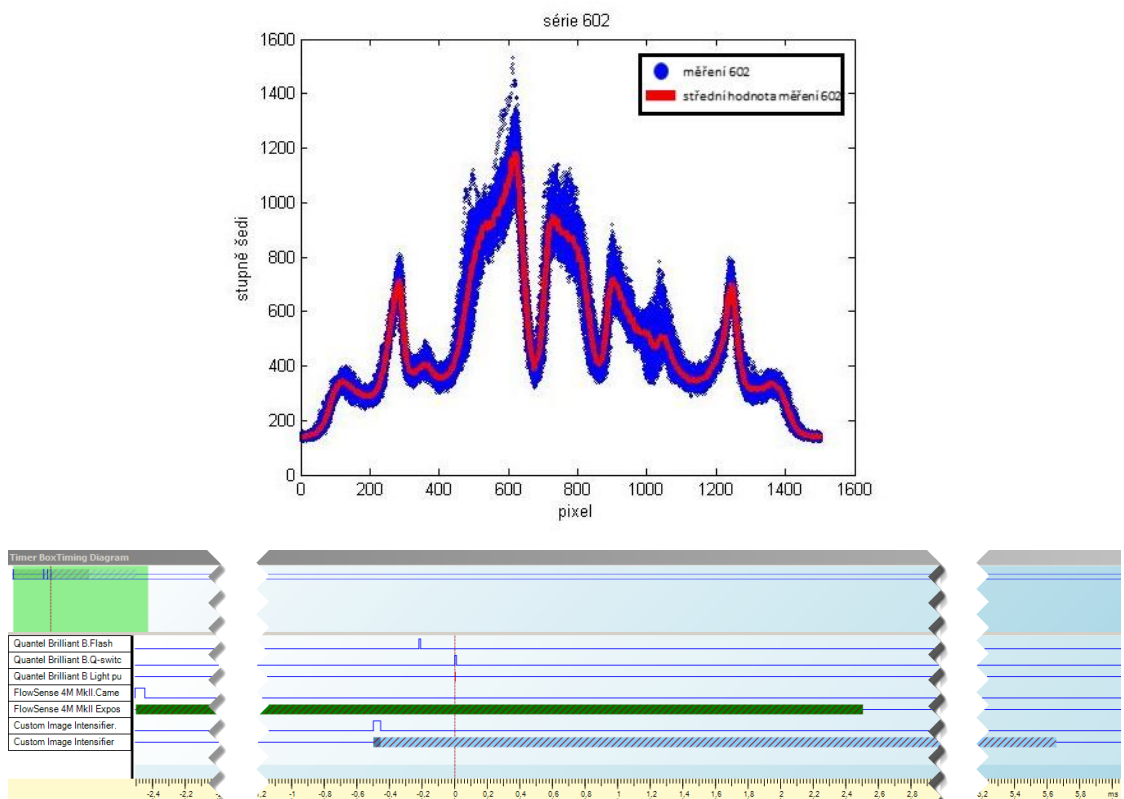
## Série 510



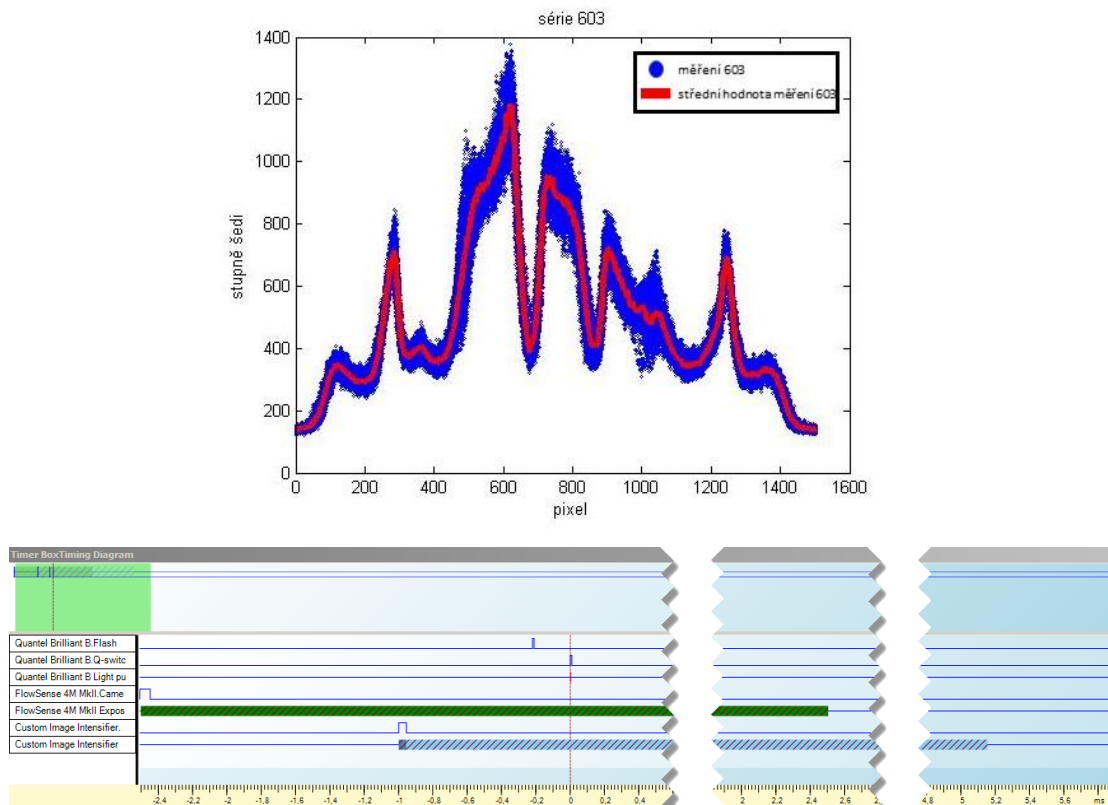
## Série 601



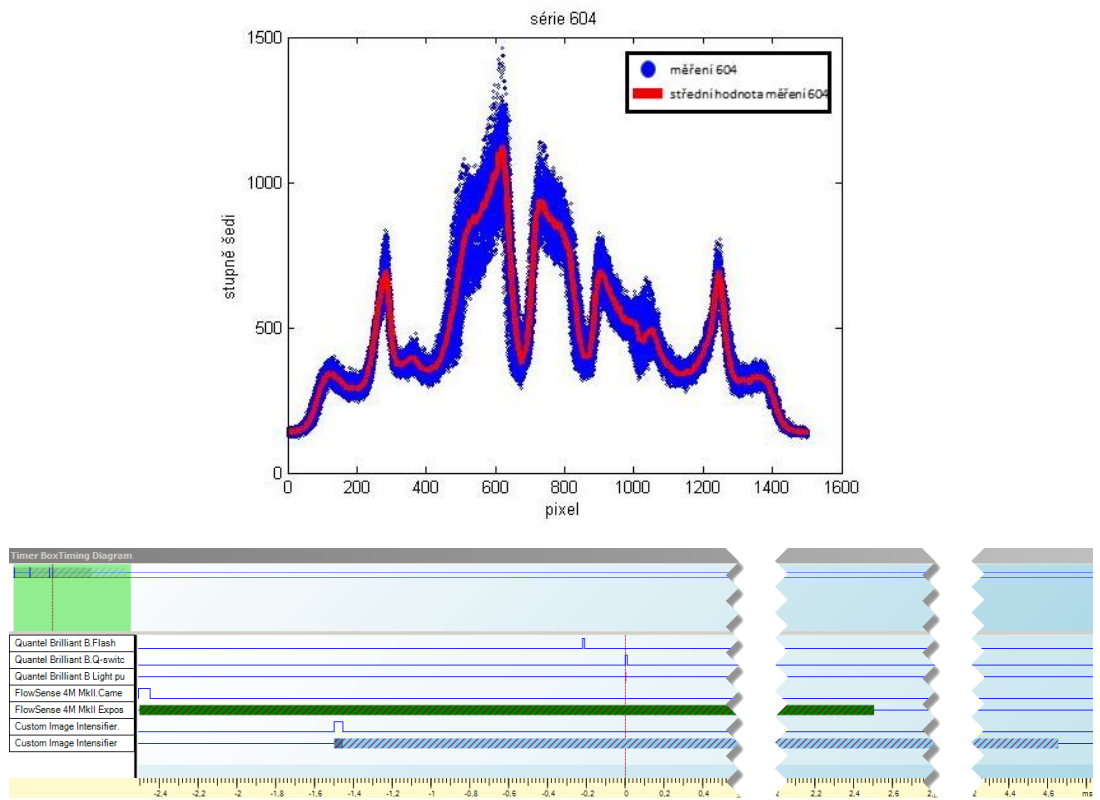
## Série 602



## Série 603

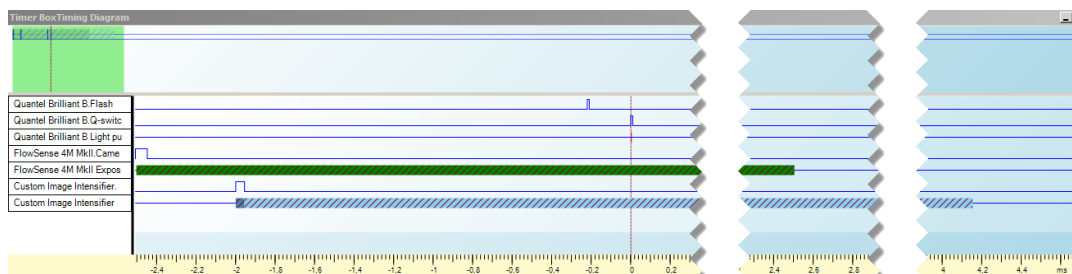
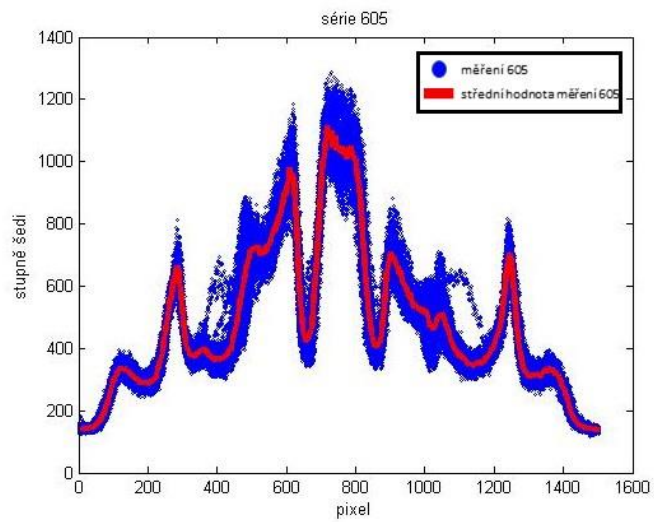


