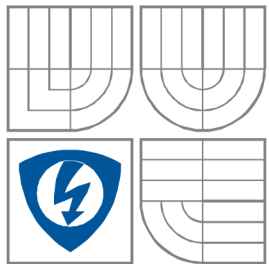


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND  
COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
TECHNOLOGY

VYHODNOCENÍ PROUDĚNÍ PLYNŮ U NAVRŽENÝCH  
TVARŮ SÍŤEK CLONEK SCINTILAČNÍHO DETEKTORU  
EVALUATION OF GAS FLOW AT THE PROPOSED SHAPES OF SCINTILATION  
DETECTOR APERTURE SIEVES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
Bachelor's thesis

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Roman Matloch

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Mikroelektronika a technologie**

**Student:** Roman Matloch

**ID:** 106629

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2010/2011

## NÁZEV TÉMATU:

**Vyhodnocení proudění plynů u navržených tvarů sítěk clonek scintilačního detektoru**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou elektronové mikroskopie v oblasti vakua a se systémy SolidWorks a Cosmos FloWorks. Pomocí systému Cosmos FloWorks vyhodnoťte rozdíl v oblasti proudění plynu při užití vybraných clonek tvaru sítě, ve srovnání s užívaným otvorem při různých tlacích v komoře vzorku, u scintilačního detektoru environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 2.6.2011

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt:**

V práci bude nejprve stručně popsána problematika elektronové mikroskopie a fyzikální model proudění tekutiny. Následně bude v systému SolidWorks, pro vytváření 3D objemových modelů, vytvořen zjednodušený trojrozměrný model scintilačního detektoru. Na tomto 3D modelu bude pomocí systému SolidWorks Flow Simulation metodou konečných objemů analyzováno a porovnáváno proudění plynu za clonkou. Tato clonka bude analyzována v několika variantách: clonka s otvorem 0.6 mm a clonky s otvory v podobě sítí. Výsledky analýz budou porovnány vzhledem k uvedeným požadavkům. Z analyzovaných části budou vhodné tvary následně prakticky proměřeny.

## **Abstract:**

This work describes briefly electron microscopy issue and physical model of fluid flow. Then the simplified three-dimensional model of scintillation detector will be created in SolidWorks system for 3D cubical models. The gas flow behind the screening in this 3D model will be analyzed and compared by method of finite cube method in SolidWorks Flow Simulation system. This screening will be analyzed in several variants: the screening with 0.6 mm opening and the screening with net-like openings. The results of analyses will be compared according to the requirements. The appropriate shapes from the analyzed parts will be practically measured.

## **Klíčová slova:**

Elektronová mikroskopie, EREM, scintilační detektor, clonka, síťka

## **Keywords:**

Electron microscopy, ESEM, scintillation detector, aperture, screen

## Bibliografická citace díla:

MATLOCH, R. *Vyhodnocení proudění plynů u navržených tvarů sítěk clonek scintilačního detektoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 51 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D..

## Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29. 5. 2011

.....

## Poděkování:

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu doc. Ing. Jiřímu Maxovi, Ph.D za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování této práce.

# OBSAH

ÚVOD .....	10
<b>1 MIKROSKOPIE .....</b>	<b>11</b>
1.1 Historie mikroskopie .....	11
1.1.1 OPTICKÁ A TRANSMISNÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE .....	11
1.1.2 RASTROVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE.....	12
1.2 Princip rastrovacího elektronového mikroskopu.....	12
1.2.1 ENVIRONMENTÁLNÍ RASTROVACÍ ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP (EREM).....	13
1.2.2 ENVIRONMENTÁLNÍ RASTROVACÍ ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP TYPU AQUASEM .....	14
<b>2 SCINTILAČNÍ DETEKTOR.....</b>	<b>15</b>
2.1 Historie vzniku .....	15
2.2 Princip funkce scintilačního detektoru .....	15
2.2.1 SLOŽENÍ SCINTILAČNÍHO DETEKTORU .....	16
2.3 Organické scintilátory .....	17
2.3.1 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA ORGANICKÝCH SCINTILÁTORŮ .....	17
2.3.2 PARAMETRY ORGANICKÝCH SCINTILÁTORŮ .....	17
2.3.3 POUŽITÍ ORGANICKÝCH SCINTILÁTORŮ.....	18
2.4 Anorganické scintilátory .....	18
2.4.1 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA ANORGANICKÝCH SCINTILÁTORŮ.....	18
2.4.2 PARAMETRY ANORGANICKÝCH SCINTILÁTORŮ.....	18
2.4.3 POUŽITÍ ANORGANICKÝCH SCINTILÁTORŮ .....	19
2.5 Scintilační detektor sekundárních elektronů pro VP-SEM se dvěma tlak omezujícími clonkami .....	19
<b>3 SIMULAČNÍ PROGRAMY.....</b>	<b>20</b>
3.1 Výběr simulačního programu.....	20
3.2 SolidWorks.....	20
3.2.1 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA .....	20
3.2.2 PARAMETRY PROGRAMU SOLIDWORKS .....	21
3.3 SolidWorks Flow Simulation .....	21
3.3.1 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA .....	21
3.3.2 PARAMETRY PROGRAMU SOLIDWORKS FLOW SIMULATION .....	22
<b>4 MECHANIKA TEKUTINY .....</b>	<b>23</b>
4.1 Dynamika tekutin .....	23
4.2 Matematický model proudění skutečných kapalin.....	24
4.2.1 TURBULENTNÍ PROUDĚNÍ.....	24
4.3 Rovnice kontinuity .....	25
4.4 Navierova-Stokesova rovnice .....	26

4.5 Rovnice zachování energie.....	26
<b>5 POPIS ŘEŠENÉHO PROJEKTU .....</b>	<b>27</b>
5.1 Proudění plynu v VP-SEM AQUASEM II a jeho vliv na elektronový svazek.....	27
5.2 Proudění plynu v detektoru .....	28
5.3 Popis clonky v řešeném projektu.....	29
5.4 Popis zjednodušeného modelu .....	30
5.5 Okrajové podmínky .....	30
<b>6 NAMĚŘENÉ HODNOTY .....</b>	<b>32</b>
6.1 Hodnoty změřené na zjednodušeném modelu s jednou clonkou .....	32
6.1.1 HODNOTY ZMĚŘENÉ NA MODELU DETEKTORU – CLONKA Č.1(0,6MM, 1OKO, PŮVODNÍ).32	
6.1.2 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ PRO TLAK V KOMOŘE VZORKU 1000 PA .....	33
6.1.3 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ PRO VARIANTU CLONKY Č. 1 (0.6 MM,1 OKO, PŮVODNÍ).....	34
6.1.4 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ PRO VARIANTU CLONKY Č. 2 (0.1 MM, 150 OK).....	36
6.1.5 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ PRO VARIANTU CLONKY Č. 3 (0.05 MM, 300 OK).....	38
6.1.6 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ PRO VARIANTU CLONKY Č. 4 (0.05 MM, 300 OK, HEX.) .....	40
6.2 Shrnutí výsledků pro zjednodušený model s jednou clonkou .....	42
6.3 Hodnoty změřené na zjednodušeném modelu s třemi clonkami .....	43
6.3.1 POPIS ZJEDNODUŠENÉHO MODELU .....	43
6.3.2 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ PRO CLONKY Č. 4 (0.05 MM, 300 OK, HEX.) 200 PA .....	44
6.3.3 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ PRO CLONKY Č. 4 (0.05 MM, 300 OK, HEX.) 1000 PA .....	46
6.4 Shrnutí výsledků pro zjednodušený model s třemi clonkami .....	48
<b>7 ZÁVĚR.....</b>	<b>49</b>

## Seznam obrázků

<b>Obr. 2.1</b> Části scintilačního detektoru [2].....	16
<b>Obr. 2.2</b> Schéma scintilačního detektoru [1] .....	19
<b>Obr. 4.3</b> Laminární a turbulentní proudění.....	24
<b>Obr. 5.4</b> Schéma VP-SEM AQUASEM II [1].....	27
<b>Obr. 5.5</b> Schéma oblastí s rozdílnými hodnotami tlaku detektoru sekundárních elektronů pro EREM [1].....	28
<b>Obr. 5.6</b> Schéma rozložení tlaku v detektoru sekundárních elektronů pro EREM [1] .....	29
<b>Obr. 5.7</b> Tvary vybraných clonek.....	29
<b>Obr. 5.8</b> Zjednodušený model s jednou clonkou.....	30
<b>Obr. 5.9</b> Uspořádání zjednodušeného modelu.....	31
<b>Obr. 6.10</b> Graf závislosti tlaků na tlaku v komoře vzorku [1].....	32
<b>Obr. 6.11</b> Graf závislosti tlaků u scintilátoru na tlaku v komoře vzorku pro všechny clonky .....	33
<b>Obr. 6.12</b> Průběh tlaku a Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku Clonka č. 1 (0.6 mm,1 oko, původní).....	34
<b>Obr. 6.13</b> Rozložení tlaku u varianty 1000 Pa v komoře vzorku Clonka č. 1 (0.6 mm,1 oko, původní).....	34
<b>Obr. 6.14</b> Rozložení Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku Clonka č. 1 (0.6 mm,1 oko, původní).....	34
<b>Obr. 6.15</b> Vektory rychlostí proudění - Clonka č. 1 (0.6 mm,1 oko, původní).....	35
<b>Obr. 6.16</b> Nastavení sítě - Clonka č. 1 (0.6 mm,1 oko, původní).....	35
<b>Obr. 6.17</b> průběh tlaku a Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku Clonka č. 2 (0.1 mm, 150 ok).....	36
<b>Obr. 6.18</b> Rozložení tlaku u varianty 1000 Pa v komoře vzorku Clonka č. 2 (0.1 mm, 150 ok).....	36
<b>Obr. 6.19</b> Rozložení Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku Clonka č. 2 (0.1 mm, 150 ok).....	36
<b>Obr. 6.20</b> Rozložení Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku Clonka č. 2 (0.1 mm, 150 ok) detail .....	37
<b>Obr. 6.21</b> Vektory rychlostí proudění - Clonka č. 2 (0.1 mm, 150 ok).....	37
<b>Obr. 6.22</b> Nastavení sítě - Clonka č. 2 (0.1 mm, 150 ok).....	37
<b>Obr. 6.23</b> Nastavení sítě - Clonka č. 2 (0.1 mm, 150 ok) – detail.....	37
<b>Obr. 6.24</b> Průběh tlaku a Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku Clonka č. 3 (0.05 mm, 300 ok).....	38
<b>Obr. 6.25</b> Rozložení tlaku u varianty 1000 Pa v komoře vzorku Clonka č. 3 (0.05 mm, 300 ok).....	38
<b>Obr. 6.26</b> Rozložení Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku Clonka č. 3 (0.05 mm, 300 ok).....	38
<b>Obr. 6.27</b> Rozložení Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku Clonka č. 3 (0.05 mm, 300 ok) – detail .....	39

<b>Obr. 6.28</b> Vektory rychlostí proudění - Clonka č. 3 (0.05 mm, 300 ok) .....	39
<b>Obr. 6.29</b> Nastavení sítě - Clonka č. 3 (0.05 mm, 300 ok) .....	39
<b>Obr. 6.30</b> Nastavení sítě - Clonka č. 3 (0.05 mm, 300 ok) - detail.....	39
<b>Obr. 6.31</b> Průběh tlaku a Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku Clonka č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální).....	40
<b>Obr. 6.32</b> Rozložení tlaku u varianty 1000 Pa v komoře vzorku Clonka č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální).....	40
<b>Obr. 6.33</b> Rozložení Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku Clonka č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální).....	40
<b>Obr. 6.34</b> Rozložení Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku Clonka č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální) – detail.....	41
<b>Obr. 6.35</b> Vektory rychlostí proudění - Clonka č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální).....	41
<b>Obr. 6.36</b> Nastavení sítě - Clonka č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální).....	41
<b>Obr. 6.37</b> Nastavení sítě - Clonka č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální) - detail .....	41
<b>Obr. 6.38</b> Zjednodušený model s třemi clonkami.....	43
<b>Obr. 6.39</b> Zjednodušený model se třemi clonkami pro průběh tlaků v komoře scintilátoru .....	43
<b>Obr. 6.40</b> Průběh tlaku a Machova čísla při tlaku 200 Pa v komoře vzorku Clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální).....	44
<b>Obr. 6.41</b> Rozložení tlaku při tlaku 200 Pa v komoře vzorku Clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální).....	44
<b>Obr. 6.42</b> Rozložení Machova čísla při tlaku 200 Pa v komoře vzorku Clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální).....	44
<b>Obr. 6.43</b> Rozložení Machova čísla při tlaku 200 Pa v komoře vzorku Clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální) – detail.....	45
<b>Obr. 6.44</b> Vektory rychlostí proudění při tlaku 200 Pa v komoře vzorku Clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální).....	45
<b>Obr. 6.45</b> Průběh tlaku a Machova čísla při tlaku 1000 Pa v komoře vzorku Clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální).....	46
<b>Obr. 6.46</b> Rozložení tlaku při tlaku 1000 Pa v komoře vzorku Clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální).....	46
<b>Obr. 6.47</b> Rozložení Machova čísla při tlaku 1000 Pa v komoře vzorku Clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální).....	46
<b>Obr. 6.48</b> Rozložení Machova čísla při tlaku 1000 Pa v komoře vzorku Clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální) – detail.....	47
<b>Obr. 6.49</b> Vektory rychlostí proudění při tlaku 1000 Pa v komoře vzorku Clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální).....	47



## Seznam tabulek

<b>Tab. 6.1</b> Hodnoty tlaků pro různé hodnoty tlaku v komoře vzorku - původní clonka [1] .....	32
<b>Tab. 6.2</b> Výsledky pro různé clonky pro tlak v komoře vzorku 1000 Pa .....	33
<b>Tab. 6.3</b> Srovnání výsledků navržených clonek s původní při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa .....	33
<b>Tab. 6.4</b> Srovnání výsledků navržených clonek s původní při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa .....	48

# ÚVOD

Mikroskopie patří mezi nejdynamičtější se rozvíjející oblasti dnešní doby. Jako v mnoha jiných oblastech byla spjata s novými objevy a moderními vědeckými postupy v každém jednotlivém období. Její vývoj začal koncem devatenáctého století, pokračoval souběžně s vývojem optiky, avšak vzhledem k fyzikálním vlastnostem světla tento směr dosáhl svého mezního bodu. V první polovině dvacátého století však začaly pokusy směřující k novým metodám zkoumání mikrosvětla a výsledkem bylo vytvoření prvních elektronových mikroskopů. V průběhu druhé poloviny dvacátého století bylo vyvinuto několik principů elektronové mikroskopie, avšak ne všechny odpovídaly požadavkům, které na ně byly kladeny. V moderní době lze spatřit budoucnost v environmentální rastrovací elektronové mikroskopii. Právě touto technologií se bude tato práce zabývat.

Avšak trendem dnešní doby je vylepšování všech produktů. Vědečtí pracovníci stále přicházejí s novými idejemi, jak posouvat hranici možností dál, s čímž je ovšem spjata cena za vývoj. Určitě nemalou položkou jsou praktické pokusy na prototypch, což ale zahrnuje náklady na jejich výrobu a měřicí přístroje. S vývojem počítačové techniky se začaly vyvíjet i počítačové simulační programy a právě ony mohou nabídnout druhou, levnější a rychlejší cestu pro získání dat k vyhodnocení, zda navrhované úpravy budou v praxi použitelné. V této práci bude použit modelovací program SolidWorks pro konstrukci elektronového mikroskopu a jeho scintilačního detektoru a následně bude provedeno několik simulací v programu SolidWorks Flow Simulation .

Jak vyplývá z názvu, bude provedeno vyhodnocení proudění plynů u navržených tvarů sítěk clonek scintilačního detektoru. V projektu se nejdříve seznámíme s celkovým vývojem mikroskopie, elektronové mikroskopie a jelikož je oblast zkoumání zaměřena na konkrétní část, to znamená scintilační detektor, zmíníme se i o jeho vývoji, principu funkce, druzích, které se vyskytují a seznámíme se i se scintilačním detektorem použitým pro tento pokus. Taktéž bude stručně probrán jev proudění tekutin a popíšeme programy, které byly využity po konstrukci a samotnou realizaci měření.

