

Univerzita Palackého v Olomouci  
Přírodovědecká fakulta  
Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Detekce a zobrazování předmětů s využitím  
terahertzového záření**



|                         |                              |
|-------------------------|------------------------------|
| Autor:                  | Tomáš Locker                 |
| Studijní program:       | B1701 Fyzika                 |
| Studijní obor:          | 1701R030 Přístrojová fyzika  |
| Forma studia:           | Prezenční                    |
| Vedoucí práce:          | Mgr. Antonín Černocho, Ph.D. |
| Termín odevzdání práce: | květen 2020                  |

## Bibliografická identifikace:

|                         |   |
|-------------------------|---|
| Jméno a příjmení autora | Tomáš Locker  |
| Název práce             | Detekce a zobrazování předmětů s využitím terahertzového záření   |
| Typ práce               | Bakalářská  |
| Pracoviště              | Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR  |
| Vedoucí práce           | Mgr. Antonín Černoch, Ph.D.   |
| Rok obhajoby práce      | 2020  |
| Abstrakt                | Tato bakalářská práce se zabývá detekcí a zobrazením předmětů pomocí terahertzového záření v kontextu analýzy uměleckých děl. Cílem je ověření možnosti využití komerčně dostupných komponent pro tuto aplikaci. Teoretická část práce popisuje nejrozšířenější aplikace THz záření a způsoby jeho generace a detekce. Praktická část se zabývá ověřením vlastností jednotlivých komponent a detekcí v transmisním režimu a s využitím odraženého záření. Výsledky ukazují, že použité komponenty nejsou pro analýzu uměleckých děl použitelné. |
| Klíčová slova           | terahertzové záření, umělecká díla, detekce, zobrazení, zdroj TeraSense THz Source 100 GHz, 400 mW  |
| Počet stran             | 54  |
| Počet příloh            | 0   |
| Jazyk                   | Český   |

## **Bibliographical identification:**

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| Autor's first name and surname | Tomáš Locker   |
| Title                          | Object Detection and Imaging Using Terahertz Radiation   |
| Type of thesis                 | Bachelor   |
| Department                     | Joint Laboratory of Optics   |
| Supervisor                     | Mgr. Antonín Černoch, Ph.D.  |
| The year of presentation       | 2020   |
| Abstract                       | This bachelor thesis deals with object detection and imaging using terahertz radiation in context of works of art analysis. The objective is to verify the possibility of use of commercially available components for this application. The theoretical section describes the most common applications of THz radiation and ways of its generation and detection. The practical section deals with verification of properties of the components and detection in transmission regime and using reflected radiation. The results show that the used components are not applicable for works of art analysis. |
| Keywords                       | terahertz radiation, works of art, detection, imaging, source TeraSense THz Source 100 GHz, 400 mW   |
| Number of pages                | 54   |
| Number of appendices           | 0  |
| Language                       | Czech  |

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Mgr. Antonína Černocho, Ph.D. a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých pramenů.

V Olomouci .....

.....

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce Mgr. Antonínu Černochovi, Ph.D. za odborné vedení, rady a připomínky při vypracování práce a RNDr. Haně Chmelíčkové za rady týkající se formálních náležitostí práce.