## Série 604

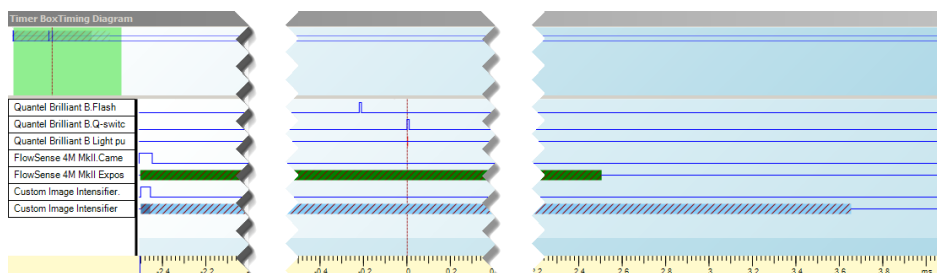
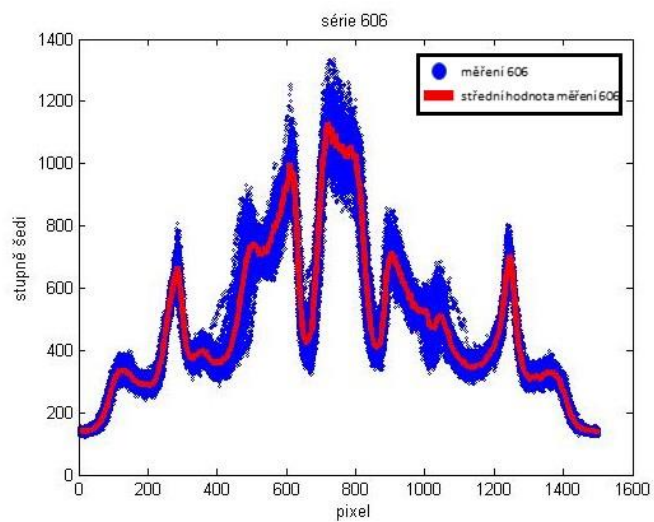




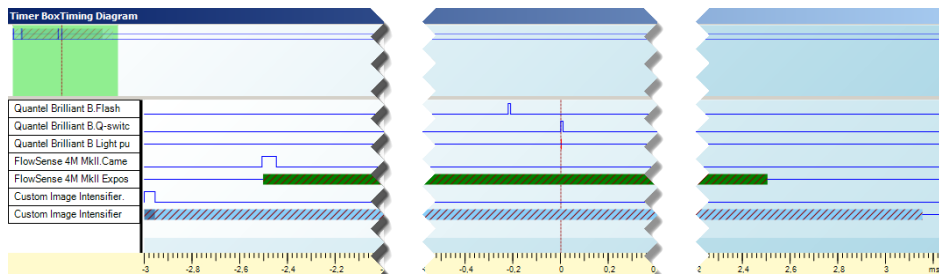
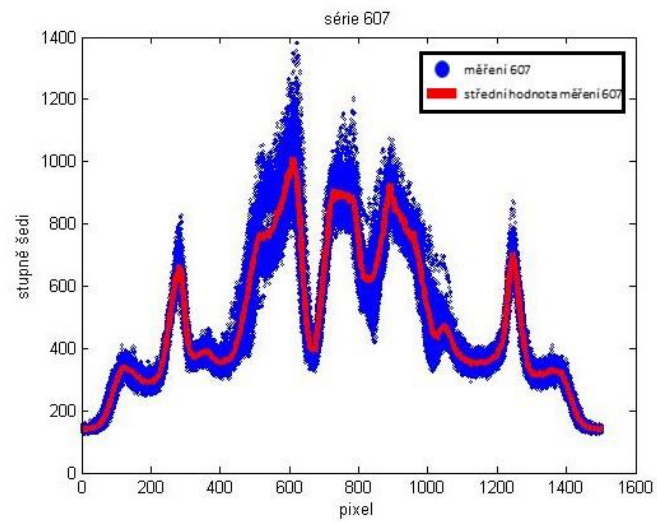
## Série 605



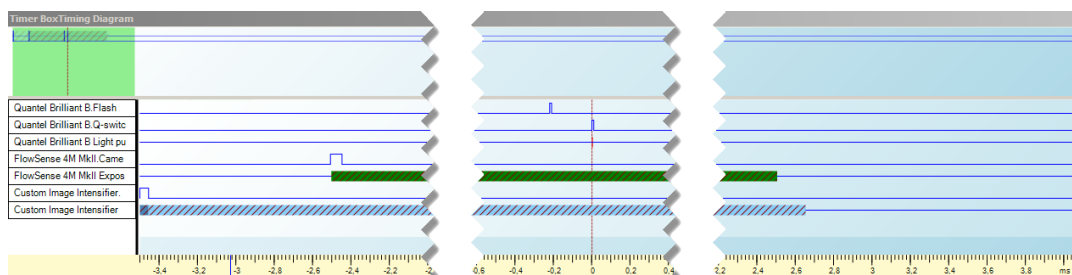
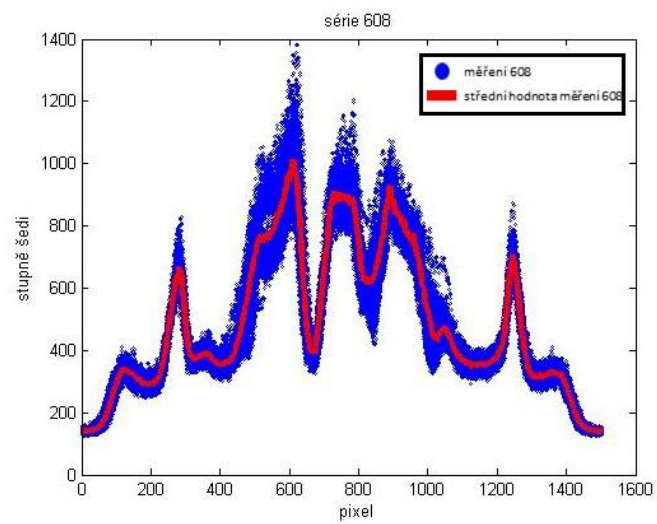
## Série 606