Po seznámení se s základy potřebnými k řešení problematiky přejdeme ke konkrétnímu úkolu. Bude popsán použitý mikroskop, detektor, otázka clonek, které mají velký vliv na tlaky v komoře scintilátoru a propustnost elektronového svazku a následně si nastíníme první výsledky simulací.

Na závěr si shrneme již známé výsledky a porovnáme je s výsledky z pokusů.

# 1 MIKROSKOPIE

V této kapitole budou popsány stručné základy elektronové mikroskopie: Popsán bude vznik, druhy a technologie v mikroskopii a proběhne seznámení s konkrétním přístrojem, na kterým je projekt řešen.

## 1.1 Historie mikroskopie

Touha člověka po poznání je zde od počátku jeho existence. Člověk se snaží poznávat své okolí všemi smysly - dotekem, chutí, sluchem, hmatem a zrakem. A právě zrak je jedním z nejdůležitějších smyslů pro prozkoumávání svého okolí. Právě touto cestou se také své poznatky pokoušíme předávat pomocí zobrazení různé informace obrazem i písmem. Když se již zdály být všechny pouhým okem viditelné věci lidem známy, začali lidé používat poznatky z optiky k zvětšování okem špatně viditelných objektů. Již v starověku se používaly broušené nerosty jako náhrada za čočky v brýlích. Jejich správným uspořádáním vznikne optická soustava tvořící základ mikroskopu, resp. mikroskopie, které název je odvozen ze spojení slov z řeckého jazyka mikros-tj. malý a skopeo ve významu „dívat se na.“

První přístroj na principu uspořádání čoček za účelem zvětšení objektu, který bylo možné považovat za mikroskop, byl údajně zkonstruován otcem a synem Jensenovými koncem 16. století. Na jejich práci navázal v dalším století Antonio van Leeuwenhoek. Jeho mikroskopy byly však omezené konstrukcí využívající pouze jednu čočku. Ve stejném století byl Robertem Hookem zkonstruován již vícečočkový mikroskop. V 19. století prožívají optické mikroskopy zlatý věk, mezi jinými i díky Carlu Zeissovi, jenž se také podílel významnou měrou na jejich produkci.

V první třetině 20. století je dosažen teoreticky vrchol optické mikroskopie, to znamená dosažení hranice tisícínásobného zvětšení a rozlišení dvou desetin mikrometrů.

### 1.1.1 Optická a transmisní elektronová mikroskopie

Princip optické mikroskopie spočívá v uspořádání dvou soustav čoček - okuláru a objektivu, se společnou optickou osou, jimiž prochází světlo a vzniká převrácený obraz pozorovaného objektu. Vlnová délka světla, stejně jako kvalita optiky jsou limitujícím prvkem.

Vzhledem k tomuto faktu byl využit objev z počátku 20. století popisující chování elektronů ve vakuu podobné světlu, s tím rozdílem, že dosahují vlnovou délku téměř stotisíci násobně kratší jak světlo, pro konstrukci prvního elektronového mikroskopu. Tento přístroj byl zkonstruován Ernestem Ruskem v roce 1931, za který dostal o 55 let později Nobelovu cenu. Ruskův mikroskop byl založen na principu optického mikroskopu, kde světlo bylo nahrazeno svazkem elektronů emitovaným wolframovým vláknem umístěným ve vakuu a optika cívkami, které řídily tento svazek pomocí magnetického pole. Tento svazek urychlen dostatečným urychlovacím napětím procházel skrze vzorek a na konci bylo fluorescenční

stínitko emitující při dopadu elektronů světlo. Tato technologie byla známa pod jménem transmisní elektronová mikroskopie. Jelikož ale bylo pro transmisní elektronovou mikroskopii potřeba pořizovat velmi tenké vzorky a zobrazené oblasti byly velmi malé se značným zkreslením, tato technologie nebyla dále ve větší míře uplatňována.

### **1.1.2 Rastrovací elektronová mikroskopie**

Jiná technologie zakládající se na indikování elektronu odražených od vzorku se jmenuje rastrovací elektronová mikroskopie. Její začátky se datují kolem poloviny třicátých let minulého století. V této době lze zaznamenat výskyt prvních pokusů o zkonstruování REM. Avšak první mikroskop zakládající se na této technologii byl realizován týmem vedeným konstruktérem Zworykinem v roce 1942. Výsledkem jejich práce byl mikroskop s rozlišovací schopností 50 nm a zvětšením 8000x. Současné REM mohou mít rozlišovací schopnost 1 nm a zvětšení přes 400 000x.

Kombinací výše popsaných metod vznikne rastrovací transmisní elektronová mikroskopie. Touto cestou se vydal již v roce 1938 Dr. Manfred von Ardenne. Po třiceti letech vznikl první STEM mikroskop pro komerční účely. Dnes mohou dosahovat při milion násobném zvětšení rozlišovací schopnost až 1 nm.

## **1.2 Princip rastrovacího elektronového mikroskopu**

Zjednodušeně lze popsat fungování elektronového mikroskopu jako postupné skenování vzorku po řádcích a promítání získaného obrazu na obrazovku. Skenování je prováděno bombardováním vzorku elektrony emitovanými elektronovou tryskou.

Elektronová tryska je zdrojem tzv. primárních elektronů, emitovaných wolframovým vláknem (jako katodou), řídicí elektrodou, izolátorem a anodou. Svazek prochází kolem kondenzátorové čočky, následně kolem objektivové čočky, na které jsou rastrovací cívkami, jejichž působením je svazek vychylován tak, aby postupně po řádcích směřoval na povrch preparátu. Je nutné, aby napětí a proud byl velmi stabilní, aby bylo dosaženo optimálního výstupu

Pozorovaný objekt je ve vakuu, kterého je dosaženo pomocí olejové difúzní nebo turbomolekulární vývěvy. U obou se předběžně odčerpá vzduch rotační olejovou vývěvou. Pomocí těchto technologií je možné rychle vyměnit vzorek, vlákno a aperturu bez potřeby vakuových uzávěrů. Tento systém je řízen počítačem tudíž je možno se vyvarovat chybám obsluhy.

Na povrchu vzorku jsou dopadající elektrony látkou absorbovány nebo rozptylovány, a to pružně neztrácejíc svou energii a jsou odraženy zpět (zpětně odražené elektrony) nebo nepružně, kdy předávají svou energii elektronům v krystalické mřížce a dochází k jejich vypuzení látky, kde dle způsobu vznikají sekundární elektrony, Augerovy elektrony, RTG záření atd. Dále může docházet k jejich pohlcení, k emisi fotonů světla, přeměně energie elektronů primárního svazku na elektromotorickou sílu nebo jejich průchodu skrze ledovaný vzorek.

U rastrovací elektronové mikroskopie se pro zobrazení požadovaných informací, to znamená obrazu, používá scintilačního detektoru. U tohoto typu dopadají sekundární elektrony na fluorescenční stínítko emitující světlo, které po zesílení se pomocí fotonásobiče převede na elektrický signál. Je možné také použít jiné typy detektoru, například polovodičové umožňující sledovat dynamické elektrické jevy v zařízeních typu integrované obvody.

Moderní rastrovací elektrony umožňují zobrazovat na dvou až třech obrazovkách, z čehož je první určena k zobrazování stavu mikroskopu a jeho ovládání, druhý je vybaven fotoaparát. Obrazy pozorovaného vzorku jsou v digitální podobě a průběžně ukládány pro další zpracování. Kvalita obrazu a rozlišení závisí a průměru a intenzitě elektronového paprsku, urychlovacím napětí, rychlosti řádkování, přípravě vzorku a jeho vzdálenosti od poslední čočky zvané pracovní vzdálenost a jeho úhlu vůči detektoru.

Pro správné fungování celého systému je nutná správná příprava a aplikace pozorovaného objektu. Požadavky na samotný vzorek jsou dostatečná odolnost proti bombardování svazkem primárních elektronů a schopnost snést vakuum. Některé vzorky lze pozorovat bez jakékoliv přípravy. Vzorky by měly být osušeny, popřípadě lze tekutiny zmrazit, u nevodivých vzorků může dojít k jejich nabití, proto je na ně aplikována dostatečně tenká (kolem 10nm) vodivá vrstva z těžkých prvků naprašováním, Pro tuto vrstvu lze použít například zlato, jež vykazuje velmi dobré vlastnosti pro pozorování při bombardování elektrony. Je-li nemožné či nežádoucí tuto vrstvu aplikovat, lze v některých případech použít techniku nízkonapěťové REM, a to přizpůsobením klasického REM nebo připojením externího příslušenství. Vzorek je umístěn na držáku, který lze polohovat ve všech třech dimenzích a otáčet či naklánět, dále umožňují regulovat jeho teplotu nebo jej deformovat.

Komora vzorku je jeden z určujících parametrů ceny elektronového mikroskopu, vzhledem k náročnosti na provedení držáku vzorku a dosažení vakua pro specifický objem. Moderní komory umožňují umístění vzorků s průměry v řádech jednotek centimetrů a jejich vodorovné polohování v rozsahu 5 cm. Největší pak v rozsahu 15cm při průměru vzorku až 20cm.

### **1.2.1 Environmentální rastrovací elektronový mikroskop (EREM)**

Vzhledem k požadavkům na vzorky pro rastrovací elektronovou mikroskopii a náročnosti na jejich splnění pro některé organické či neorganické objekty byl vyvinut mikroskop s odděleným prostředím tubusu a komory vzorku. Tato „environmentální“ komora, z jejíhož názvu je odvozeno jméno tohoto elektronového mikroskopu, je charakterizována rozdílným tlakem v řádech stovek Pascalů až do 3kPa, vůči vakuovému prostředí tubusu, kde tlak dosahuje hodnot v řádech tisíců až milionů Pascalů. Tohoto rozdílu je dosaženo diferenciálním čerpáním komory a tubusu a v něm systémem clon regulujících tlak. Avšak důsledkem zvýšeného tlaku dochází k srážkám elektronů z primárního svazku s atomy a molekulami plynů a jeho následného rozptylu. Tento jev způsobuje zhoršení rozlišovací schopnosti mikroskopu, z druhé strany klesají však požadavky na vzorky.

### **1.2.2 Environmentální rastrovací elektronový mikroskop typu AQUASEM**

Environmentální rastrovací elektronová mikroskopie je tedy trendem mikroskopie posledního desetiletí. [1]

Její prostřednictvím lze sledovat vzorky měkkých tkání a dynamické děje a reakce probíhající v plynném či vlhkém prostředí při tlaku vyšším než je tlak nasycených vodních par. Je možné pracovat do tlaku 2000 Pa, zatímco v tubusu mikroskopu je vakuum  $10^{-3}$  Pa a v diferenciálně čerpané komoře tlak 30 Pa. Mikroskop je vybaven kombinovaným detekčním systémem signálních elektronů, který umožňuje záznam obrazu vzorku v různých kontrastních módech, připouštění vodních par a jejich regulaci v komoře vzorku v libovolném rozmezí tlaku. Omezení destrukce měkkých tkání během procesu čerpání je dosahováno vypracovanou metodou cyklického zavodňování vzorku pomocí vodní injekce zabudované ke komoře vzorku. Mikroskop je universální a tedy může pracovat jak ve vakuu, tak i za zvýšeného tlaku ve vzorkové komoře. Ve vakuových podmínkách dosahuje rozlišení 4 nm a zvětšení až 300 000 krát.[1].

## 2 SCINTILAČNÍ DETEKTOR

Tato práce se zabývá scintilačním detektorem, proto je vhodné se seznámit s historií jeho vývoje a principem funkce.

### 2.1 Historie vzniku

První scintilační detektor byl sestaven počátkem 20. století Crookesem a Denverem a byl znám pod názvem spintariskop. Na principu jejich detekce záblesků na stínítku pokrytém vrstvou ZnS bylo pak experimentem Geigera a Mardsena dosaženo výsledků vedoucích k objevu jádra Ruthfordem.

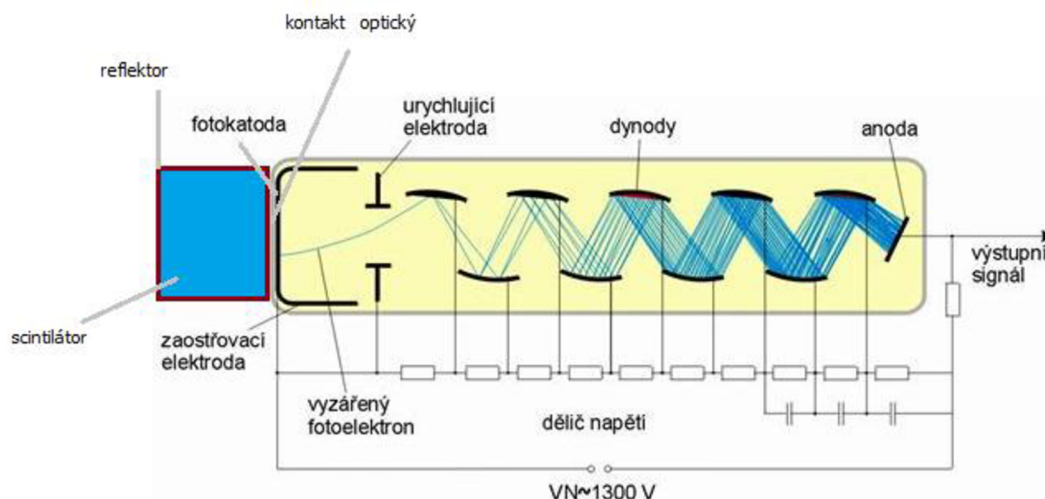
V průběhu 40. let 20. století byly prováděny pokusy nahradit počítání záblesků člověkem za přesnější elektronické detektory záblesků. To vedlo k objevům scintilačních vlastností organických a anorganických látek, kde velký význam má anorganický detektor na bázi NaI(Tl) objevený v roce 1948 Hofstadterem.

Následně v průběhu 50. a 60. let minulého století se vývoj posouval k objevům kapalných a plastických scintilátorů a také BGO scintilátoru. Obecně však mezi nejrozšířenější patří NaI(Tl) pro své nejlepší vlastnosti.

### 2.2 Princip funkce scintilačního detektoru

Jak již bylo zmíněno v kapitole: *Princip rastrovacího elektronového mikroskopu*, u rastrovací elektronové mikroskopie se pro zobrazení požadovaných informací, to znamená obrazu, používá scintilačního detektoru. U tohoto typu dopadají sekundární elektrony na fluorescenční stínítko emitující světlo, které se po zesílení pomocí fotonásobiče převede na elektrický signál.

Podrobněji lze detektor popsat takto: čidlo detektoru je tvořeno látkou s požadovanými scintilačními vlastnostmi, v němž při dopadu detekovaných částic dochází k jevu ionizace, což má za následek vypuzení jeho atomů a molekul. Při jejich ustálení však dojde k vypuzení energie ve formě světelného záření, jehož intenzita je úměrná velikosti této energie. Aby se mohly světelné fotony maximálně využít, obklopuje se scintilátor reflektorem. Následně je tato světelná energie přesunuta optickým kontaktem na fotokatodu fotonásobiče. Světlovodivé vlastnosti optického kontaktu musí být velmi dobré proto, aby nedošlo ke snížení energie a tudíž i kvality získaných dat. Nejlepší materiály pro tento přenos jsou minerální či silikonové oleje tvořící tenkou transparentní vrstvou mezi jednotlivými částmi.



**Obr. 2.1** Části scintilačního detektoru [2]

Fotonásobič tvoří druhou část detektoru, zde fotony emitované v scintilátoru a přenesené přes optický kontakt dopadají na fotokatodu. Fotokatoda následně uvolňuje fotoelektrony které jsou zaostřeny a urychlovány elektrodami na dynody. Každá z následujících dynod má o něco větší potenciál vůči předcházející dynodě. Při dopadu fotoelektronu dochází k emisi sekundárních elektronů, které následně putují na další dynodu. V konečném důsledku vzniká  $10^5$  až  $10^7$  násobek původní hodnoty. Nelze však opomenout, že fotonásobič pracuje periodicky a má tudíž určité časové rozlišení v řádu  $10^9$  sekundy. Toto časové rozlišení záleží od času absolvování trasy elektronu od fotokatody k anodě. Výsledný signál lze shromažďovat jak z anody, tak i z některé z dynod.