# Obsah

|   |           |
|---|-----------|
| Úvod .....  | 7         |
| <b>1 Teorie .....</b>   | <b>8</b>  |
| 1.1 Charakteristika THz záření .....                          | 8         |
| 1.2 Aplikace THz záření .....                                 | 9         |
| 1.2.1 Astronomie .....  | 9         |
| 1.2.2 Medicína .....  | 11        |
| 1.2.3 Spektroskopie .....                                     | 11        |
| 1.2.4 Analýza uměleckých děl .....                            | 12        |
| 1.2.5 Další .....   | 14        |
| 1.3 Technologie pro THz záření .....                          | 14        |
| 1.3.1 Zdroje THz záření .....                                 | 14        |
| 1.3.2 Detektory THz záření .....                              | 16        |
| 1.3.3 Optické prvky pro THz záření .....                      | 18        |
| <b>2 Experiment .....</b>                                     | <b>19</b> |
| 2.1 Přístroje a vybavení .....                                | 19        |
| 2.1.1 Zdroj THz záření .....                                  | 19        |
| 2.1.2 Detektor THz záření .....                               | 19        |
| 2.1.3 Optické prvky .....                                     | 20        |
| 2.2 Experimentální úlohy .....                                | 21        |
| 2.2.1 Charakterizace neupraveného svazku .....                | 21        |
| 2.2.2 Kolimace svazku .....                                   | 22        |
| 2.2.3 Ověření údajů o ohniskových vzdálenostech čoček .....   | 22        |
| 2.2.4 Studium difrakčních jevů .....                          | 23        |
| 2.2.5 Detekce a zobrazení předmětů v transmisním režimu ..... | 24        |
| 2.2.6 Detekce a zobrazení předmětů s využitím odrazu .....    | 26        |
| 2.3 Metodika zpracování dat .....                             | 27        |
| <b>3. Výsledky a diskuse .....</b>                            | <b>30</b> |
| 3.1 Charakterizace neupraveného svazku .....                  | 30        |
| 3.2 Kolimace svazku .....                                     | 31        |
| 3.3 Ověření údajů o ohniskových vzdálenostech čoček .....     | 33        |
| 3.4 Studium difrakčních jevů .....                            | 38        |
| 3.5 Detekce a zobrazení předmětů v transmisním režimu .....   | 41        |
| 3.6 Detekce a zobrazení předmětů s využitím odrazu .....      | 45        |
| <b>Závěr .....</b>  | <b>49</b> |
| <b>Seznam použitých pramenů .....</b>                         | <b>51</b> |
| <b>Seznam použitých symbolů a zkratk .....</b>                | <b>54</b> |

## Úvod

Terahertzové záření představuje oblast na pomezí infračervené a mikrovlnné oblasti spektra. Toto záření našlo v poslední době využití v celé řadě oblastí vědecké činnosti, například astronomii, spektroskopii, lékařství či analýze uměleckých děl, a rovněž v běžném životě v podobě komunikačních technologií s velkou přenosovou rychlostí [1].

Pro tuto práci je stěžejní aplikace terahertzového záření pro výzkum uměleckých děl. Zásadní výhodou využití THz záření pro tuto aplikaci je, že na rozdíl od rentgenového nebo jiného ionizujícího záření nemá destruktivní vliv na zkoumaný předmět, často velmi cenný historický artefakt. Zároveň však dokáže proniknout do hlubších vrstev materiálu a umožňuje tak zkoumat nejen povrchové vrstvy, ale i hlubší strukturu, která poskytuje cenné informace o způsobu vytvoření uměleckého díla. Další významnou vlastností tohoto typu záření je jeho výrazná absorpce v kovových materiálech, která umožňuje odhalit použití pigmentu s obsahem kovu či detekovat kovový předmět ukrytý pod povrchem. Většina technik používaných v této oblasti je poměrně komplikovaná jak co do zařízení pro generaci a detekci záření, tak do následné analýzy detekovaného signálu [2]. Cílem této práce je ověření možnosti využití komerčně dostupných zařízení firmy Terasense Group, Inc. jako v alespoň omezené míře alternativní a mobilní varianty k běžně užívaným technikám, a to zejména v rámci detekce kovových předmětů.

Tato práce sestává z teoretické a praktické části. Cílem teoretické části je charakterizace terahertzového záření co se týče jeho fyzikálních vlastností a interakce s látkou. Dále pak vytvoření uceleného přehledu o jednotlivých aplikacích THz záření a technikách v nich používaných. V této části práce jsou také popsány nejběžnější typy zdrojů a detektorů pracujících v terahertzové oblasti, principy jejich činnosti, základní technické vlastnosti a specifika pro využití v jednotlivých aplikacích. Rovněž jsou zmíněny nejběžnější komponenty využívané pro fokusaci a vedení záření v této oblasti spektra a materiály využívané pro jejich výrobu.