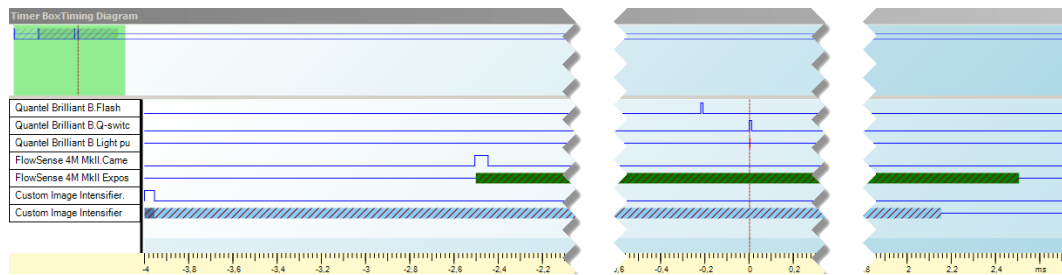
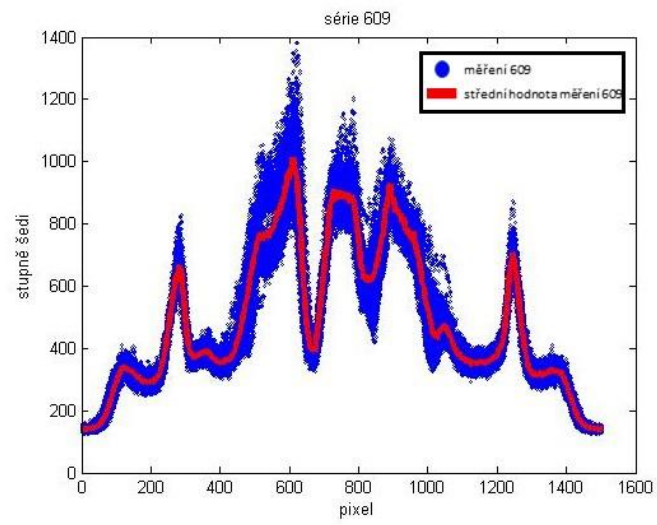
## Série 607



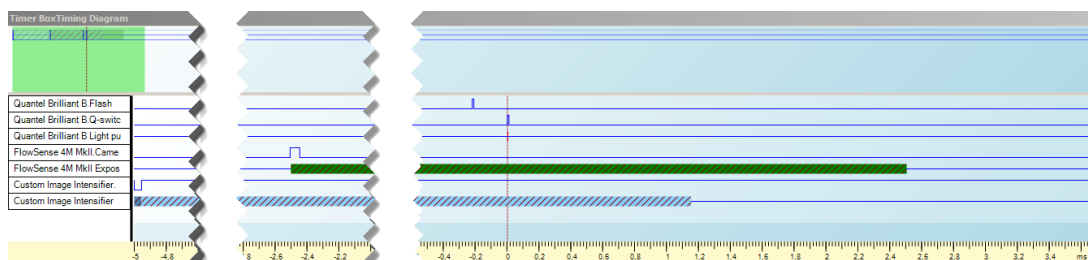
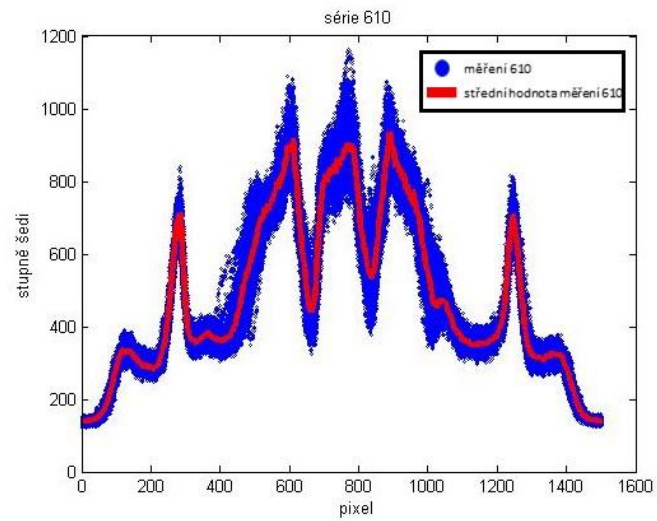
## Série 608