### 2.2.1 Složení scintilačního detektoru

Reflektor je první částí scintilačního detektoru a obklopuje scintilační materiál. Jeho účelem je odrazet scintilátorem emitované fotony tak, aby se všechny dostaly na katodu. Toho lze dosáhnout pouze za použitím vhodných materiálů se správným indexem lomu, které v poměru s indexem lomu scintilátoru dosahují mezní uhel, a tudíž dojde k totálnímu odrazu.

V některých případech, hlavně za účelem ochrany či redukce rozměrů mezi jednotlivými částmi, tzn. scintilátorem a fotonásobičem, jsou použity světlovody. Světlovody chrání fotonásobiče před vnějšími a vnitřními vlivy, vedou scintilace a mívají třetinové až dvoutřetinové ztráty. Bývají vyrobeny z organických skel. Křemenné skla pro svou cenu a obtížné zpracování se používají jen tehdy, nelze-li pro aplikaci použít jiný materiál.

U optického kontaktu mezi scintilátorem a fotonásobičem nesmí docházet k reflexi, která může být zapříčiněna nedokonalými plochami a vzduchovými bublinami mezi nimi. Tomuto jevu se zamezí použitím silikonových gelů nebo olejů v závislosti na druhu aplikace.



Podmínkou je použití materiálu se správným indexem lomu, vlnovou propustností v celém rozsahu a stálost těchto vlastností.

Následuje fotonásobič skládající se z fotokatody, zaostřovací elektrody, urychlující elektrody, dynodového elektronového násobícího systému a anody. Jednotlivé části jsou připojeny na dělič napětí a několik posledních dynod je napojeno přes kapacitor za účelem sběru signálů. Taktéž za stejným účelem je připojena anoda. Dynody mohou být v fokusovaném uspořádání, kdy jsou řešeny jako elektronový optický systém, nebo nefokusované struktury obsahující mezi jednotlivými dynodami mřížky za účelem zvýšení homogenity.

## 2.3 Organické scintilátory

Scintilátory se dělí na organické a anorganické. V následující kapitole budou popsány organické scintilátory.

### 2.3.1 Obecná charakteristika organických scintilátorů

Ionizační energie je absorbována, přičemž dochází k emisi fotonů, to znamená, že dojde k jevu luminiscence. Ta je v organických scintilátorech vlastností molekulární struktury aromatických (odvozených od benzenového jádra) molekul a souvisí s energetickými stavy elektronů (tzv.  $\pi$  - elektronů) zprostředkujících meziatomové vazby v organických molekulách. Protože tento způsob vazby není závislý na skupenství, pozorujeme luminiscenci v plynných, tak kapalných i tuhých aromatických látkách. [3]

Poměr energie vyzářených fotonů a energie záření, jež je absorbována, se nazývá konverzní účinnost scintilátoru.

Jak již bylo zmíněno, dochází k luminiscenci, kterou můžeme rozdělit na 3 druhy. Fluorescence je nejrychlejší, fosforescence a zpožděná fluorescence.

Organické scintilátory se dělí podle scintilačních složek na jednosložkové, dvousložkové a třísložkové.

### 2.3.2 Parametry organických scintilátorů

Konverzní účinnost scintilátoru byla již popsána jako poměr energie vyzářených fotonů a energie záření, jež je absorbována.

Emisní spektrum je poměr elektronů vyzářených ve vlnové délce, která nás zajímá, k celkovému počtu elektronů všech vlnových délek. Poměrně často však bývá pouze použit údaj o vlnové délce emisního maxima.

Luminiscenční odezva je název pro energii vyzářených fotonů scintilátorem při absorbování na něj působící energie.

Časový průběh vysvícení scintilátorů udává dobu, kdy dochází k deexcitaci, tento průběh je na osově závislosti počtu scintilačních fotonů na čase charakterizován exponenciálním poklesem, jehož rychlost záleží na druhu částic či záření.

### 2.3.3 Použití organických scintilátorů

Použití organických scintilátorů vzhledem k jejich nízkému protonovému číslu spadá do oblasti detektorů alfa a beta záření, dále lze použít pro sketrometrii neutronů a pro oddělení složek gama neutronového záření. V omezené míře je lze použít také pro detekci fotonového záření.

## 2.4 Anorganické scintilátory

Po seznámení se s organickými scintilátory budou shrnuté vlastnosti anorganických scintilátorů využívaných v detektoru elektronového mikroskopu.

### 2.4.1 Obecná charakteristika anorganických scintilátorů

Anorganické scintilátory vzhledem ke svému složení mají mnohem lepší vlastnosti při použití v některých aplikacích, jako například detekce fotonového záření, oproti organickým scintilátorům. Toto je způsobeno rozdílným protonovým číslem a hustotou, kdy tyto hodnoty jsou u anorganických scintilátorů značně vyšší.

Anorganické scintilátory mohou nabírat podoby čistých monokrystalů, které nejsou aktivované, kde jejich funkce může být podmíněna nízkými teplotami jako například u alkalických halogenů, nebo nevyžadující nízké teploty, jako u již v úvodu zmíněného BGO. Nevýhodou pak může být nízká rozlišovací schopnost a rozměrová omezení.

Alkalické halogeny bývají aktivovány těžkými kovy a tvoří pro reálné použití nejčastěji používanou skupinu detektorů. Tato skupina anorganických scintilátorů nevyžaduje chlazení, nemá oproti neaktivovaným monokrystalům větší rozměrové omezení a lze je použít jako náhradu pro organické scintilátory při použití jako detektoru beta záření a to také v ztížených podmínkách, jako například je chemicky agresivní prostředí.

V některých případech může nastat samoaktivace látky, kdy přebytek některého prvku způsobí aktivaci jiného. Tento jev se vyskytuje u S-II látek, kdy při přebytků s nimi slučovaného prvku jako třeba Zn nebo Cd dojde k samoaktivaci. Podobný jev může taky nastat, pokud se sloučí s těžkými kovy, například se stříbrem nebo mědí. Do této oblasti lze zařadit také vzácné plyny a dusík. Tyto látky však jsou používány jen zřídka.

### 2.4.2 Parametry anorganických scintilátorů

Parametry anorganických scintilátorů jsou stejné jako u organických. To znamená, že je můžeme charakterizovat stejnými parametry, kterými jsou konverzní účinnost scintilátoru, emisní spektrum, luminiscenční odezva, časový průběh vysvícení scintilátorů. Důležitý je způsob pouzdření a okolní prostředí. To se projevuje třeba v případech, kdy scintilátor silně váže vodu, a tudíž je nutné jej neprodyšně uzavřít za účelem ochrany vůči vlivům okolního prostředí.

### 2.4.3 Použití anorganických scintilátorů

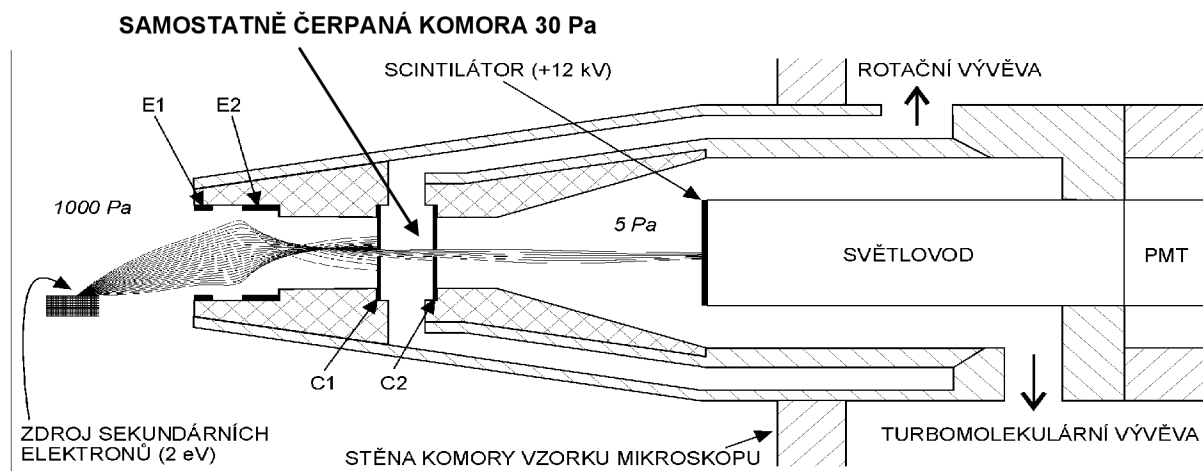
Jak již bylo zmíněno, použít lze tyto scintilátory jako například detekce fotonového záření, záření gama a rentgenového záření, a dále a lze je použít jako náhradu pro organické scintilátory při použití jako detektoru beta záření.

Mezi anorganické scintilátory, konkrétně monokrystalické aktivované příměsí, patří v úvodu zmiňovaný NaI(Tl), to znamená jodid sodný, který je zaktivován thaliem. Tento scintilátor je v porovnání s jinými charakterizován svými výbornými rozlišovacími schopnostmi. Naopak nevýhodou je jeho vlastnost silně vázat vodu.

Dalším představitelem, se kterým jsme se již seznámili, je BGO. Jedná se konkrétně o zkrácený název sloučeniny prvků  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ . BGO má výborné vlastnosti, související s hustotou a protonovým číslem, které umožňují redukci rozměru detektorů.

### 2.5 Scintilační detektor sekundárních elektronů pro VP-SEM se dvěma tlak omezujícími clonkami

Jedná se o scintilační detektor, který bude použit v práci pro zjištění vlivu tvaru clonek. Ve scintilačním detektoru je scintilátor umístěn v samostatně čerpané komoře, která je od komory vzorku mikroskopu oddělena dvěma clonkami. K clonkám je přiloženo napětí řádově stovek voltů a jsou využity nejen k omezení tlaku mezi jednotlivými částmi, ale i jako elektrostatická čočka pro směrování drah sekundárních elektronů ke scintilátoru. [5]



Obr. 2.2 Schéma scintilačního detektoru [1]

Sekundární elektrony jsou nasměrovány elektrodami ke scintilátoru. Clonky brání proudění plynu z komory vzorku do komory scintilátoru, kde, jak bylo uvedeno, smí být tlak do 8 Pa, neboť na scintilátor je přiloženo napětí až 12 kV, které urychluje elektrony na energii dostatečnou k vyvolání scintilací.

## 3 SIMULAČNÍ PROGRAMY

Pro realizaci práce je simulační program nezbytnou součástí, bez které by bylo nutné získat výsledky nákladným experimenty. V kapitole budou shrnuty informace o programech získané z webu výrobce.

### 3.1 Výběr simulačního programu

Jelikož práce navazuje na již realizovaný projekt pana doc. Ing. Jiřího Maxy, Ph.D, byl použit již hotový simulační model environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu typu AQUASEM, včetně modelu scintilačního detektoru sekundárních elektronů pro EREM.

Práce se zabývala prouděním plynů v diferenciálně čerpané komoře a v detektoru sekundárních elektronů. Model byl vytvořen pomocí programu SolidWorks a následné simulace byly realizovány pomocí programu SolidWorks Flow Simulation.

### 3.2 SolidWorks

Pro změření potřebných parametrů bylo nutné nejdříve vytvořit počítačový model zkoumaného environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu typu AQUASEM, včetně pro nás nejdůležitější části, to znamená scintilačního detektoru sekundárních elektronů pro EREM. Tento model byl vytvořen pomocí programu pro trojrozměrnou modelaci návrhů SolidWorks.

#### 3.2.1 Obecná charakteristika

Dle mezinárodních průzkumů je v moderním inženýrství více jak 70% produktů navrhováno pomocí počítačových aplikací, a to většinou podporujících zobrazení výsledného návrhu v trojrozměrné formě. SolidWorks je 3D konstrukční software (MCAD). Slouží pro vytvoření trojrozměrného modelu navrhované součástky či produktu, přičemž u každé části lze nastavovat její parametry. To v praxi znamená, že pokud máme již hotový návrh produktu, můžeme si určit materiál, z něhož bude každý prvek vyroben, jeho konkrétní vlastnosti, jako například typ, barva, a jeho fyzikální vlastnosti a podobně. Z těchto vytvořených souborů lze zpětně vytvořit technickou dokumentaci, nebo také lze dané soubory sdílet v rámci společné sítě společnosti, což umožňuje práci na projektu více konstruktérům současně.

SolidWorks je dostupný hned v několika verzích, odlišujících se od sebe jak v rozsahu podporovaných funkcí programu, tak i v druhu licence pro komerční použití.

První je SolidWorks Premium, se všemi základními nástroji pro komplexní trojrozměrné navrhování, správu produktových dat a komunikaci návrhu. Tento balíček obsahuje strojírenský CAD, který umožňuje převod návrhu z programu AutoCAD, jejich následné zpracování do 3D podoby, současnou práci v již převedeném souboru, seskupování do sestav a následnou práci s nimi. Další obsahem balíčku SolidWorks Premium je funkce ověření návrhu, která umožňuje ověření zpracování tolerancí, simulaci sestav vzhledem

k jejich vnitřním a vnějším fyzikálním podmínkám a parametrům a také funkci simulace mechanismů pro ověření funkce v skutečných provozních podmínkách. Poslední možností je použití softwaru pro správu produktových dat umožňující průběžnou kontrolu revizí, přístupu k dokumentaci a informuje o provedených změnách v konstrukcích.

SolidWorks Professional představuje vyšší řadu produktů této firmy. Najdeme zde rozšířené funkce oproti programu v premium verzi. SolidWorks Professional nabízí například nástroje projekční komunikace, jako SolidWorks eDrawings Professional vytvářející náhledy 2D a 3D modelů, které jsou všem přístupné pro další zpracování bez nutnosti si pořídit tento program, SolidWorks Animator pro vytváření video souborů ve formátu AVI, PhotoWorks k vytvoření realistických obrázků a 3D Instant Website pro zveřejnění webové stránky s interaktivním trojrozměrným obsahem. Dalším rozšiřujícím balíčkem jsou nástroje pro zvýšení produktivity v oblasti CAD. SolidWorks Toolbox využívá knihovny normalizovaných součástí, FeatureWorks sjednocuje soubory vytvořené v různých formátech souborů, SolidWorks Utilities vyhledá rozdíl mezi dvěma verzemi stejného dílu a SolidWorks Task Scheduler umožní naplánovat zdrojově náročné úkoly.

Poslední je studentská verze. Tato verze je dostupná studentům za sníženou cenu a za účelem výuky práce v programu. Oproti předchozím verzím je umožněn také přístup k online výuce práce s programem a jeho doplňky. Samozřejmě je i doplňující výukový obsah obsažen v programu.

### **3.2.2 Parametry programu SolidWorks**

Základními nástroji programu jsou nástroje pro vytváření těles v dvojrozměrném a třírozměrném zobrazení. Umožněny jsou různé funkce pro zrcadlení, zakřivení a kopírování za účelem zjednodušení a urychlení práce s programem. Následně lze vytvářet obrazy, řezy, měřit jejich rozměrové parametry a různě dodatečně upravovat.

Po zhotovení jednotlivých částí je možno je poskládat do celku za definovaných fyzikálních podmínek, čímž se vytvoří celek, to znamená sestava. Program umožňuje širokou škálu prováděných akcí, jako je zobrazení složení a rozložení sestavy, simulace jejího pohybu, vytváření výkresů a podobně. Tímto způsobem lze i zkontrolovat rozměrovou kompatibilitu všech prvků sestavy a také umožňuje zjistit, zda nedochází někde ke tření či kolizi jednotlivých částí.

## **3.3 SolidWorks Flow Simulation**

Pokud máme již hotový model prvku či sestavy, a chceme simulovat proudění kapalin nebo plynů v kontextu s touto sestavou nebo její částí, provedeme analýzu pomocí programu SolidWorks Flow Simulation.