Praktická část sestává z několika dílčích částí řešících jednotlivé aspekty ovlivňující zobrazení předmětů. První část se zabývá charakterizací svazku zdroje, co se týče prostorového rozložení intenzity záření. Dále je popsána kolimace svazku s cílem maximální homogenizace osvětlení zkoumané oblasti. Rovněž byly ověřeny optické vlastnosti jednotlivých komponent, později využitých pro zobrazení. Dále byly zkoumány difrakční jevy, které mají vzhledem k velké vlnové délce použitého záření výrazný vliv na výslednou podobu obrazu. Samotné zobrazení bylo zkoumáno ve dvou režimech, a to v transmisním režimu, kdy záření prochází zkoumanou oblastí a předmětem je absorbováno, a v režimu s vyžitím záření odraženého od předmětu. Cílem je zhodnotit možnost detekce předmětů s využitím použitých zařízení, porovnat jednotlivé režimy zobrazení, nalézt faktory ovlivňující zobrazení a analyzovat jeho přesnost.

# 1 Teorie

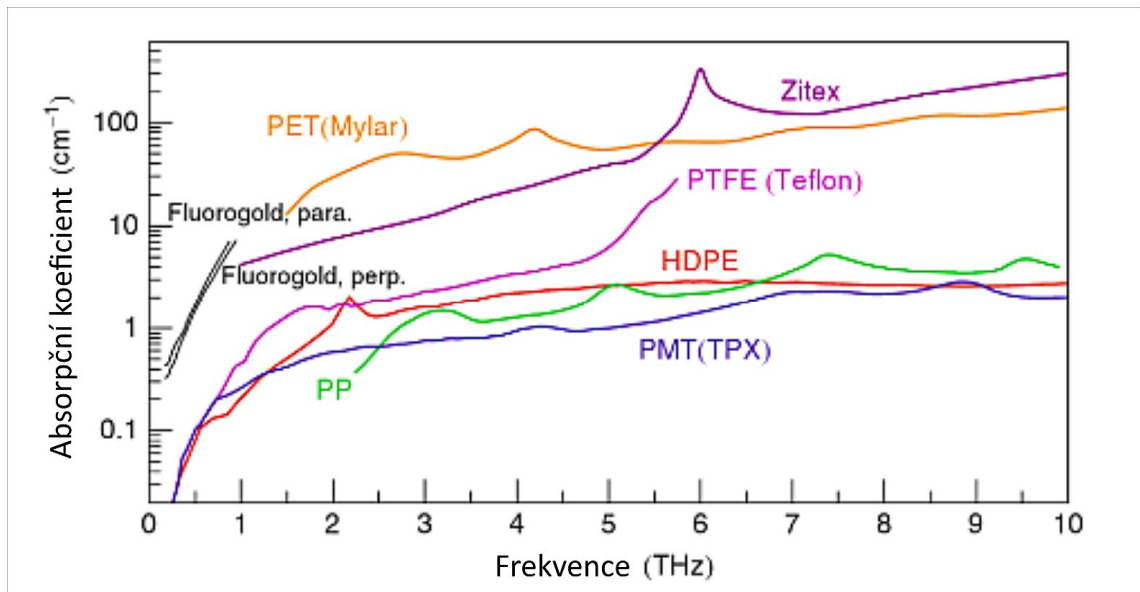
## 1.1 Charakteristika THz záření

Terahertzové záření představuje oblast elektromagnetického záření na pomezí infračervené a mikrovlnné oblasti. Vymezení terahertzové oblasti není zcela sjednoceno. Nejčastěji je udáván rozsah frekvencí 0,1 THz – 10 THz, kterou uvádí například Fukunaga [3] nebo Daukantas [2]. Tento rozsah odpovídá rozmezí vlnových délek záření 3 mm – 30  $\mu\text{m}$  a podle Wienova posunovacího zákona odpovídá záření černého tělesa o teplotě z intervalu 0,97 K – 96,6 K. Naproti tomu Rostami [1] uvádí frekvenční rozsah 0,3 THz – 3 THz. V této oblasti jsou využívány jak komponenty známé z klasické optiky, například čočky a zrcadla, tak některé technologie z oblasti radiokomunikací.