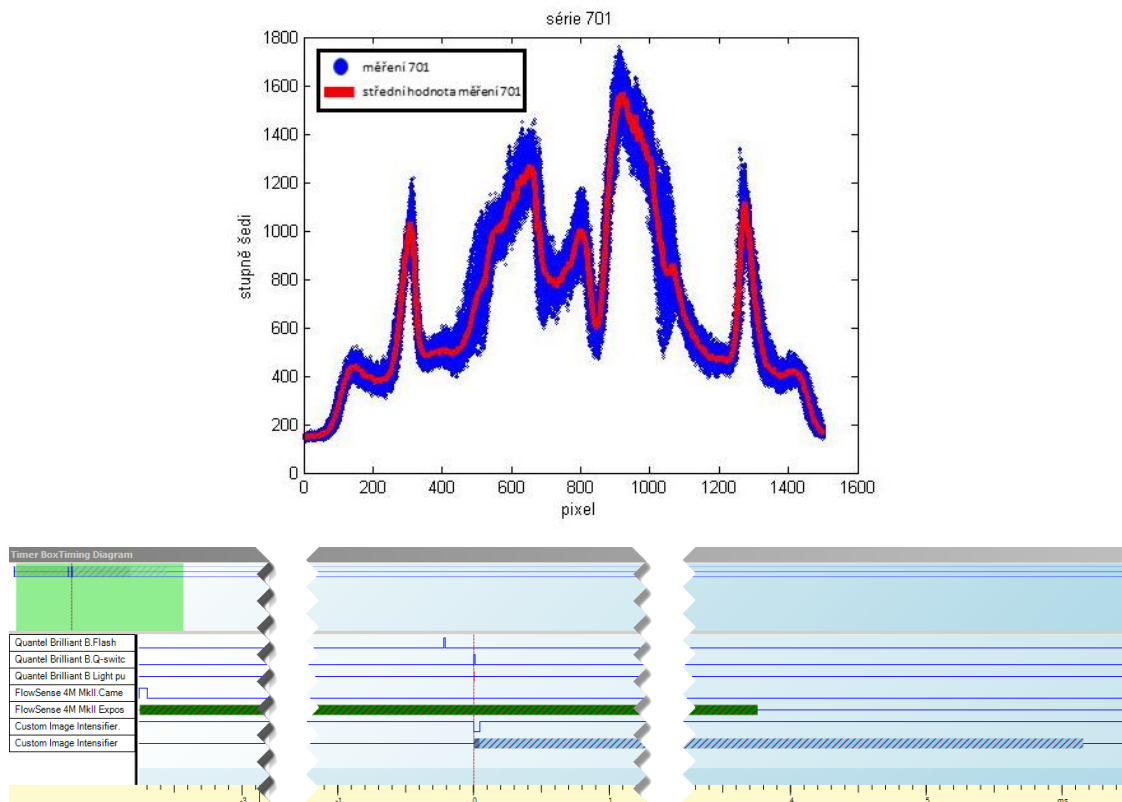
## Série 609



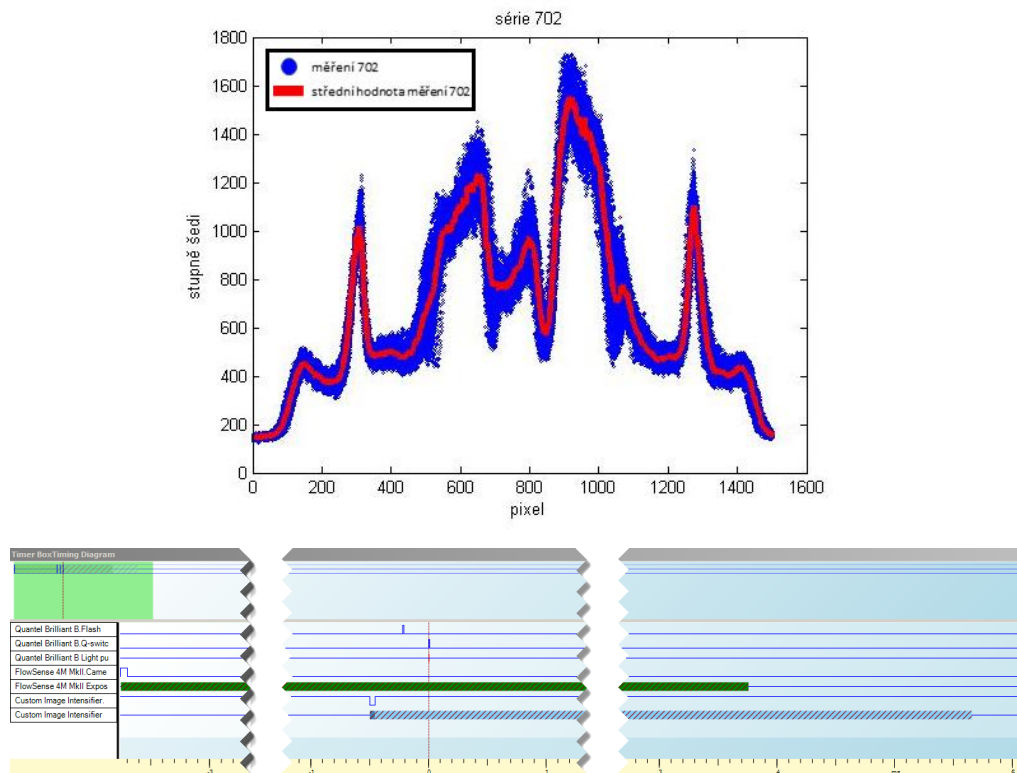
## Série 610



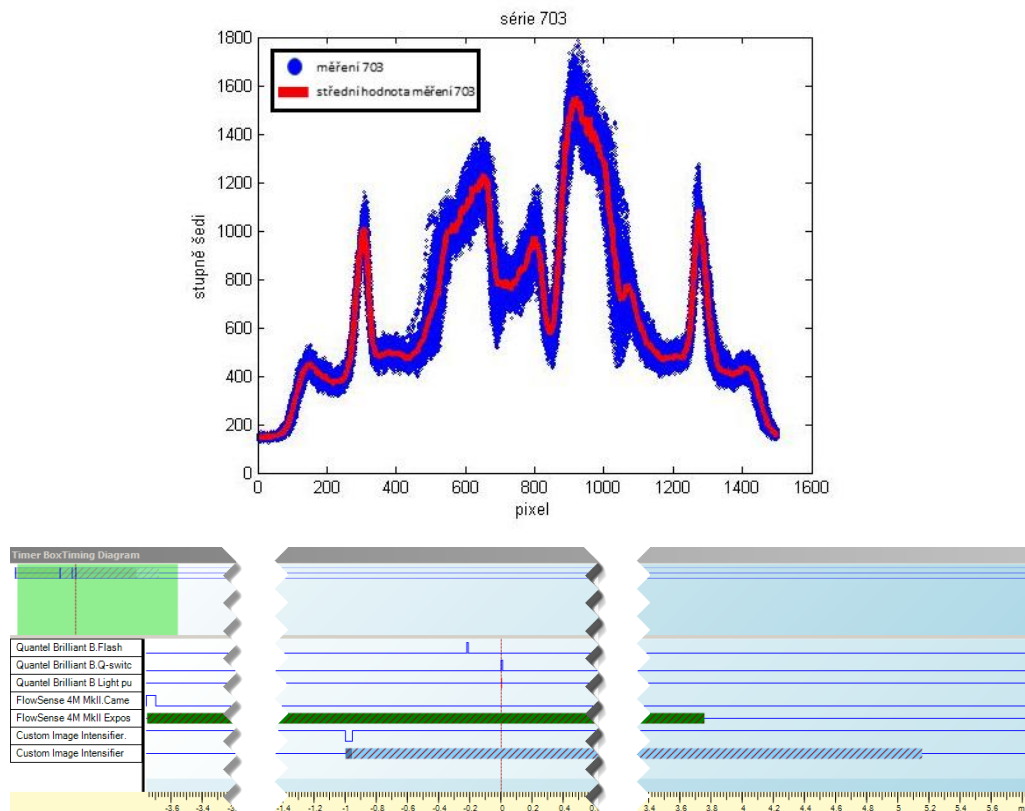
## Série 701



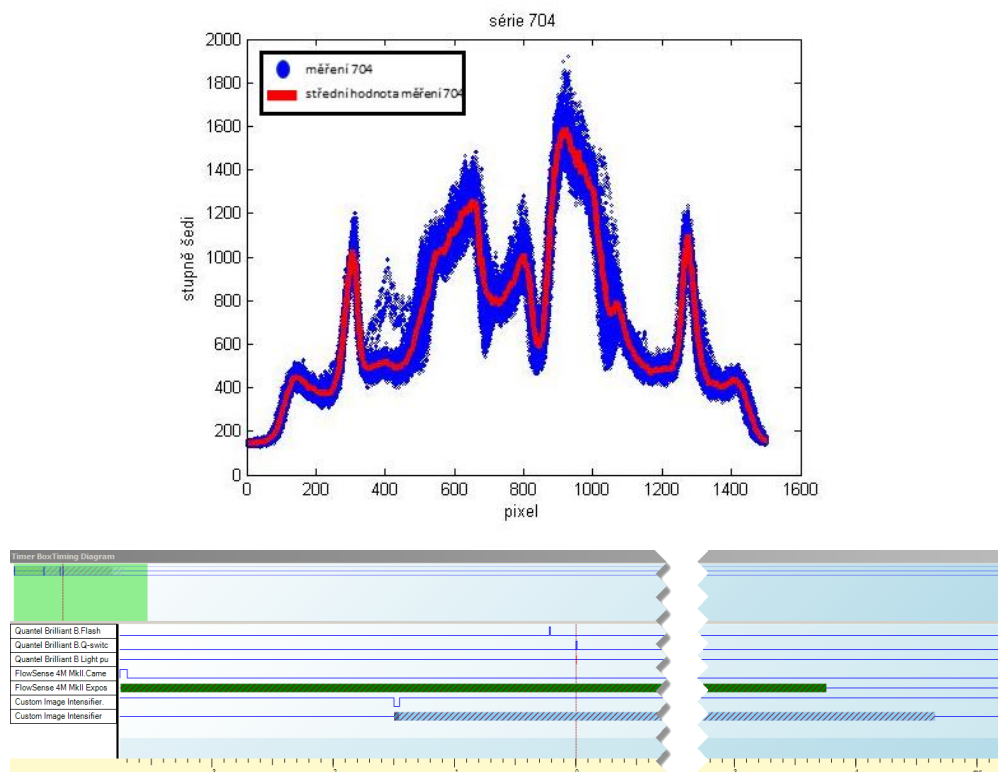
## Série 702



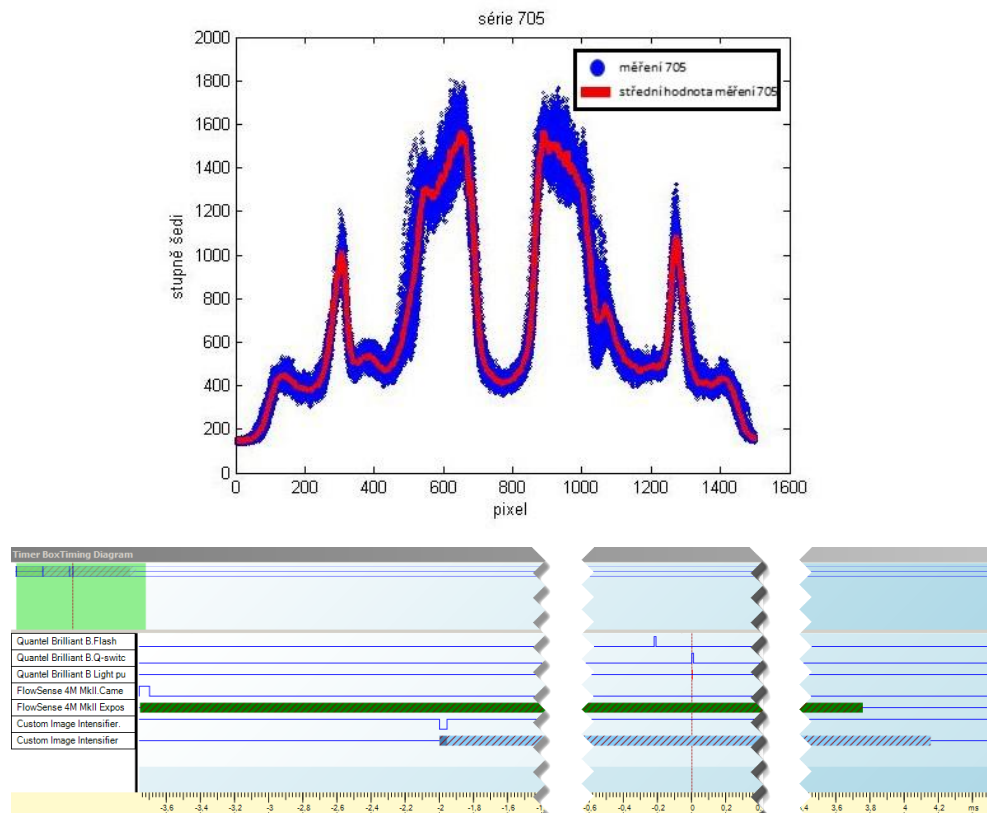
## Série 703



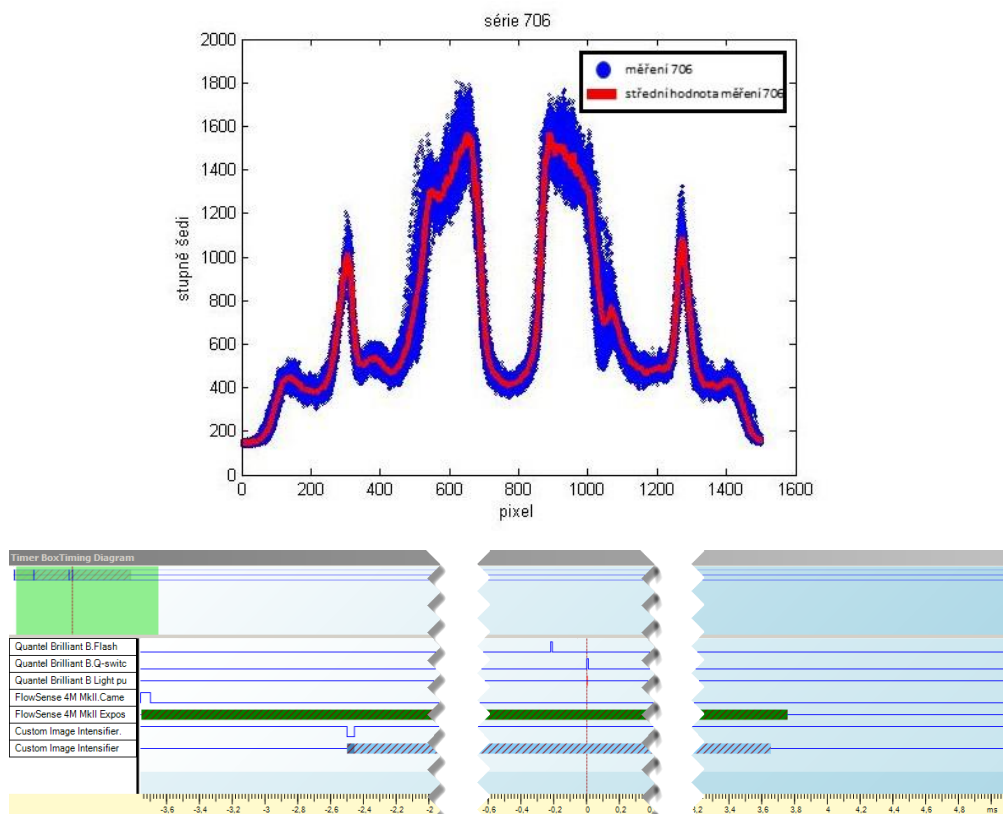