### **3.3.1 Obecná charakteristika**

SolidWorks FlowSimulation je integrovaný program Cosmos FloWorks v balíčku SolidWorks. Jak již bylo zmíněno, tento program je určen k simulaci proudění kapalin, plynů

a pro teplotní analýzu navrhovaných sestav a jejich součástí. S jeho pomocí lze simulovat různé jevy při zvolených parametrech vnějších vlivů, jako okolní teplota či síly působící na námi zkoumaný objekt.

Mezi další možnosti programu patří zvolení typu kapaliny či plynu, což znamená, že můžeme zjistit, jak se bude chovat ve zvolené simulaci vzduch či jiné plyny, nebo například voda a tekuté chemikálie, krev, med či jiné tekutiny.

### 3.3.2 Parametry programu SolidWorks Flow Simulation

Mezi základní nástroje patří analýza přenosu tepla zářením umožňující pozorovat přenos tepla mezi plochami s vysokou teplotou. Tento nástroj také zahrnuje možnost analýzy související s působením slunečního záření.

Další možností je analýza vnitřního proudění, která slouží k zobrazení jak kapaliny nebo plyny proudí v různých zvolených částech či v rámci celé soustavy, nebo analýza rotace referenčního rámce zobrazující rotační proudy uvnitř turbínových zařízení a analýza přechodového proudění pro simulaci proudění proměnlivého v čase.

Jedná z možností spjatou s teplotou je analýza přenosu tepla vedením a prouděním zobrazující, jak objektem prochází teplo.

Další funkce softwaru Flow Simulation:

- Analýza vnějšího proudění kapalin a plynů kolem objemových těles (tj. proudění vzduchu nad křídlem letadla nebo proudění vody kolem ponorky).
- Analýza turbulentního proudění pomocí modelů K-E pro ilustraci turbulentního proudění (například plynů z motorové trysky letadla).
- Simulace skutečného plynu pro přesné řešení aplikací plynu o vysokém tlaku nebo nízké teplotě.
- Analýza stlačitelného proudění pro proudění plynu v podzvukových, transsonických a nadzvukových rychlostech.
- Výpočet poklesu tlaku v trubkách pomocí hodnot nerovnosti povrchu.
- Optimalizace návrhu pomocí proudění na základě CFD a rozměrových parametrů.
- Analýza proudění newtonovských kapalin (krev, zubní pasta a roztavený plast).
- Analýza proudění pohyblivé stěny při zkoumání proudění relativních vůči pohyblivému referenčnímu rámu.
- Analýza kavitace a identifikaci oblastí, kde k ní dochází.
- Analýza vlhkosti pro výpočet relativní vlhkosti uvnitř uzavřených prostor pro aplikace kontroly klimatu. [4]

## 4 MECHANIKA TEKUTINY

Tekutinou lze definovat látku, jejíž soudržnost mezi jednotlivými částicemi je velmi malá a působením vnějších sil se nevratně deformuje.

Tyto částice u tekutin na rozdíl od pevných těles nejsou pevně vázány a jsou pohyblivé v celém objemu omezeném pevnými stěnami, mohou téct v proudu nebo tvořit rozhraní mezi tekutinami. U pevných látek uvažujeme při popisu mechaniky jako o uceleném svazku hmotných bodů, neberou se v potaz jednotlivé částice jako u tekutin. Kapalina ovšem podléhá v porovnání s tuhými látkami značně větším deformacím.

Tekutiny mohou být nestlačitelné, mezi které patří kapaliny, nebo stlačitelné, to znamená plyny a páry. Pokud je závislost viskozity (opak tekutosti) na smykové deformaci konstantní, jedná se o tekutinu newtonskou, pokud tato podmínka není splněna, jedná se o tekutinu nenewtonskou. Stav lze popsat tlakem  $p$ , hustotou  $\rho$  a teplotou  $T$ .

Mechaniku tekutin lze charakterizovat třemi různými způsoby. Prvním je statika tekutin a pojednává o rovnováze tekutin a těles do nich ponořených. Dalším je kinematika tekutin popisující pohyb a polohu částic tekutiny v prostoru v závislosti na čase a nezávisle na příčině tohoto pohybu. Posledním je dynamika tekutin slučující kinematiku, příčinu pohybu těchto částic a sílami, kterými tekutina působí na okolí či jiná tělesa.

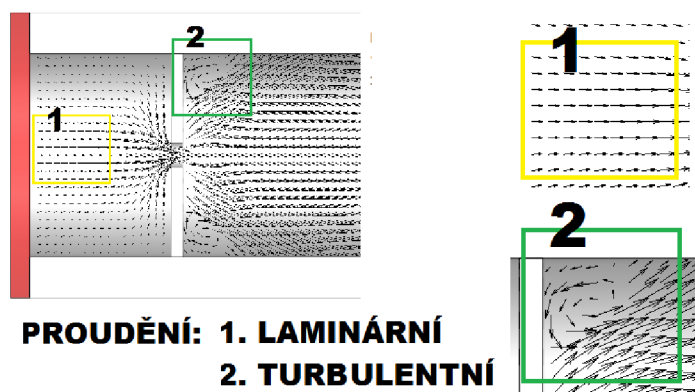
### 4.1 Dynamika tekutin

Proudění tekutiny je pohyb tekutiny, při kterém se částice tekutiny pohybují neuspořádaným pohybem a zároveň se posouvají ve směru proudění. Příčinou proudění je síla působící na plyn způsobena rozdílem, respektive spádem tlaku. To znamená, že tekutina proudí z oblasti vyššího tlaku ve směru nižšího a v tomto směru nabírá rychlost. Proudnice je trajektorie pohybu jednotlivých částic při proudění kapalin.

Proudění lze charakterizovat dle fyzikálních vlastností na proudění ideální kapaliny, která je dokonale nestlačitelná a bez vnitřního tření, proudění vazké kapaliny s zohledněním vnitřního tření, proudění nestlačitelné kapaliny, která má konstantní hustotu a proudění stlačitelné kapaliny, kdy její hustota je závislá na tlaku.

Zohledníme-li čas, uvažujeme o ustáleném proudění s oblastmi na čase nezávislými a neustálenými, kdy veličiny kapaliny jsou v daném místě kapaliny na čase závislé.

Proudění lze dle pohybu dělit na nevířivé s posuvným pohybem částic nebo vířivé, kdy částice kapaliny se kromě posuvného pohybu také otáčejí kolem své osy. U vazkých kapalin lze pozorovat laminární proudění, při tomto proudění jsou dráhy jednotlivých částic kapaliny navzájem rovnoběžné. Částice se pohybují ve vzájemně rovnoběžných vrstvách, aniž by přecházely mezi jednotlivými vrstvami nebo turbulentní proudění kdy proudění přechází částice mezi různými vrstvami kapaliny, čímž dochází k promíchávání jednotlivých vrstev kapaliny.



**PROUDĚNÍ: 1. LAMINÁRNÍ  
2. TURBULENTNÍ**

*Obr. 4.3 Laminární a turbulentní proudění*

## 4.2 Matematický model proudění skutečných kapalin

Numerické modelování mnoha fyzikálních jevů je úzce spojeno s modelováním určité formy pohybu matematickými prostředky. Pohyb tekutin je spojen s řešením nejrůznějších problémů, daných fyzikálním modelem:

- ⤴ laminární a turbulentní proudění v jednoduchých i složitých geometriích
- ⤴ stlačitelné a nestlačitelné proudění
- ⤴ stacionární, nestacionární a přechodové proudění
- ⤴ přenos tepla, přirozená a smíšená konvekce, radiace
- ⤴ přenos chemické příměsi včetně chemických reakcí
- ⤴ vícefázové proudění, proudění s volnou hladinou, proudění s pevnými částicemi, bublinami, resp. kapkami
- ⤴ hoření a chemické reakce
- ⤴ proudění porézním prostředím, atd.

Matematický model spočívá v definici rovnic výše uvedené děje popisujících. Vzhledem k tomu, že se jedná o děje rovinné dvourozměrné, osově symetrické nebo obecně trojrozměrné a časově závislé, jsou popsány soustavou parciálních diferenciálních rovnic, kterou je nutné řešit numerickými metodami. Jejich využívání je podmíněno rozšířením znalostí z oblasti proudění, turbulence, numerických metod, výpočetní techniky. [9]

### 4.2.1 Turbulentní proudění

Toto proudění je charakterizováno chaotickým proměnnými v závislosti na čase a okolí. Turbulentní proudění lze těžké několikrát simulovat dosahující stejného výsledku, protože jen malá změna počátečních podmínek způsobuje následné velké změny v chování. Typickým příkladem turbulentního pohybu je stoupající kouř. Jevem turbulence se koncem 19. století zabýval Osborn Reynolds. Konkrétně se zabýval jevy spjatými s přechodem proudění tekutiny mezi prouděními laminárními a turbulentními.



Turbulentní víry jsou charakterizovány délkovým měřítkem  $l$  (m) a rychlostním měřítkem  $u$  (m.s-1).

Velikost těchto měřítek je obvykle určena geometrií proudění (charakteristickým rozměrem proudění) [9]

Na druhé straně tekutina, ve které se objevuje turbulence, je charakterizována svými molekulárními vlastnostmi, jako je kinematická viskozita  $\nu$  (m<sup>2</sup>.s-1). Hlavním důsledkem kinematické viskozity je vyhlazení rychlostních gradientů pomocí molekulární difúze.

Výše zavedené parametry nám dovolují zavést bezrozměrnou veličinu, známou jako Reynoldsovo číslo [1].

$$Re_l = \frac{u \cdot l}{\nu}$$

- ⤴  $l$  - je poloměr protékané trubice,
- ⤴  $u$  - střední rychlost proudění,
- ⤴  $\nu$  - kinematická viskozita:  $\nu = \eta / \rho$ 
  - $\eta$  - dynamická viskozita,
  - $\rho$  - hustota kapaliny.[6]

Pro tuto rovnici je zavedena kritická hodnota  $Re_l = Re_{krit}$  a  $Re_l = 1$ , kdy proudění přechází z laminárního na turbulentní. Pokud však hodnota  $Re_l < 1$ , dochází v soustavě k laminárnímu proudění, které výrazně převyšuje proudění turbulentní a tak pomalu turbulentní víry zanikají. V situaci, kdy velikost  $Re_l > 1$ , dochází k převaze turbulentního proudění. Při nerovnosti, kdy  $Re_l$  je výrazně větší než jedna, dochází k plnému rozvinutí turbulence a proudění ztrácí svou závislost na charakteristice kapaliny.[9]

Turbulentní proudění je charakterizováno turbulentními víry, jejichž rozměrové vlastnosti se značně liší. Obecně mají tendenci se rozdělovat na víry menší a tento trend pokračuje do momentu, kdy jejich veškerá energie je přeměněna na jinou formu, ve většině případu na teplo.

### 4.3 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity neboli spojitosti popisuje jev, kdy při dodržení určitých podmínek je splněn fyzikální zákon o zachování hmotnosti.

V uzavřené soustavě, za podmínky že z ní není tekutina odebírána a její hmotnost je konstantní je celková změna hmotnosti rovná nule. V tomto případě pak změna hmotností může být lokální probíhající v soustavě samotné nebo konvektivní, kde se bere v úvahu rozdíl hmotnosti tekutiny vstupující a opouštějící uvažovanou soustavu. Při zachování platnosti rovnice spojitosti je rozdíl mezi lokální a konvektivní změnou nulový. [9]



## 4.4 Navierova-Stokesova rovnice

Vyjadřuje zachování rovnováhy sil při proudění skutečné tekutiny. V rovnicích jsou zahrnuty nejen vnější síly působící na tekutiny, ale i vnitřní odvozené od vlastnosti tekutiny, to znamená její viskozitou. V Navierových-Stokesových rovnicích je vyjádřena situace, kdy se předpokládá, že setrvačná síla je rovna součtu hmotnostní, tlakové a třecí síly.[9]



## 4.5 Rovnice zachování energie

Rovnice zachování energie popisuje chování soustavy z pohledu jejich energetických změn. U reálných tekutin se kromě tlakových, kinetických a polohových energií bere v potaz i ztráty energie způsobené třecími silami. Tyto ztráty jsou přeměněny na tepelnou energii a v uzavřené soustavě bývají započteny do celkové energie. V podstatě jde o záměnu dílčích energií při zachování celkového součtu. [9]



## 5 POPIS ŘEŠENÉHO PROJEKTU

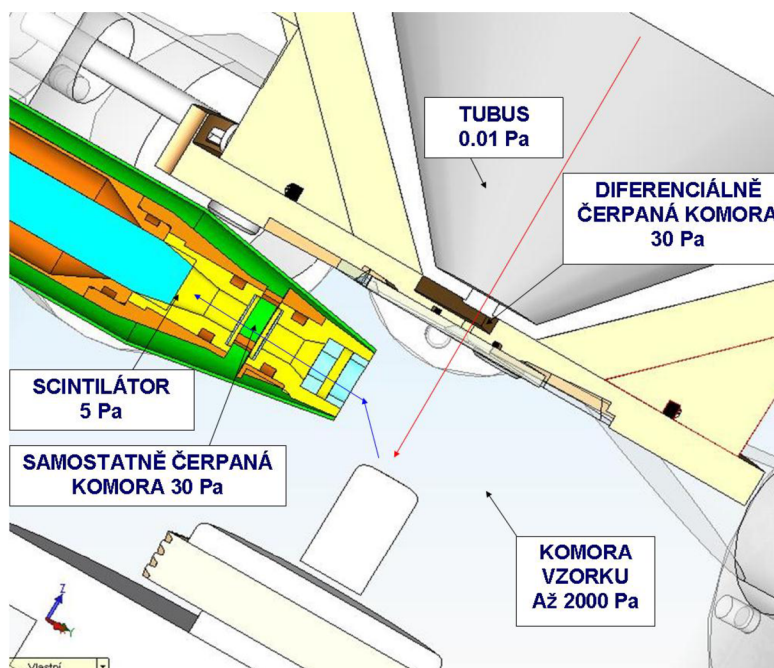
Tato práce navazuje na práci pana doc. Ing. Jiřího Maxy, Ph.D. V práci bude řešena otázka užití vybraných clonek tvaru sítě umístěných v detektoru a jejich vlivu na proudění plynů v komoře vzorku a u scintilačního detektoru enviromentálního rastrovacího elektronového mikroskopu.

Pro simulaci bude využit model scintilačního detektoru realizován pomocí programu SolidWorks a také modely jednotlivých druhů clonek. Simulace budou provedeny pomocí programu SolidWorks Flow Simulation.

Výsledky analýz jsou porovnány s výsledky dosaženými při užití původních clonek a to vše s ohledem k požadavku, aby na dráze sekundárních elektronů a v komoře scintilátoru byl co nejnižší tlak.

### 5.1 Proudění plynu v VP-SEM AQUASEM II a jeho vliv na elektronový svazek

Z tubusu s tlakem blízcím se vakuu je urychlován elektronový svazek primárních elektronů přes diferenciálně čerpanou komoru s tlakem kolem 30Pa do komory vzorku s tlakem až 2 kPa. Odtud se odráží sekundární elektrony a jsou vychylovány do scintilačního detektoru. Zde v prostoru mezi dvěma clonkami oddělujícími tlaky komory a tlaky kolem scintilátoru je samostatně čerpána komora s tlakem 30Pa.



*Obr. 5.4 Schéma VP-SEM AQUASEM II [1]*

Jednou z nejpodstatnějších vlastností rastrovacího elektronového mikroskopu VP-SEM AQUASEM II je možnost uchovávat vzorky vlhké, což není možné, pokud je vzorek umístěn ve vakuu, které jak je známo urychluje vysychání zkoumaného objektu. Je-li ovšem ve vlhkém prostředí, je vyžadován také určitý tlak. Oba tyto faktory, to znamená tlak a vlhkost v komoře vzorku, mají negativní vliv na svazek elektronů proudící na zkoumaný objekt.

Jelikož výsledný obraz záleží na kvalitě elektronového svazku, konkrétně na počtu elektronů obsažených v tomto svazku a jejich energii, je nutné zajistit optimální podmínky pro tento svazek a omezit na minimum počet degradujících faktorů.