## Série 704



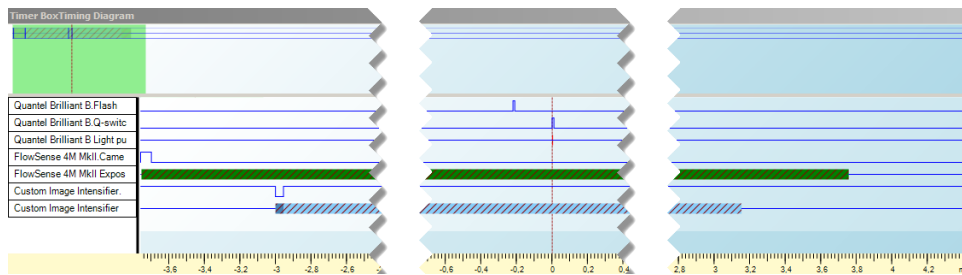
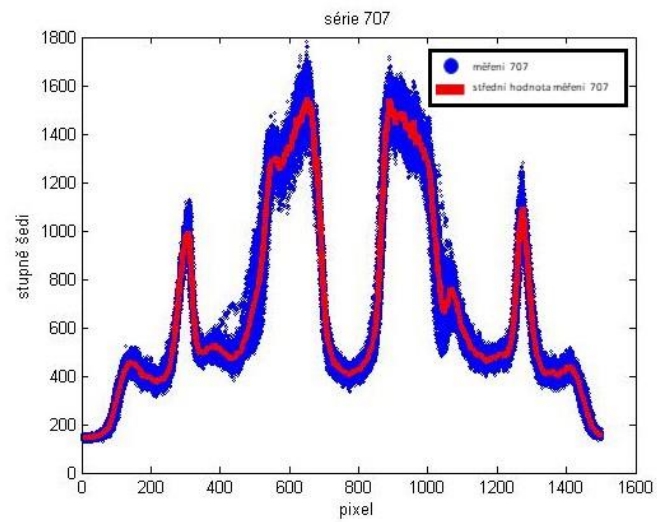
## Série 705



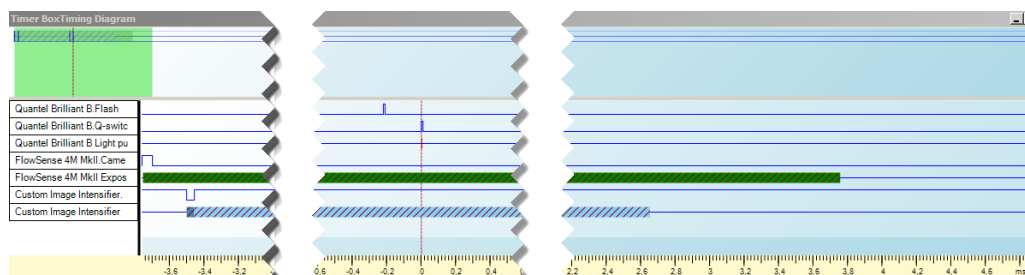
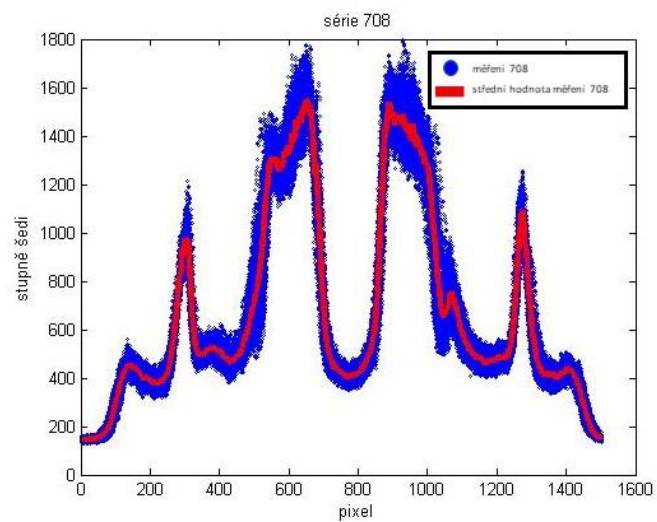
## Série 706



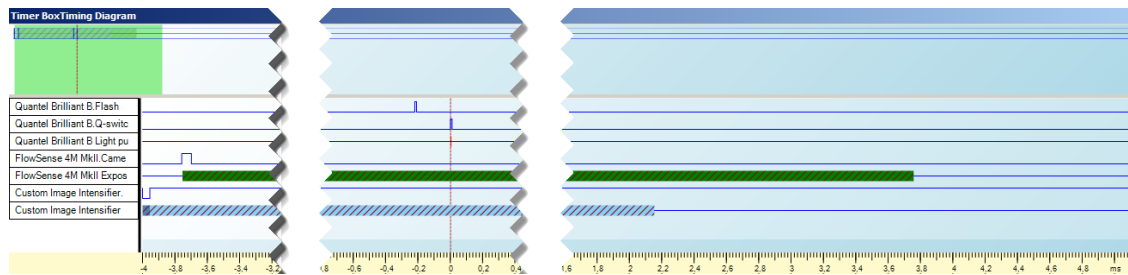
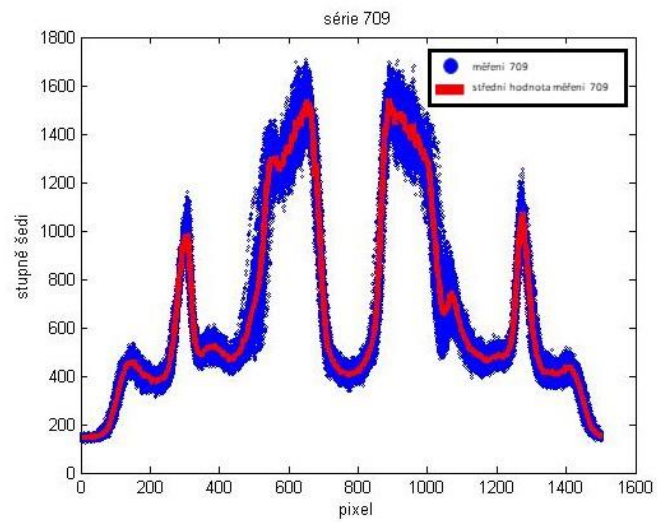
## Série 707



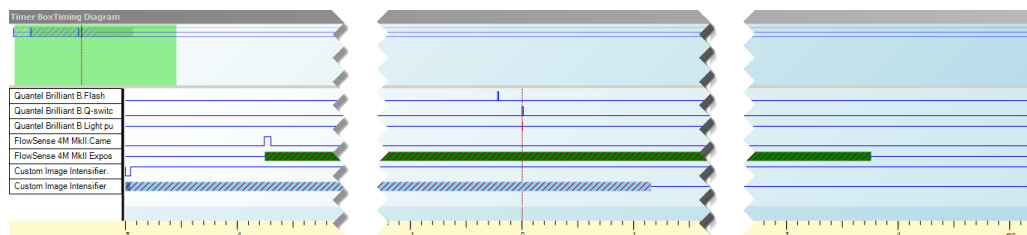
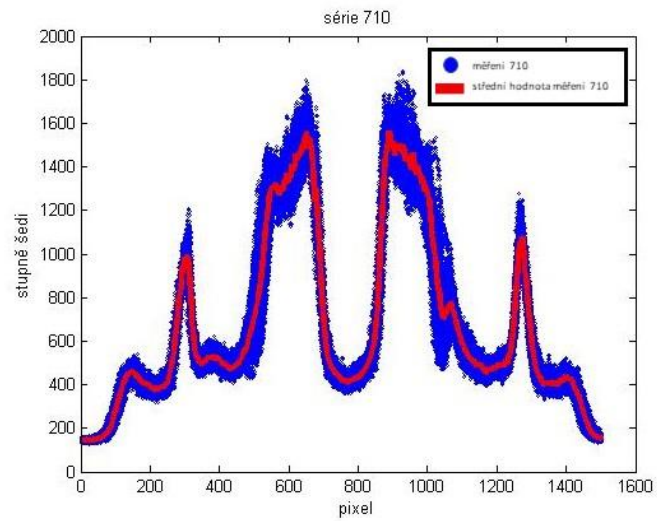
## Série 708



## Série 709

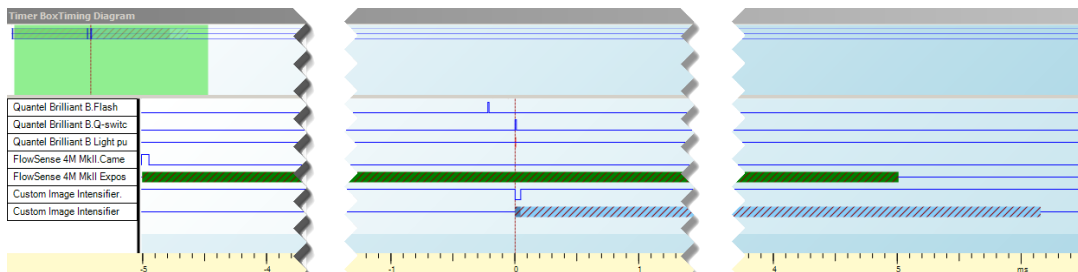
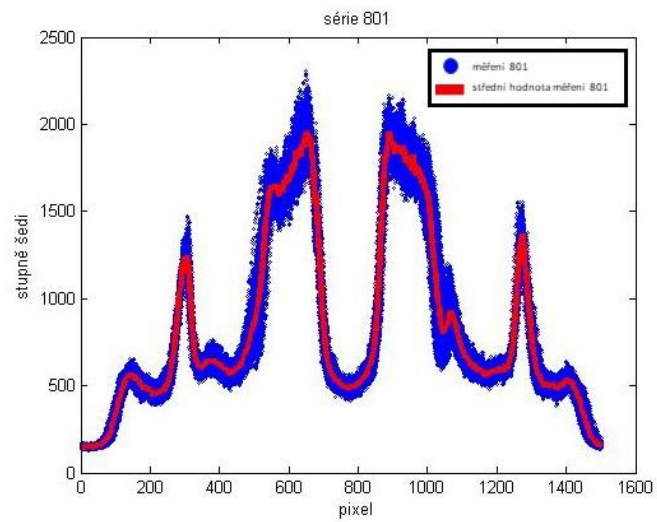


## Série 710

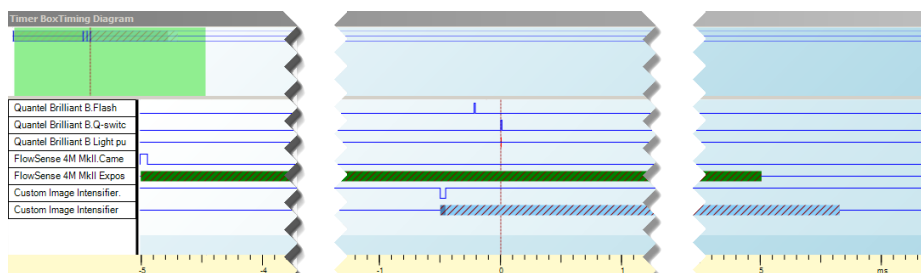
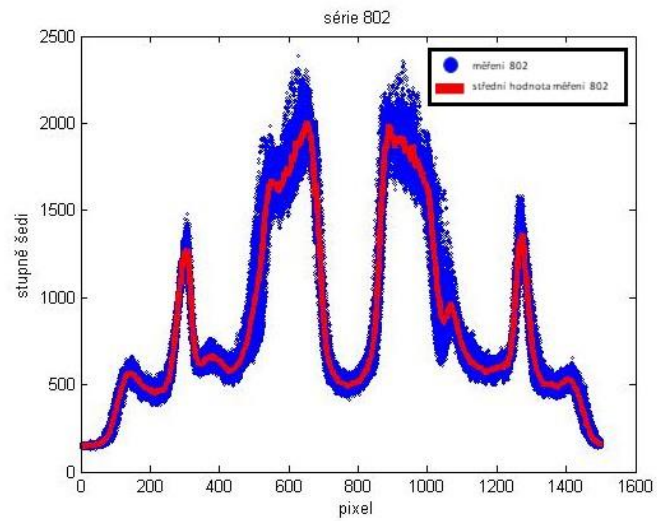




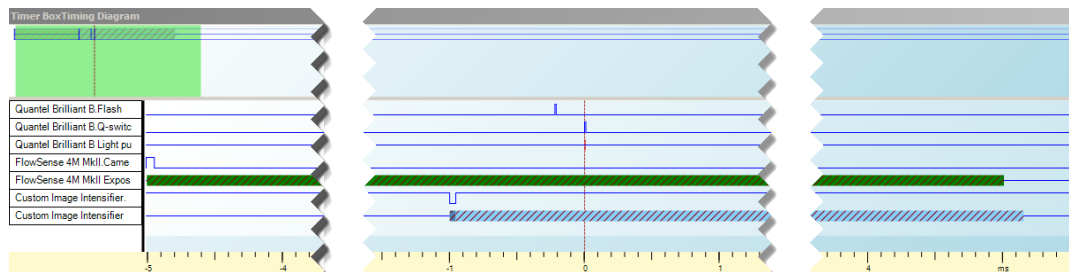
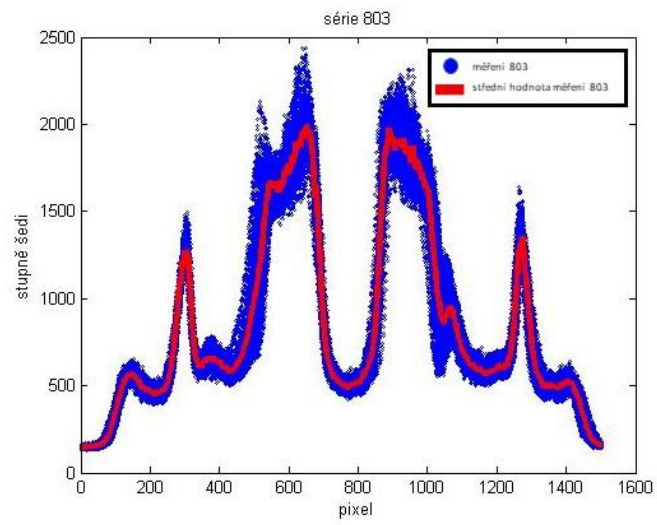
## Série 801