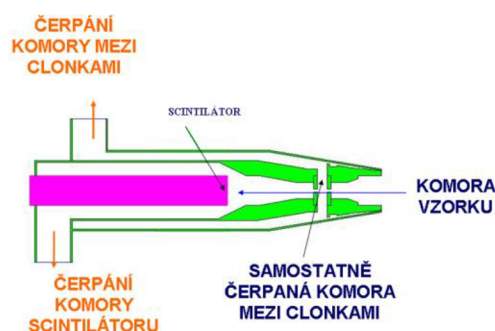
Ke ztrátě elektronu ze svazku může dojít, pokud tento elektron narazí po své cestě na překážku, která následně způsobí jeho vychýlení z dráhy a elektron nedopadne na zkoumaný objekt a nevygeneruje sekundární elektron. Překážkou je většinou molekula vzduchu či vody.

S narůstajícím tlakem roste i energie molekul vzduchu a vody, tuto energii mění v rychlost a pohybují se chaoticky ve všech směrech. Rychlost tohoto neuspořádaného pohybu je závislá na okolních podmínkách jako je například teplota, tlak. S rostoucím tlakem a teplotou roste rychlost těchto molekul a tím pádem i pravděpodobnost srážky s elektronem a jeho vychýlení z elektronového svazku.

Z tohoto důvodu je nutno omezit tlak v oblastech, kudy prochází trajektorie elektronů a ze stejného důvodu se snažíme i snížit vlhkost.

Dalším faktorem je počet elektronů dopadajících na scintilátor. Na něm je přiloženo napětí až 12kV. V oblasti scintilátoru je požadavek na obzvlášť nízký tlak nejen proto, aby nedocházelo k ztrátám kvality svazku z důvodu srážek, je zde i nebezpečí vzniku elektrického výboje.

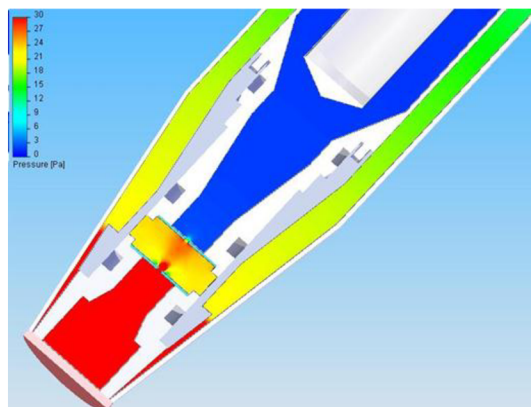
## 5.2 Proudění plynu v detektoru



**Obr. 5.5** Schéma oblastí s rozdílnými hodnotami tlaku detektoru sekundárních elektronů pro EREM [1]

Proudění je způsobeno rozdílem tlaku a dochází k němu ve směru od oblasti s vyšším tlakem do oblasti nižšího tlaku.

V scintilačním detektoru se vyskytují 3 oblasti s rozdílnými hodnotami tlaku. První oblastí je hrdlo detektoru v komoře vzorku. V těchto oblastech může být tlak až 2000 Pa. Druhou oblastí je samostatně čerpaná komora mezi clonkami, v níž bývá tlak kolem 30 Pa. K zajištění této hodnoty je komora odčerpávána rotační vývěvou Lavat RV 40/21. Poslední oblastí je komora scintilátoru, kde je udržován tlak 5 Pa pro optimální podmínky a také k zamezení vniku výbojů. Aby byl dosažen tento nízký tlak, je nutno použít turbomolekulární vývěvu. V tomto případě je použita vývěva Pfeiffer TPD 011.

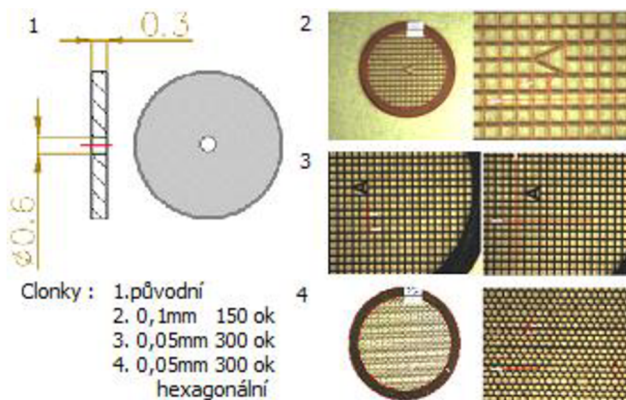


*Obr. 5.6 Schéma rozložení tlaku v detektoru sekundárních elektronů pro EREM [1]*

### 5.3 Popis clonek v řešeném projektu

Clonky v scintilačním detektoru mají za úkol oddělit oblasti s rozdílným tlakem, přičemž by neměly vytvářet překážku pro elektrony. Původní clonky měly otvor o průměru 0,6 mm a tloušťku 0,3 mm. Jelikož ale byl otvor pouze ve středu, svou zbylou částí vytvářely clonky zábranu. Z tohoto důvodu se jeví vhodnější clonka tvaru sítě, která je po většině své plochy děrovaná a neměla by tudíž představovat takovou překážku jako clonka s jedním otvorem uprostřed, do něž je obtížné nafokusovat svazek sekundárních elektronů.

Pro následující pokus bude použito tři různých clonek. V první clonce otvory v síťce rozměry ok jsou 0,1 mm při hustotě 150 ok, druhá clonka má rozměry otvoru 0,05 mm při hustotě 300 ok. Posledním případem budou oka hexagonálního tvaru při stejné hustotě.

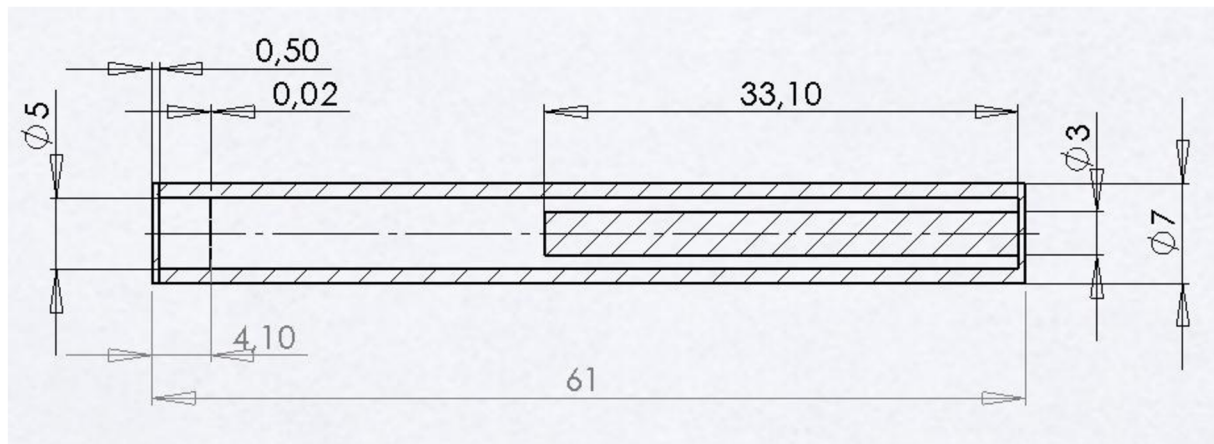


**Obr. 5.7** Tvary vybraných clonek

## 5.4 Popis zjednodušeného modelu

Pro práci na simulaci vlivu clonek na proudění tekutin v scintilačním detektoru byl speciálně vytvořen zjednodušený model. Tvar byl zjednodušen, přičemž byly zachovány základní rozměry, především ty, které mají největší vliv na přesnost výsledků srovnatelnou v reálném použití. V simulaci bude použita vždy jedna clonka příslušného tvaru a následně se provede čerpání dle nastavených okrajových podmínek.

Model vychází z původního scintilátoru, avšak na rozdíl od něho je vstup rovný válcovitého tvaru, neeskaluje do širších rozměrů. Dále bylo upuštěno od komory mezi clonkami, a tudíž je ve výsledném modelu použita pouze jedna.



*Obr. 5.8 Zjednodušený model s jednou clonkou*

## 5.5 Okrajové podmínky

Nastavení okrajových podmínek je jedním z nejdůležitějších faktorů pro provedení přesné simulace. Pro měření bude použito dvou nastavení.

První je pro detektor ve své originální podobě a je realizováno měření původních clonek. Toto nastavení vyplývá z kapitoly Proudění plynu v detektoru a taky příslušné nastavení je odvozeno z obrázku 5.2. Schéma oblastí s rozdílnými hodnotami tlaku detektoru sekundárních elektronů pro EREM.

První nastavení bude pouze pro první clonku a bude obsahovat následující parametry.

Do detektoru vedou 3 otvory:

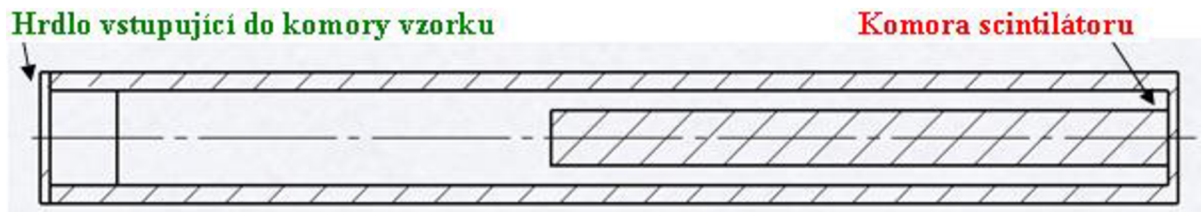
- **Hrdlo čerpání komory scintilátoru.** Tato komora je čerpána turbomolekulární vývěvou Pfeiffer TPD 011 rychlostí čerpání  $0.0044 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- **Hrdlo čerpání prostoru mezi clonkami.** Tento prostor je čerpán rotační vývěvou Lavat RV 40/21 rychlostí čerpání  $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- **Hrdlo detektoru vstupující do komory vzorku.** Tato práce počítá s variantami velikostí tlaku v komoře vzorku: 200, 400, 600, 800, 1000 Pa.

Čerpání v praxi probíhá až do chvíle dosažení nastavených cílů výpočtu. [1]

Druhé nastavení počítá již se změněným tvarem komory. Je použito jen jedné clonky a byl vypuštěn prostor mezi clonkami. Toto nastavení bude použito u clonek číslo 2.(0,1 mm, 150 ok, 3.(0,05 mm, 300 ok ), 4.(0,05 mm, 300 hexagonálních ok).

V tomto případě použijeme okrajových podmínek vyplývajících z uspořádání na obrázku 5-6. Uspořádání zjednodušeného modelu:

- **Komora scintilátoru** - podle parametrů vývěvy byla na hrdlo čerpání komory scintilátoru zadána okrajová podmínka objemového čerpání  $0.0044 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- **Na hrdle detektoru** ústícím do komory vzorku byla nastavena okrajová podmínka - statický tlak pro hodnotu 1000 Pa.
- **Prostor mezi clonkami** – zde čerpán není. Zjednodušený model sloužící k porovnání způsobu proudění u vybraných typů clonek je vytvořen pouze jako jednoclonkový pro rychlejší výpočet.



*Obr. 5.9 Uspořádání zjednodušeného modelu*

## 6 NAMĚŘENÉ HODNOTY

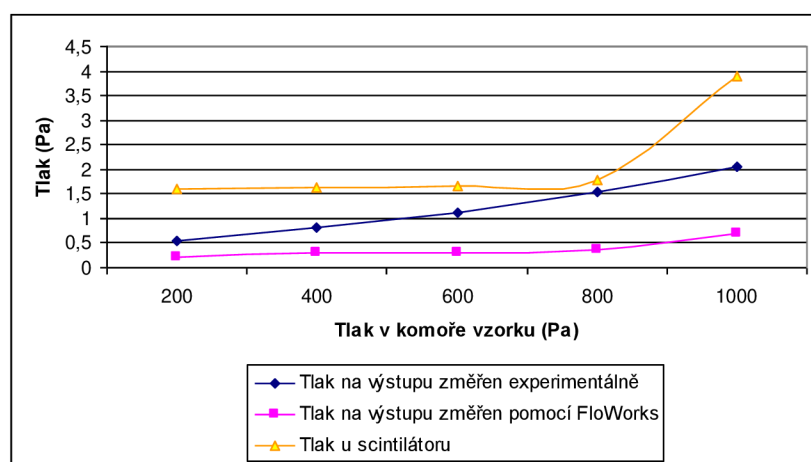
V následující kapitole budou shrnuty výstupy experimentů a simulací všech typů modelů a u všech hodnot tlaků.

### 6.1 Hodnoty změřené na zjednodušeném modelu s jednou clonkou

Výsledky získané na zjednodušeném modelu byly základem pro další práci.

#### 6.1.1 Hodnoty změřené na modelu detektoru – clonka č.1 (0,6mm, 1 oko, původní)

Naměřené hodnoty pro první clonku byly realizovány na modelu, který byl odvozen od skutečných tvarů, a byly použity okrajové podmínky, které rovněž byly založeny na reálných hodnotách. Měření bylo provedeno systémem SolidWorks Flow Simulation a následně vše bylo fyzicky zopakováno na rastrovacím elektronovém mikroskopu VP-SEM AQUASEM II. Jak je možno vidět, systém SolidWorks Flow Simulation dokázal nastolený problém velmi zdárně spočítat a v porovnání s reálným měřením jsou odchylky od naměřených velmi malé.



Obr. 6.10 Graf závislosti tlaků na tlaku v komoře vzorku [1]

Tab. 6.1 Hodnoty tlaků pro různé hodnoty tlaku v komoře vzorku - původní clonka [1]

Tlak v komoře vzorku (Pa)	200	400	600	800	1000
Tlak na výstupu z komory scintilátoru (Pa) experimentálně zjištěný	0.55	0.82	1.13	1.55	2.04
Tlak na výstupu z komory scintilátoru (Pa) zjištěn simulací	0.22	0.29	0.31	0,35	0.68
Tlak u scintilátoru (Pa) zjištěn simulací	1.6	1.62	1,65	1.77	3.09



## 6.1.2 Srovnání výsledků pro tlak v komoře vzorku 1000 Pa

Zde byla již provedena simulace na zjednodušeném modelu pro všechny clonky.

*Tab. 6.2 Výsledky pro různé clonky pro tlak v komoře vzorku 1000 Pa*

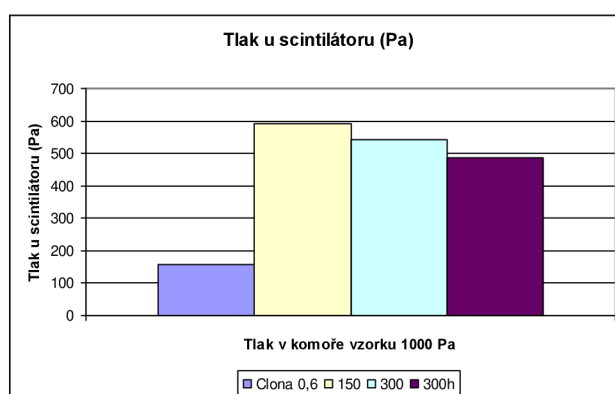
Tlak v komoře vzorku: 1000 Pa	
Tlak u scintilátoru, použijeme-li clonku	
Clonka č. 1 ( 0.6 mm,1 oko, původní)	158,2 Pa
Clonka č. 2 (0.1 mm, 150 ok)	592 Pa
Clonka č. 3 (0.05 mm, 300 ok)	544 Pa

*Tab. 6.3 Srovnání výsledků navržených clonek s původní při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa*

	Násobek 1. clonky	Teoretický tlak
Clonka č. 1 ( 0.6 mm,1 oko, původní)	-	3.09
Clonka č. 2 (0.1 mm, 150 ok)	3,74	11.56
Clonka č. 3 (0.05 mm, 300 ok)	3,44	10.62
Clonka č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální)	3,08	9.52

V tabulce 6-3 jsou srovnány tlaky nových clonek a původní clonky, kde bylo popsáno kolikanásobně větší tlak je u nové oproti původní a také je zobrazeno, jakých hodnot tlaků u scintilátoru by teoreticky mohlo být dosaženo při použití jednotlivých clonek.