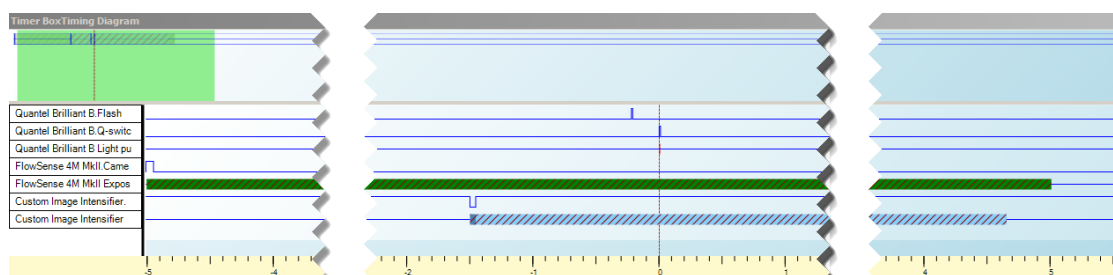
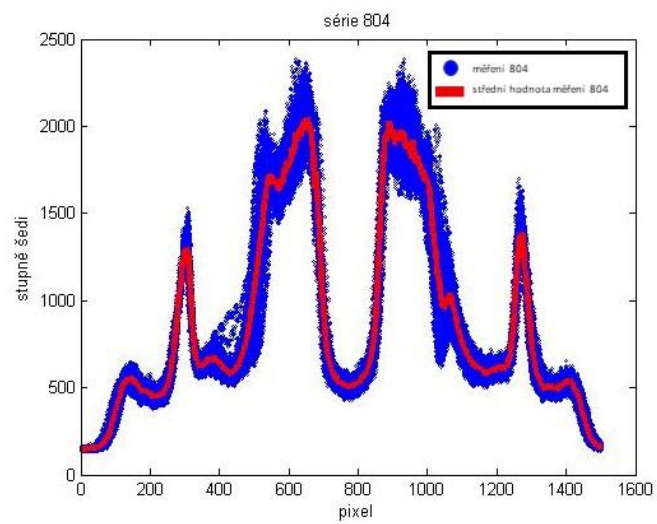
## Série 802



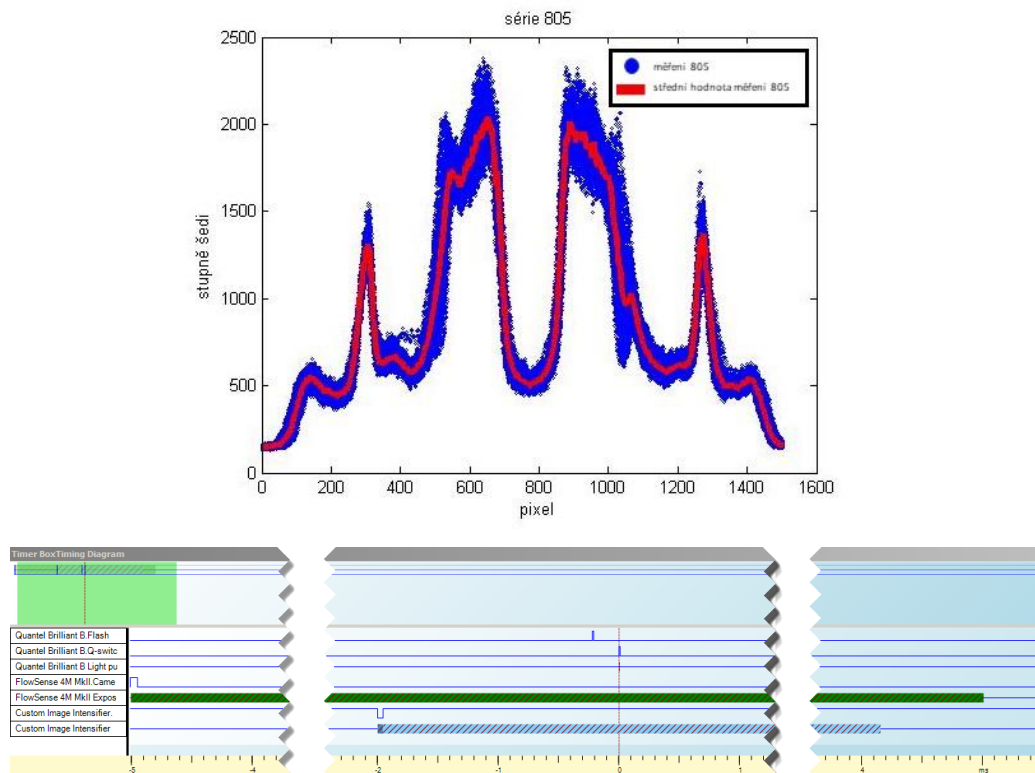
## Série 803



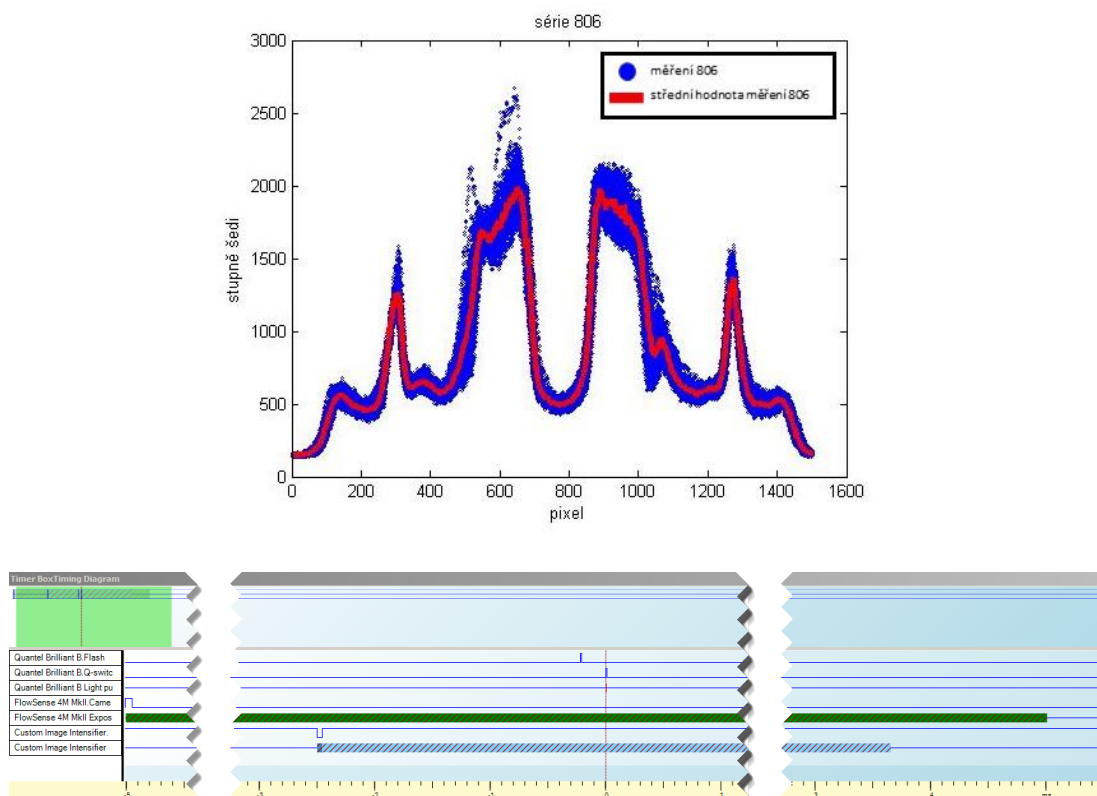
## Série 804



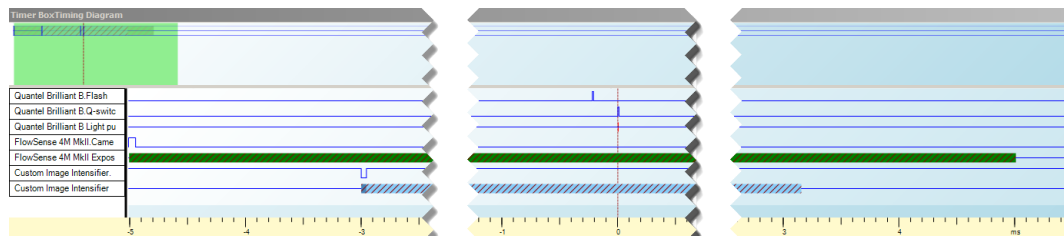
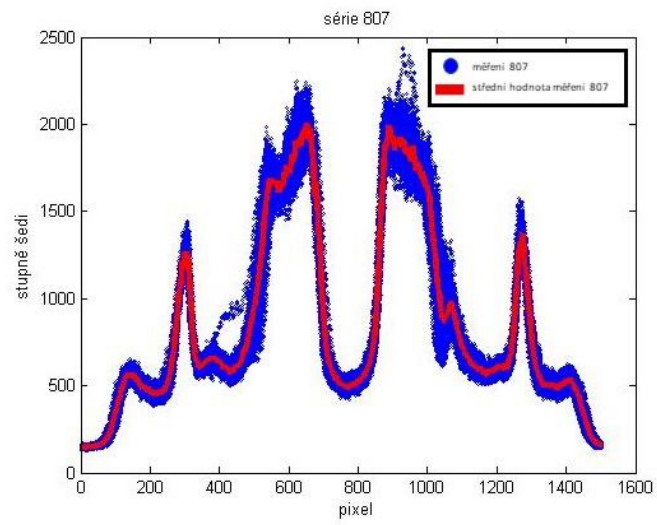
## Série 805