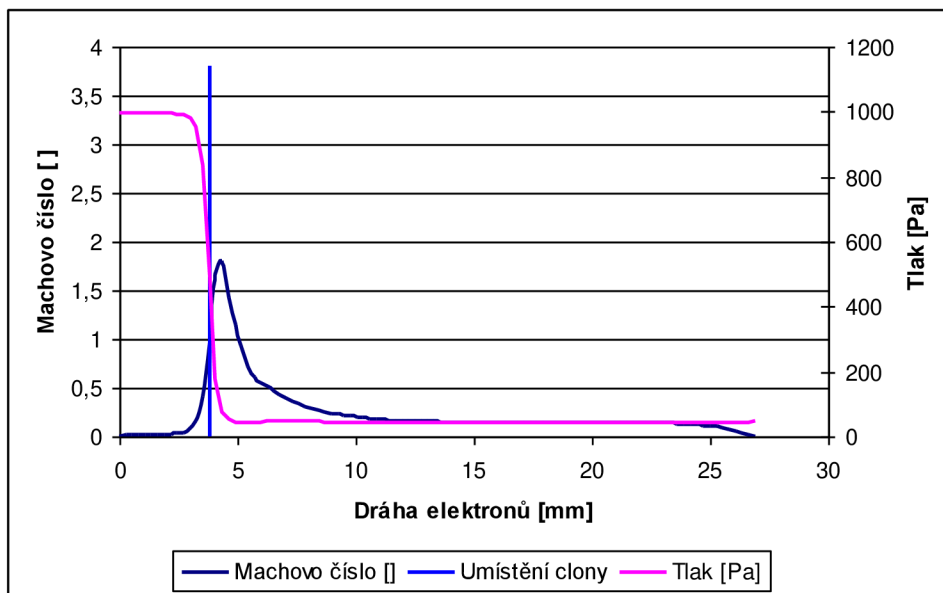
Výsledky byly pro lepší přehlednost vneseny do grafu závislosti tlaků u scintilátoru na tlaku v komoře vzorku pro všechny clonky. Tlak v komoře byl samozřejmě konstantní s hodnotou 1000 Pa.



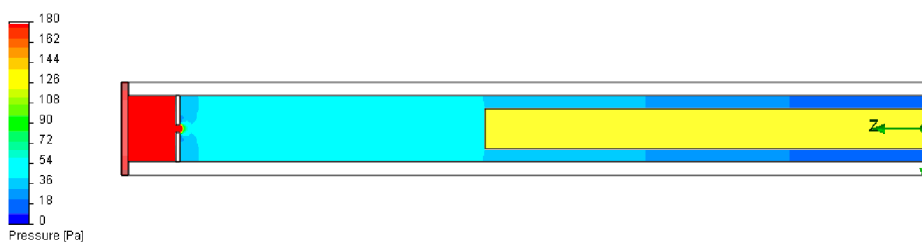
*Obr. 6.11 Graf závislosti tlaků u scintilátoru na tlaku v komoře vzorku pro všechny clonky*

Na grafu jsou zleva zobrazeny výsledky simulace, první modrý blok je hodnota původní clonky, druhý žlutý blok je clonka číslo 2, světlomodrý blok clonka číslo 3, poslední fialový clonka číslo 4.

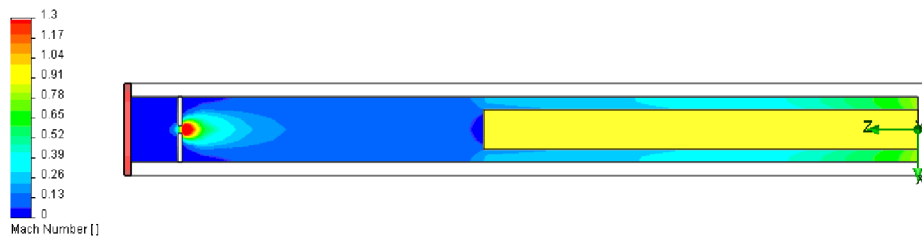
### 6.1.3 Zpracování výsledků pro variantu clonky č. 1 (0.6 mm, 1 oko, původní)



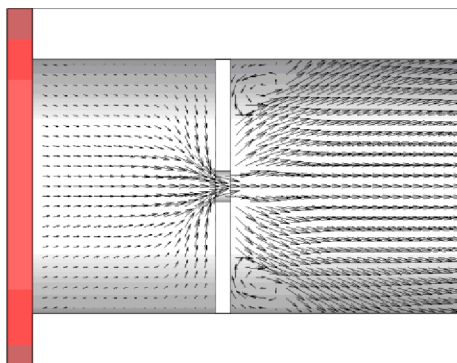
**Obr. 6.12** Průběh tlaku a Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku Clonka č. 1 (0.6 mm, 1 oko, původní)



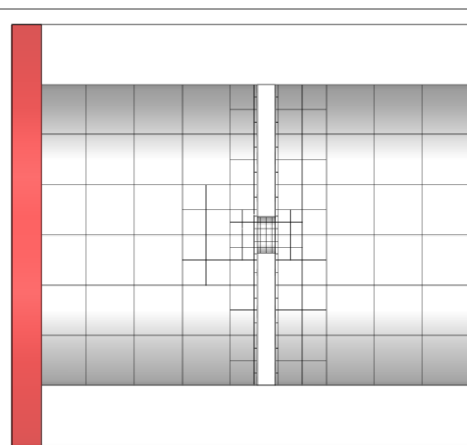
**Obr. 6.13** Rozložení tlaku u varianty 1000 Pa v komoře vzorku Clonka č. 1 (0.6 mm, 1 oko, původní)



**Obr. 6.14** Rozložení Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku Clonka č. 1 (0.6 mm, 1 oko, původní)

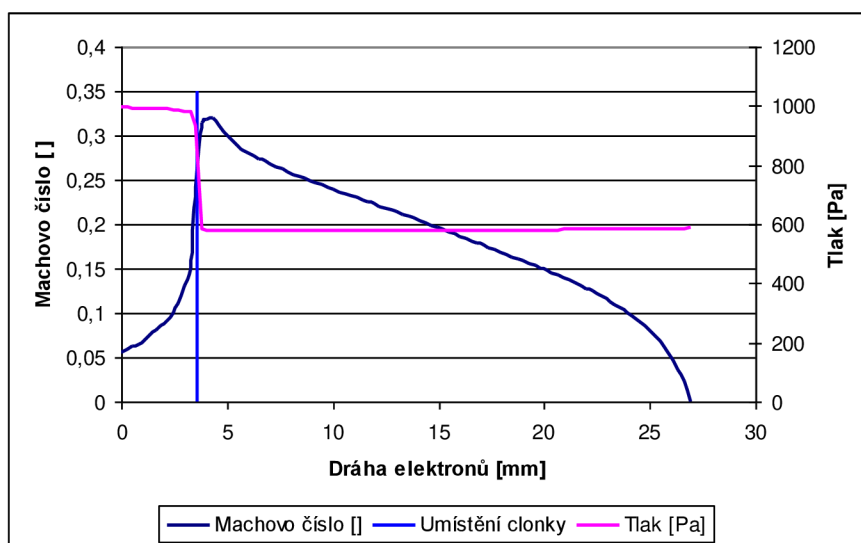


**Obr. 6.15** Vektory rychlosti proudění - Clonka č. 1 (0.6 mm, 1 oko, původní)

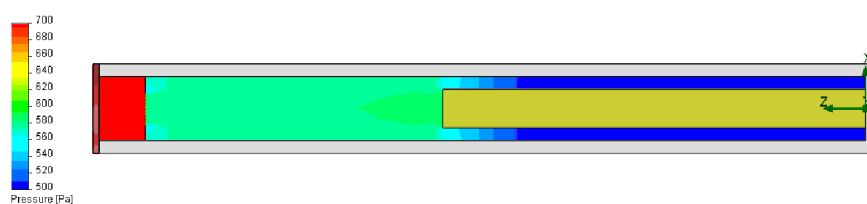


**Obr. 6.16** Nastavení sítě - Clonka č. 1 (0.6 mm, 1 oko, původní)

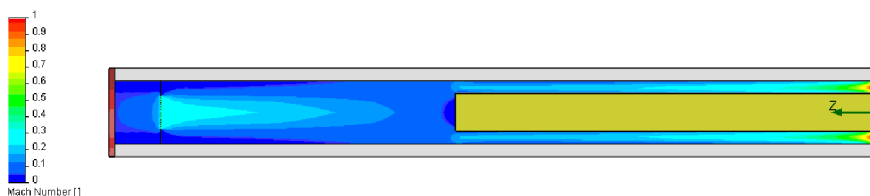
## 6.1.4 Zpracování výsledků pro variantu clonky č. 2 (0.1 mm, 150 ok)



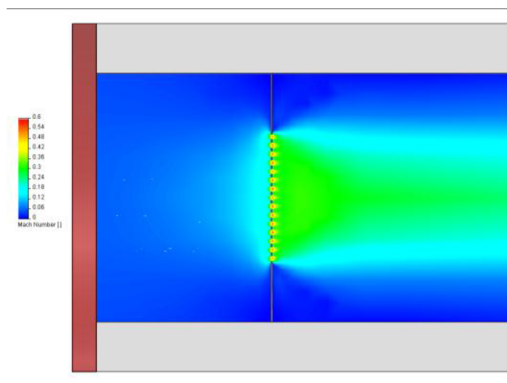
**Obr. 6.17** průběh tlaku a Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku  
Clonka č. 2 (0.1 mm, 150 ok)



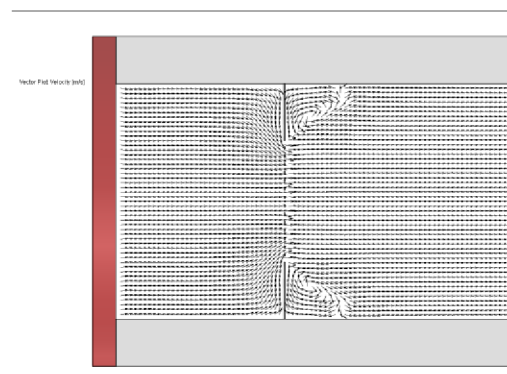
**Obr. 6.18** Rozložení tlaku u varianty 1000 Pa v komoře vzorku  
Clonka č. 2 (0.1 mm, 150 ok)



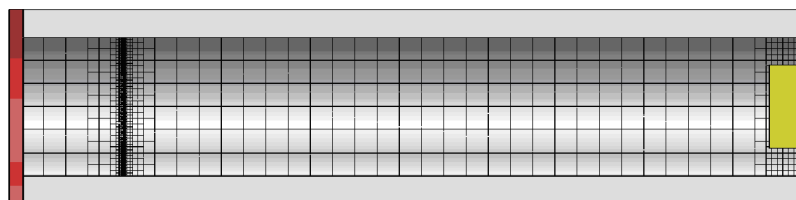
**Obr. 6.19** Rozložení Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku  
Clonka č. 2 (0.1 mm, 150 ok)



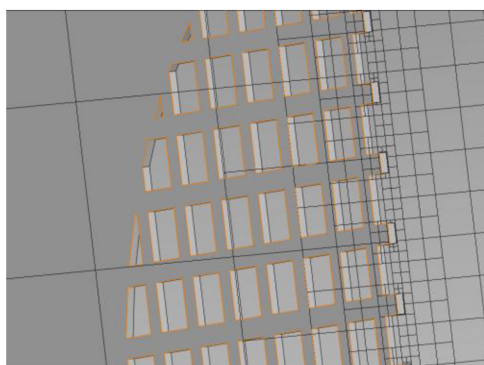
**Obr. 6.20** Rozložení Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku  
Clonka č. 2 (0.1 mm, 150 ok) detail



**Obr. 6.21** Vektory rychlosti proudění - Clonka č. 2 (0.1 mm, 150 ok)

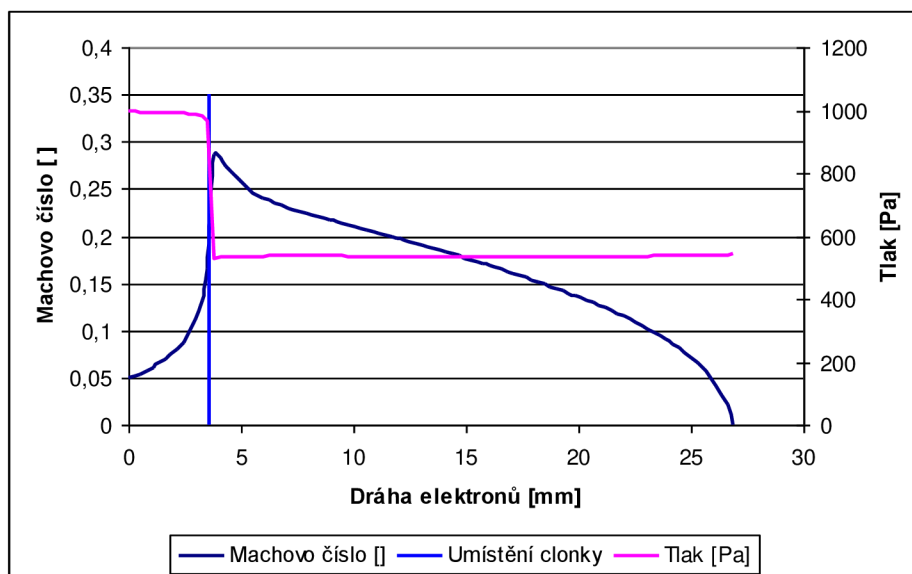


**Obr. 6.22** Nastavení sítě - Clonka č. 2 (0.1 mm, 150 ok)

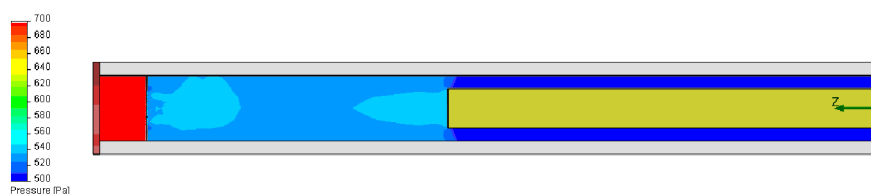


**Obr. 6.23** Nastavení sítě - Clonka č. 2 (0.1 mm, 150 ok) – detail

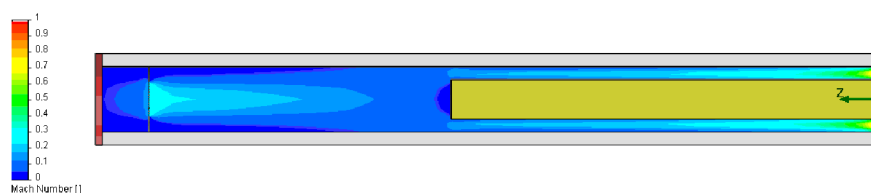
### 6.1.5 Zpracování výsledků pro variantu clonky č. 3 (0.05 mm, 300 ok)



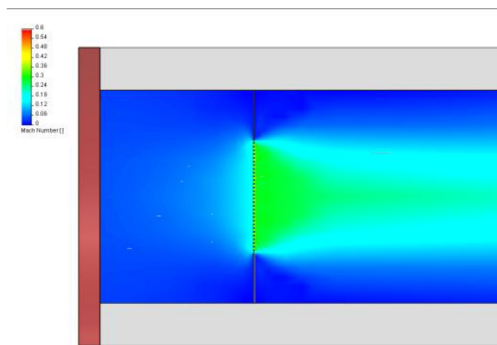
**Obr. 6.24** Průběh tlaku a Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku  
Clonka č. 3 (0.05 mm, 300 ok)



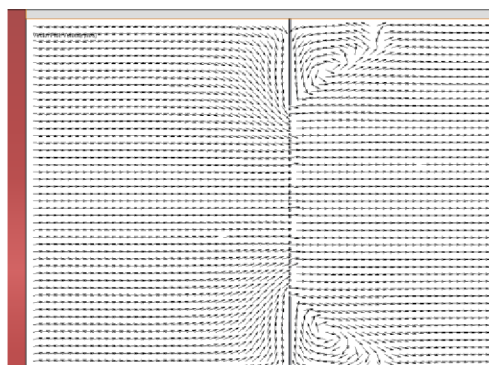
**Obr. 6.25** Rozložení tlaku u varianty 1000 Pa v komoře vzorku  
Clonka č. 3 (0.05 mm, 300 ok)



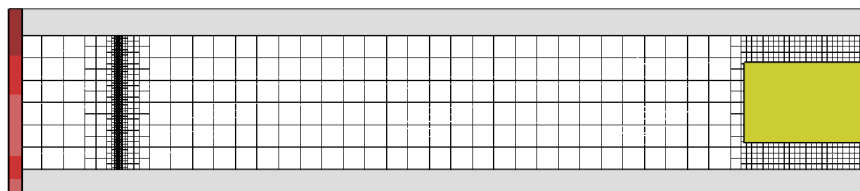
**Obr. 6.26** Rozložení Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku  
Clonka č. 3 (0.05 mm, 300 ok)



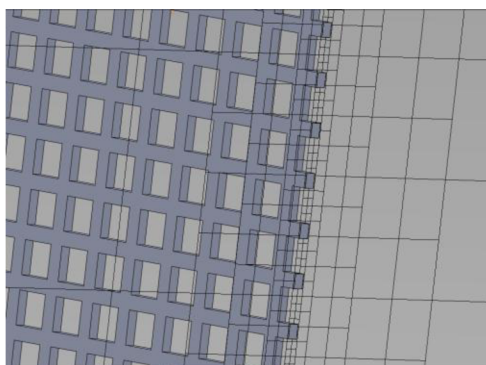
**Obr. 6.27** Rozložení Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku Clonka č. 3 (0.05 mm, 300 ok) – detail



**Obr. 6.28** Vektory rychlosti proudění - Clonka č. 3 (0.05 mm, 300 ok)

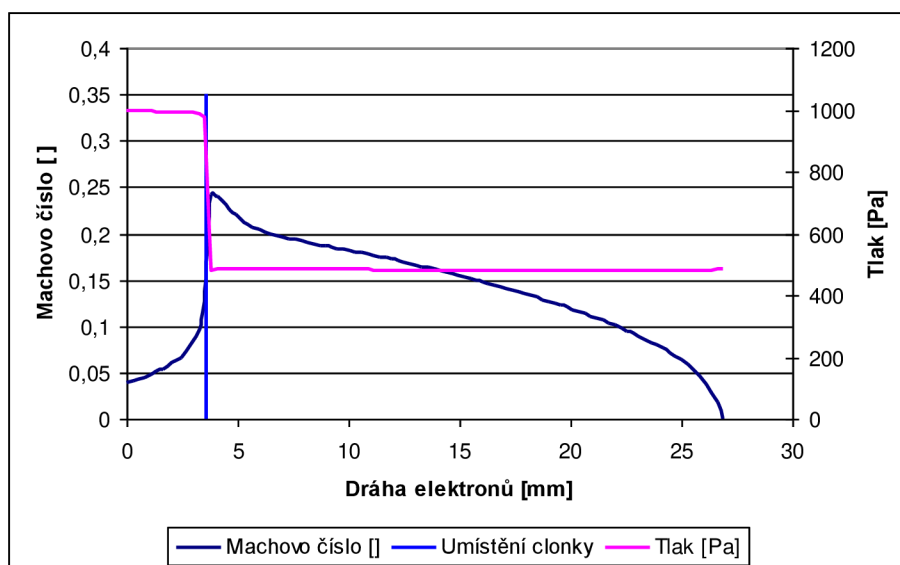


**Obr. 6.29** Nastavení sítě - Clonka č. 3 (0.05 mm, 300 ok)

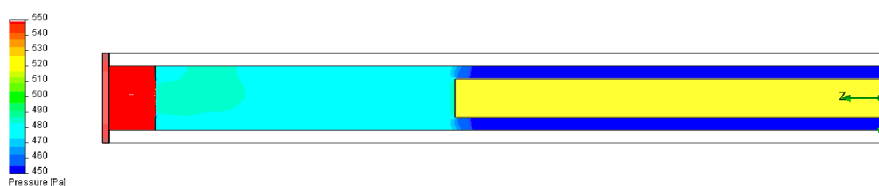


**Obr. 6.30** Nastavení sítě - Clonka č. 3 (0.05 mm, 300 ok) - detail

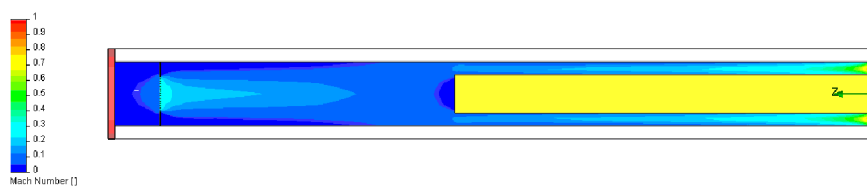
## 6.1.6 Zpracování výsledků pro variantu clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hex.)



**Obr. 6.31** Průběh tlaku a Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku  
Clonka č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální)

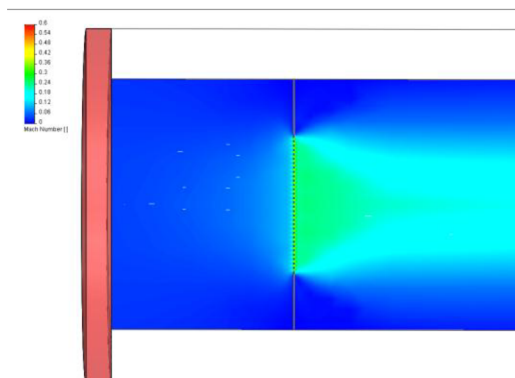


**Obr. 6.32** Rozložení tlaku u varianty 1000 Pa v komoře vzorku  
Clonka č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální)

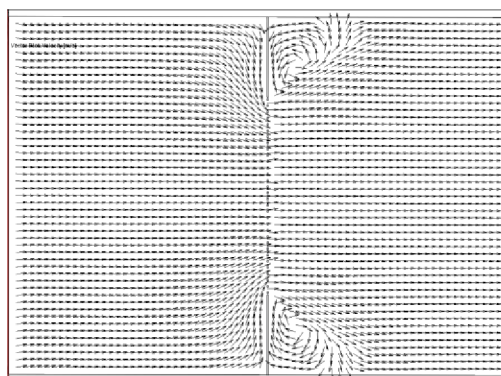


**Obr. 6.33** Rozložení Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku  
Clonka č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální)

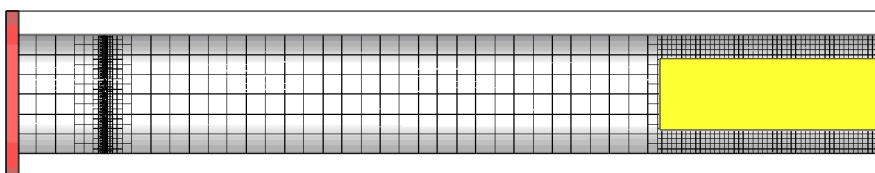




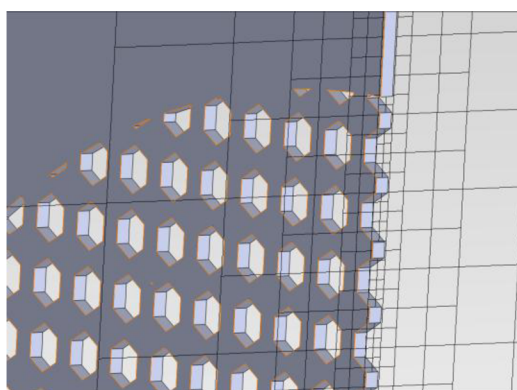
**Obr. 6.34** Rozložení Machova čísla u varianty 1000 Pa v komoře vzorku Clonka č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální) – detail



**Obr. 6.35** Vektory rychlostí proudění - Clonka č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální)



**Obr. 6.36** Nastavení sítě - Clonka č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální)



**Obr. 6.37** Nastavení sítě - Clonka č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální) - detail

## 6.2 Shrnutí výsledků pro zjednodušený model s jednou clonkou

V prvním měření jsme si mohli ověřit hned několik faktů v souvislosti se simulací a reálnými hodnotami, výpočetní kvalitou programu SolidWorks FlowSimulation a také správnost nastavení počátečních podmínek. V tomto prvním měření bylo použito ještě původního modelu vycházejícího z opravdového přístroje. Tlaky spočítané programem jsou v porovnání s tlaky experimentálně změřenými sice několikanásobně menší (přibližně 2,5 u nízkých až 4,5 násobně u vyšších), pořád to ale dovoluje se bezpečně spolehnout na výsledky simulace bez rizika poškození přístroje.

Tlaky jak u spočtených tak i v změřených případech dosahovaly hodnot v rámci námi požadovaných mezí, to znamená, že nepřekročily kritickou hodnotu 8 Pascalů, nad níž hrozí vznik výbojů. Dále lze pozorovat, že v rozmezí tlaků v komoře vzorku 200 až 800 Pascalů byly hodnoty tlaků u scintilátoru podobné, pohybující se okolo 1,6 Pa. Při hodnotách 1000 Pa v komoře vzorku dochází k výraznějšímu nárůstu všech hodnot v porovnání s předchozím nárůstem. Právě s hodnotami při 1000 Pascalech v komoře vzorku budeme pracovat v následujících měřeních.

Druhé měření bylo realizováno již na zjednodušeném modelu a pouze s jednou clonkou. Kromě nově navržených byla přidána simulace původní clonky, aby bylo možné s ní srovnat výsledky nových. U měření na zjednodušeném modelu bylo nastavení takové, aby přes průřez proudění u oka bylo alespoň 5 buněk.

Již na první pohled je zřejmé, že tlaky jsou několikanásobně vyšší. U první nově navržené clonky, tzn. clonky číslo 2, je nárůst tlaku téměř čtyřnásobný oproti hodnotě původní clonky, což je nejvíce ze všech srovnávaných clonek. Ovšem je nutné brát v potaz fakt, že její propustnost vzhledem k poměru plochy ok a clonky a velikosti ok je v tomto případě nejvyšší.

U druhé nově navržené clonky při stejném pokrytí oky je jejich rozměr menší o polovinu a také dvojnásobně větší počet. Překvapivě však stále je tlak téměř 3,5 násobně větší a oproti předchozí clonce je rozdíl hodnot téměř zanedbatelný.

Při použití hexagonální verze této síťky se nám již podaří dosáhnout o něco lepšího výsledku, přičemž stále se nacházíme na hranici trojnásobně větších hodnot původní jednooké clonky.

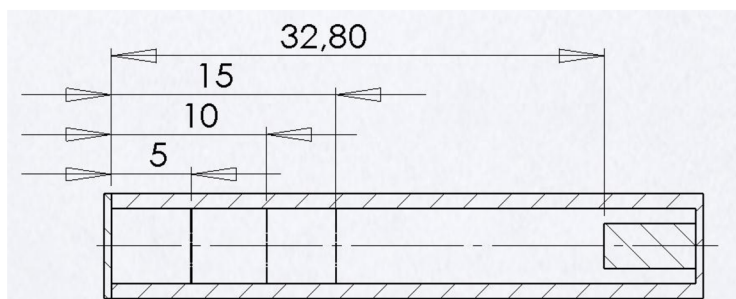
Provedeme-li teoretické převedení hodnot a srovnání tlaků u scintilátoru u navrhovaných clonek, kterých by mohlo být dosaženo, stále se pohybujeme ve všech třech případech nad maximální hranici osmi Pascalů. Nejblíže požadovaným hodnotám tlaku je clonka s velikostí ok 0,05 mm při hustotě 300 ok v hexagonálním tvaru, ovšem stále tuto hranici překračuje o více jak 1,5 Pa.

## 6.3 Hodnoty změřené na zjednodušeném modelu s třemi clonkami

S návazností na výsledky z měření na zjednodušeném modelu s jednou clonkou bylo rozhodnuto pokračovat dalšími simulacemi síťkových clonek v scintilačním detektoru, avšak s přidáním dalších clonek. V dalším pokračování měření by se pracovalo pouze s variantou se síťovými otvory s rozměry ok 0.05 mm při hustotě 300 ok v hexagonálním tvaru. Původní zjednodušený model byl doplněn o další dvě stejné síťky. Podobně bylo rozšířeno spektrum tlaků pro lepší představu chování průběhů tlaků mezi síťkami a hlavně pak v komoře scintilátoru.

### 6.3.1 Popis zjednodušeného modelu

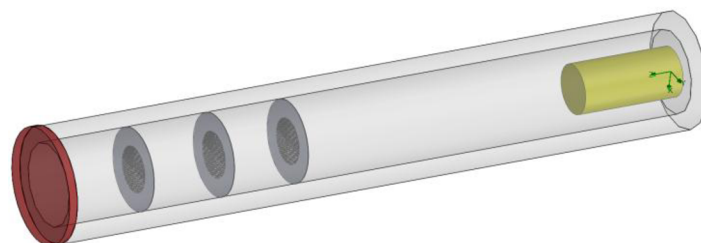
Pro další měření byl vytvořen tříclonkový model. Prostor pro clonky byl zvětšen a scintilátor byl zkrácen. Předpokládá se, že přidáním pouze jedné clonky do původního modelu by tak v prostoru mezi nimi mohl narůst tlak, za předpokladu, že by nebylo zajištěno dostatečné odčerpání a nedosáhlo by se uspokojivého výsledku. Přidáním dvou clonek by se tento efekt ztlumil.



*Obr. 6.38 Zjednodušený model s třemi clonkami*

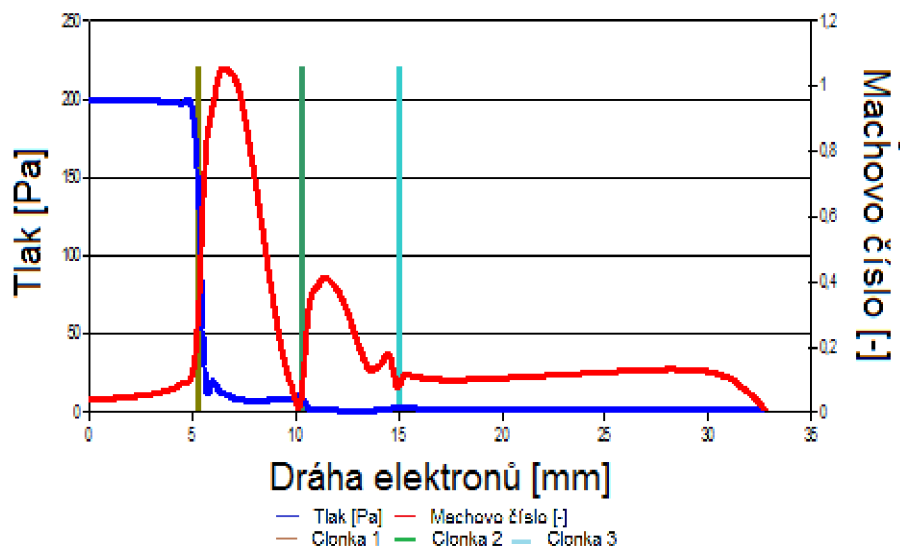
Všechny tyto změny byly realizovány pouze za účelem snížit výpočetní náročnost konkrétního případu a tudíž i zkrátit čas s tím, že se zaměříme na oblast detektoru, která je pro náš účel nejpodstatnější.

Po těchto úpravách se tedy předpokládá, že tlaky již dosáhnou požadovaných hodnot pro bezpečný provoz při zisku kvalitnějšího přenosu elektronů na scintilátor a tudíž i lepšího obrazového výstupu.