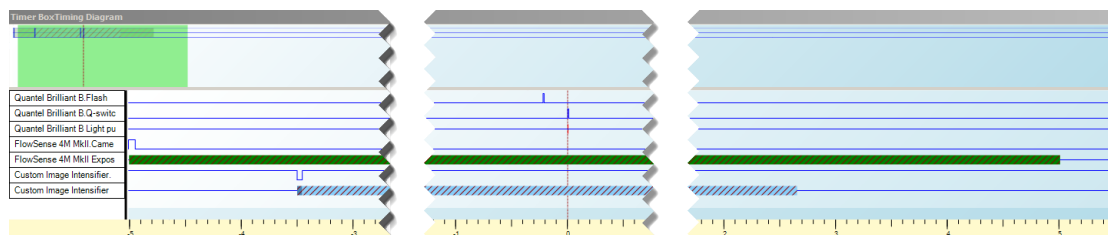
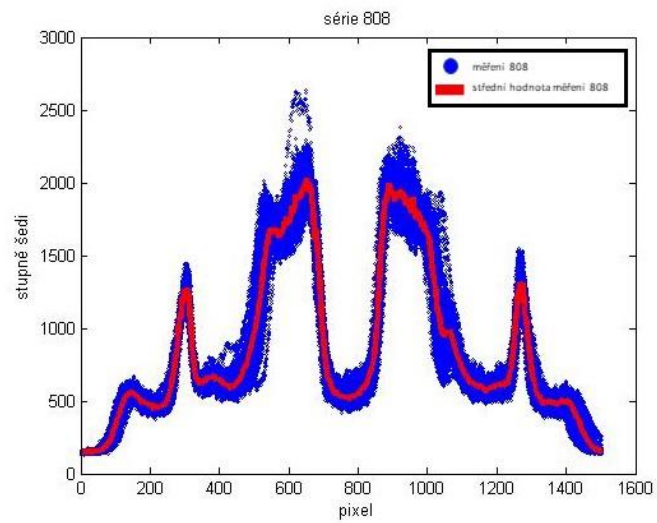
## Série 806



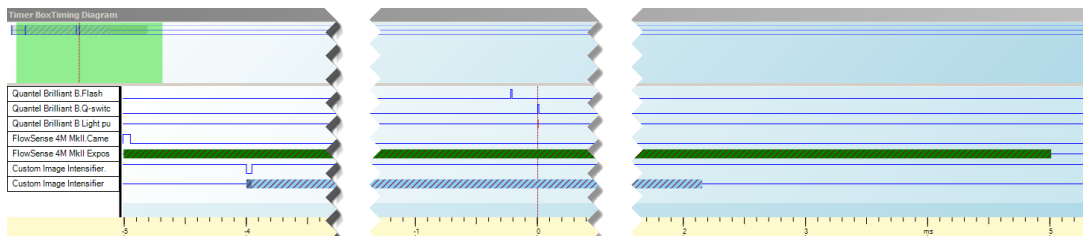
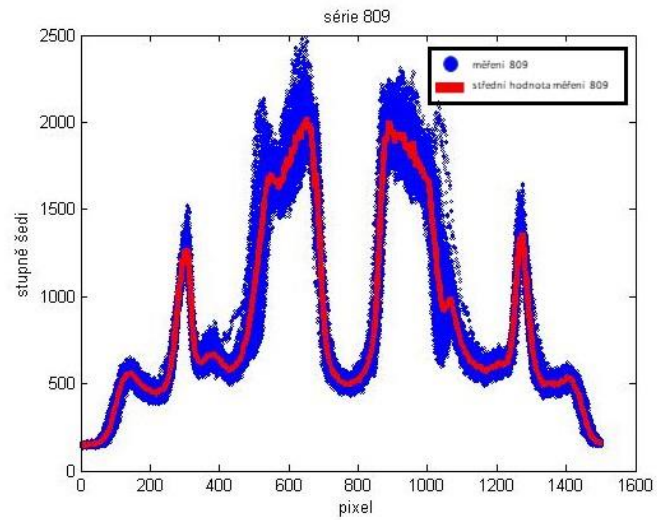
## Série 807



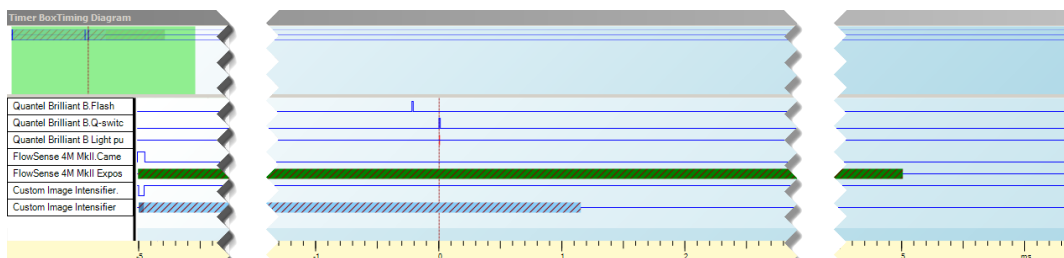
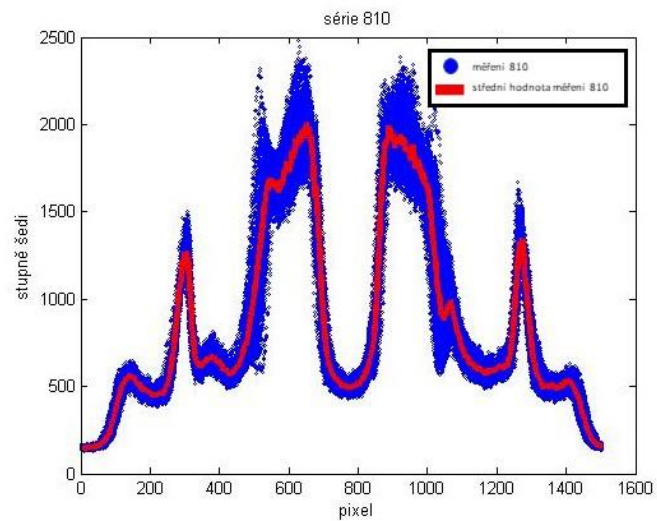
## Série 808



## Série 809



## Série 810



## 8. Příloha 2

Zdrojový kód pro Matlab – vyhodnocení signál v řezu, sloučení po řádcích do jedné matice, vyhodnocení střední hodnota.

```
fx >> clear all

name='101.5ff9hax2.0000';
type='.tif';

nula=num2str(0);

for i=1:100

    A=num2str(i-1);
    if i<11;
        K=double(imread(strcat(name,nula,A,type)));
    else
        K=double(imread(strcat(name,A,type)));
    end

    B=K(:,(300:1800));

    data(i,:)=B(1700,:);

    %plot(B(1700,:), 'o')

end
```

Zdrojový kód pro Matlab – mapa nejvyššího gradientu pro sloučené signály každé série.

```
fx >> for i=1:8;
        for j=1:10;

            name='\dataXY.mat';
            nula='0';
            A=num2str(i);
            B=num2str(j)

            if j<10;
load(strcat(A,nula,B,name));
                stred=mean(data);
                g=gradient(stred);
                g=abs(g);
                G(i,j)=max(g);
            else
load(strcat(A,B,name));
                stred=mean(data);
                g=gradient(stred);
                g=abs(g);
                G(i,j)=max(g);
            end

        end
    end
save GRADIENT.mat G
surf(G)
```