*Obr. 6.39 Zjednodušený model se třemi clonkami pro průběh tlaků v komoře scintilátoru*

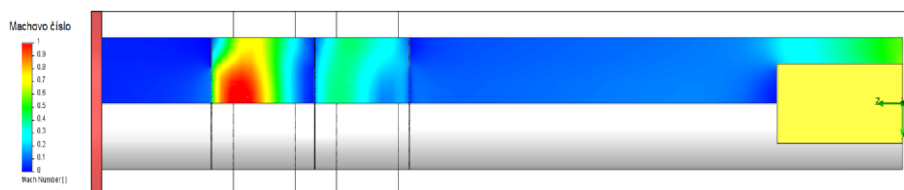
### 6.3.2 Zpracování výsledků pro clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hex.) 200 Pa



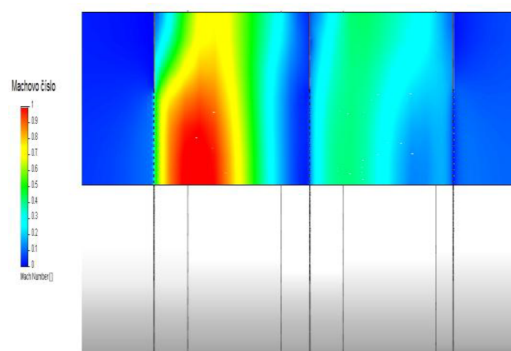
**Obr. 6.40** Průběh tlaku a Machova čísla při tlaku 200 Pa v komoře vzorku Clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální)



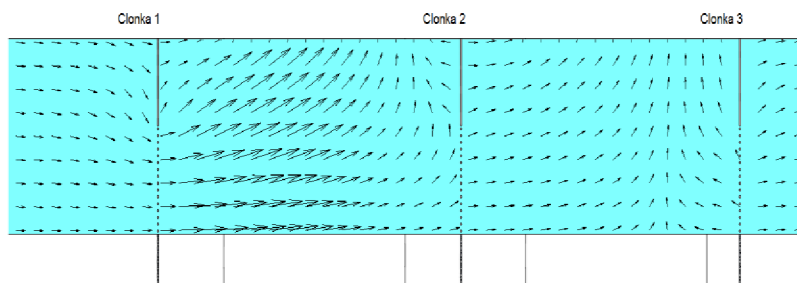
**Obr. 6.41** Rozložení tlaku při tlaku 200 Pa v komoře vzorku Clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální)



**Obr. 6.42** Rozložení Machova čísla při tlaku 200 Pa v komoře vzorku Clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální)

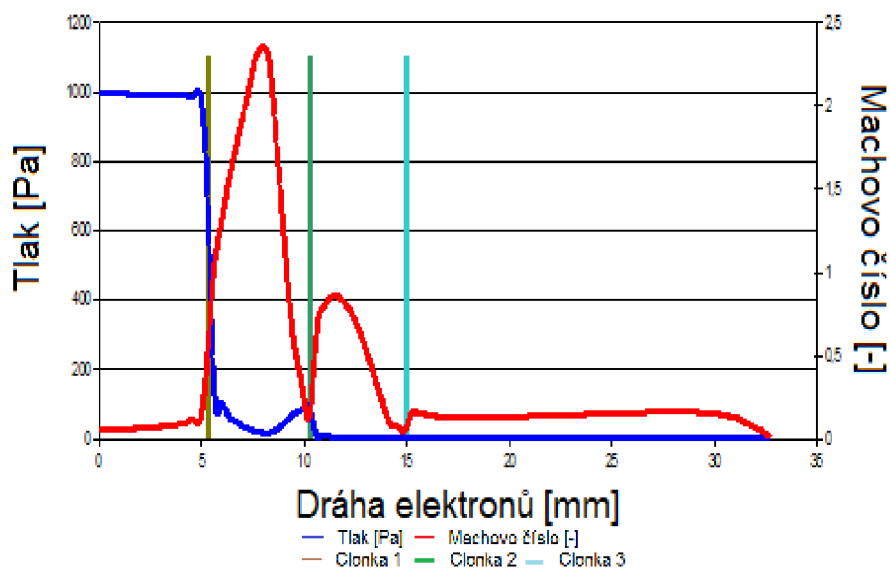


**Obr. 6.43** Rozložení Machova čísla při tlaku 200 Pa v komoře vzorku Clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální) – detail

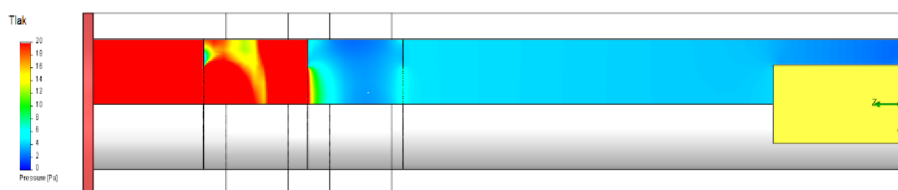


**Obr. 6.44** Vektory rychlosti proudění při tlaku 200 Pa v komoře vzorku Clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální)

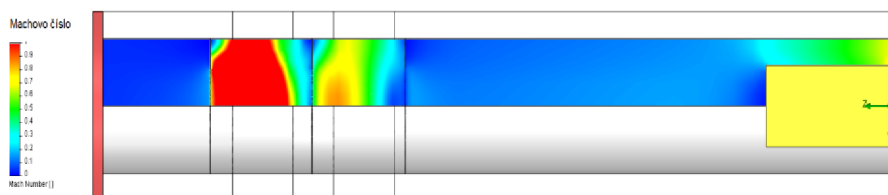
### 6.3.3 Zpracování výsledků pro clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hex.) 1000 Pa



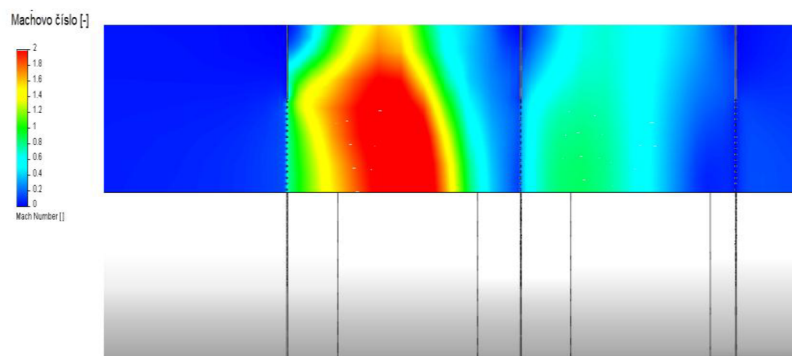
**Obr. 6.45** Průběh tlaku a Machova čísla při tlaku 1000 Pa v komoře vzorku Clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální)



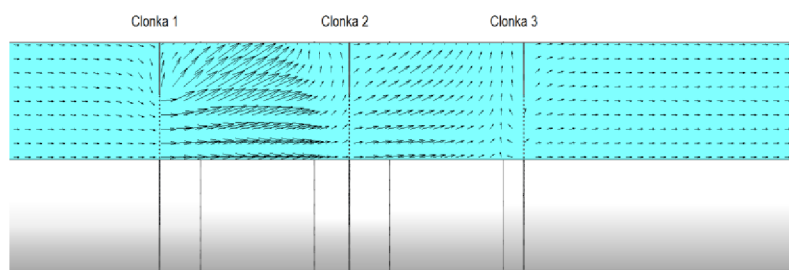
**Obr. 6.46** Rozložení tlaku při tlaku 1000 Pa v komoře vzorku Clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální)



**Obr. 6.47** Rozložení Machova čísla při tlaku 1000 Pa v komoře vzorku Clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální)



**Obr. 6.48** Rozložení Machova čísla při tlaku 1000 Pa v komoře vzorku Clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální) – detail



**Obr. 6.49** Vektory rychlostí proudění při tlaku 1000 Pa v komoře vzorku Clonky č. 4 (0.05 mm, 300 ok, hexagonální)

## 6.4 Shrnutí výsledků pro zjednodušený model s třemi clonkami

*Tab. 6.4 Srovnání výsledků navržených clonek s původní při tlaku v komoře vzorku 1000 Pa*

Tlak v komoře vzorku [Pa]	Tlak u scintilátoru [Pa]	Průměrný tlak na dráze sekundárních elektronů [Pa]
200 Pa	2,4	36,4
1000 Pa	4,4	177,1

V dalším pokračování měření jsme mohli pozorovat jevy, kterých nebylo možné dosáhnout v prvním zjednodušeném modelu. Příčina těchto jevů je právě přidání clonek, čímž vznikl úzký prostor mezi první a druhou clonkou, kde bylo působení tlaku nesilnější. Prostor mezi druhou a třetí clonkou již tak namáhán nebyl. Nejvýraznějším ukazatelem chování tekutin v prostorech mezi clonkami a v komoře scintilátoru je zde Machovo číslo určující rychlost tekutin.

Porovnáním chování v obou modelech při stejném tlaku lze vidět hned několik jevů. V případě prvního zjednodušeného modelu bylo Machovo číslo nižší. V trojclonkovém zjednodušeném modelu vidíme jeho značný nárůst za první clonkou, kdy jeho hodnota je několikanásobně vyšší než v prvním zjednodušeném modelu. Za druhou clonkou jeho hodnota je již podobná jako u prvního zjednodušeného modelu za clonkou. Tímto lze pozorovat vliv přidání dalších clonek na chování tekutiny

Z výstupu měření s tlakem v komoře vzorku 200 Pa clonky plní svoji funkci na výbornou. Přestože za první clonkou dochází k značnému nárůstu Machova čísla, tlak v tomto prostoru prudce klesá a za druhou clonkou jsou obě hodnoty nižší. Za třetí clonkou jdou u scintilátoru tlaky použitelné k reálnému užití.

V případě použití tlaku v komoře 1000 Pa máme možnost výsledky porovnávat s výstupem měření při stejném tlaku s použitím zjednodušeného modelu s jednou clonkou. Na výstupu za první clonkou tlak klesá pomaleji než u jednoclonkového modelu a má mnohem vyšší hodnotu, Machovo číslo je několikanásobek čísla u jednoclonkového modelu. To platí i o situaci za druhou clonkou, ovšem zde je již tlak výrazně nižší. Za třetí clonkou je nízký tlak dostačující k předurčenému použití u scintilátoru.

Jelikož jak pro nejnižší tak i pro nejvyšší tlak, tzn. 200 a 1000 Pa je tlak u scintilátoru dostatečně nízký a lze předpokládat stejný pozitivní výsledek i pro tlaky v rozsahu mezi nimi, není potřeba realizovat další měření.



## 7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provést vyhodnocení proudění plynů v scintilačním detektoru u navržených tvarů sítěk clonek scintilačního detektoru.

V práci bylo nejdříve provedeno seznámení se základy mikroskopie, její historií, vývojem a moderními trendy. Později byl popsán scintilační detektor a proudění kapalin. Pro úplnost byl přidán krátký popis programu SolidWorks a SolidWorks FlowSimulation (původně Cosmos FloWorks), který umožnil provést celý tento experiment bez nutnosti zasahovat mechanicky do mikroskopu. Ve druhé části již byla nastíněna konkrétní problematika, navrhnutá realizace, zobrazeny a shrnuty výsledky.

Pro realizaci bylo nejdříve potřeba vytvořit modely těchto nově navržených sítěk, následně zjednodušené modely detektorů, potřebné pro zrychlení výpočtů programu. Vše bylo provedeno pomocí programu SolidWorks a samotné modelování proudění plynů v scintilačním detektoru jeho součástí, programem SolidWorks FlowSimulation.

Výsledky se částečně odvozovaly z původních měření proudění v detektoru simulovanými již dříve panem doc. Ing. Jiřím Maxou, Ph.D., částečně byly získány novým měřením na zjednodušených modelech.

Ačkoliv provedené simulace na těchto modelech nám zdaleka neurčí naprosto přesné hodnoty tlaků u scintilátoru detektoru, jejich výpovědní hodnota je velmi vysoká a pro dosažení námi požadovaného cíle zjistit, zda budou navržené síťové clonky v námi požadované aplikaci v praxi použitelné, je více než dostačující.

Z výsledků simulace jednoclonkového modelu je patrné, že síťky nejsou lepší pro použití v scintilačním detektoru, než původní clonka v oblasti schopnosti oddělit dvě oblasti s rozdílnými tlaky. Nejblíže se přiblížila síťová clonka největší hustotou ok s oky v hexagonálním tvaru. To znamená, že s vyšší hustotou při zachování stejné plochy lze dosáhnout lepšího výsledku pro správné, respektive námi požadované proudění.

Vyšší tlaky zjištěné simulací u scintilátoru ve vztahu s naší hypotézou, že vyšší tlak má negativní vliv na tok sekundárních elektronů a taky, že v okolí scintilátoru by neměl tlak překračovat hodnotu 8 Pa, nás vedou k závěru, že tyto síťové clonky nemůžou být prozatím efektivně použity v scintilačním detektoru v jeho původní podobě.

Z druhé strany nelze prozatím však jejich použití zavrhnout. Je možné, že pokud snížíme podíl ok na ploše clonky nebo zahustíme síť clonky, bude možné dosáhnout nižších tlaků u scintilátoru, které již budou splňovat nároky.

Při pozměnění detektoru, resp. jeho zjednodušeného modelu, přidáním třetí clonky získáme již výsledky nasvědčující použitelnost této konfigurace v reálné konstrukci. I při dosti vysokém tlaku 1000 Pa tyto clonky jsou schopné udržet v komoře scintilátoru dostatečně nízký tlak.

Shrneme-li celkově všechny poznatky, pak program SolidWorks a SolidWorks FlowSimulation nám umožnil relativně přesně spočítat tlaky, které lze použitím síťových clonek dosáhnout. U dvouclonkové konfigurace oproti původní clonce by tyto tlaky nebyly uspokojivé, avšak s větší hustotou ok byly dosažené výsledky blíže našeho maxima.

Přestože lze toto považovat za neúspěch, je tato cesta pořád otevřená je pořád možné, že po úpravě parametrů budou síťové clonky použitelné. Tomu nasvědčují právě výsledky z simulací trojclonkového modelu, kdy pomocí třetí sítěky je již tlak snížen na dostatečně nízkou úroveň a tudíž to lze považovat za možné řešení nastíněné problematiky. Cíl práce se proto podařilo splnit.

## Použitá literatura:

- [1] MAXA, J. *Analýza proudění plynu v zařízeních elektronového mikroskopu*. Brno : [s.n.], 2008, s. 21,23-24,28,29,36,98,169
- [2] REICHL, J; VŠETIČKA, M. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006-2010 [cit. 2010-12-16]. *Fotonásobič*. Dostupné z WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=747>>.
- [3] KREJČÍ, V. *Scintilační detektory*. České Budějovice : [s.n.], 2002., 18.s ; DOSTUPNÉ Z WWW: <[HTTP://WWW.PF.JCU.CZ/STRU/KATEDRY/FYZIKA/PROF/SVADLENKOVA/SCINTILACNI%20DETEKTORY.PDF](http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/svadlenkova/scintilacni%20detektory.pdf)>.
- [4] SOLIDWORKS [ONLINE]. 2003 [CIT. 2010-12-16]. *Software SolidWorks Flow Simulation*. DOSTUPNÉ Z WWW: <[HTTP://WWW.SOLIDWORKS.CZ/PRODUKTY/SOFTWARE-SIMULATION/SOLIDWORKS-FLOW-SIMULATION/](http://www.solidworks.cz/produkty/software-simulation/solidworks-flow-simulation/)>.
- [5] ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE [ONLINE]. 2010 [CIT. 2010-12-16]. *Modifikovaný scintilační detektor sekundárních elektronů pro VP-SEM se dvěma tlak omezujícími clonami a mřížkou odsávající SE od vzorku*. DOSTUPNÉ Z WWW: <[HTTP://WWW.UETE.FEEC.VUTBR.CZ/MODULES.PHP?NAME=NEWS&FILE=ARTICLE&SID=128&PHPSID=2CE4FBD285E2AFCBADD9CF4F185173FD](http://www.ucte.feec.vutbr.cz/modules.php?name=news&file=article&sid=128&phpsessid=2ce4fbd285e2afcbadd9cf4f185173fd)>.
- [6] WIKIPEDIA [ONLINE]. 2010 [CIT. 2010-12-09]. *Proudění*. DOSTUPNÉ Z WWW: <[HTTP://CS.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/PROUDĚNÍ](http://cs.wikipedia.org/wiki/Proudění)>.
- [7] ADAMEC, J; LÍŠAL, M; VÁRADIOVÁ, B. *Mechanika tekutin: Sbíрка příkladů*. PRAHA : VYDAVATELSTVÍ ČVUT, 1993. 104 s.
- [8] RAČEK, JIŘÍ. *Technická mechanika : Mechanika tekutin*. BRNO . 151 s.
- [9] KOZUBKOVÁ, S; DRÁBKOVÁ, S. *Numerické modelování proudění : FLUENT I*. OSTRAVA : [s.n.], 2003. 115 s.