Terahertzová oblast je též někdy nazývána terahertzovou mezerou, protože po dlouhou dobu nebyly k dispozici detektory tohoto typu záření a zdroje schopné činnosti při pokojové teplotě. K výraznějšímu rozvoji došlo až v 60. letech 20. století a zejména pak v 90. letech s objevem metody terahertzové spektroskopie v časové doméně [1].

Vzhledem k nízké energii fotonů terahertzového záření nedochází při jejich průchodu materiálem k jeho ionizaci, jako tomu je například v případě rentgenového záření. THz záření pouze ovlivňuje vibrační a rotační stavy molekul, přičemž jejich elektrický stav zůstává nezměněn, což jej předurčuje k využití v řadě aplikací, kde by při použití rentgenového záření docházelo k poškození materiálu. Tento typ záření má schopnost procházet velkou škálou nevodivých materiálů – plasty, papírem, textiliemi a tkáněmi s nízkým obsahem vody, přičemž při průchodu materiálem dojde ke změnám ve spektru použitého záření, které jsou charakteristické pro daný materiál, čehož lze dále využít k analýze tohoto materiálu. Závislost absorpčního koeficientu na frekvenci v THz oblasti pro polyetylentereftalát (PET), polytetrafluoretylen (PTFE), polypropylen (PP), vysokohustotní polyetylen (HDPE), polymethylpenten (TPX) a teflon s příměsí skleněných zrn (Zitex) je zachycena na Obr. 1. Naopak ve vodivých materiálech a zejména vodě dochází k absorpci, což umožňuje například detekci kovových předmětů ukrytých pod povrchem jiného materiálu. K terahertzovému záření lze přistupovat jako k optickému záření a využít klasických optických prvků, přičemž vzhledem k jeho vlnové délce dochází k výraznému potlačení Rayleighova rozptylu. Zároveň je využíváno i v telekomunikačních technologiích, kde se uplatňují metody používané pro mikrovlny a radiové vlny, které spadají do oblasti elektroniky [1].





Obr. 1: Absorpční koeficient pro vybrané polymery, zkratky vysvětleny v textu (převzato a upraveno z [4]).

## 1.2 Aplikace THz záření

S rozvojem technologií pro detekci a generaci terahertzového záření došlo postupně k jeho uplatnění v celé řadě odvětví. Následující kapitola shrnuje nejvýznamnější z nich.

### 1.2.1 Astronomie

Jedním z prvních odvětví, ve kterém došlo k výraznějšímu využití terahertzového záření, byla astronomie. V této oblasti spektra září celá řada chladných objektů, zejména rozsáhlých prachoplynových mračen, která kromě vodíku obsahují i jednoduché molekuly, například oxid uhelnatý, jejichž emisní a absorpční spektrální čáry spadají právě do terahertzové oblasti a je tak možno zkoumat složení těchto objektů, které stojí v popředí zájmu astronomů, protože v nich dochází ke vzniku hvězd a planet. Tyto procesy nelze zkoumat ve viditelné oblasti spektra, protože většina materiálu tvořícího tato mračna je pro něj neprůhledná. Do terahertzové oblasti rovněž spadá reliktní záření po velkém třesku, jehož teplota 2,7 K odpovídá frekvenci 0,3 THz. Toto záření nese informaci o rané struktuře vesmíru a je klíčové pro pochopení kosmologických principů a samotného velkého třesku. Rozvoji terahertzové astronomie rovněž napomohla částečná propustnost zemské atmosféry v této oblasti. Ta nemá podobu souvislého pásma, ale jednotlivých pásů v oblasti 0,1 THz – 1,2 THz, které jsou odděleny oblastmi absorpce molekul vodní páry. S rostoucí nadmořskou výškou propustnost atmosféry roste, přičemž výraznější je tento efekt u nižších frekvencí. Z tohoto důvodu jsou observatoře využívající tohoto typu záření budovány ve vysokých nadmořských výškách. Ke kompletnímu pokrytí této spektrální oblasti napomohly umělé družice pracující nad hranicí zemské atmosféry [5].

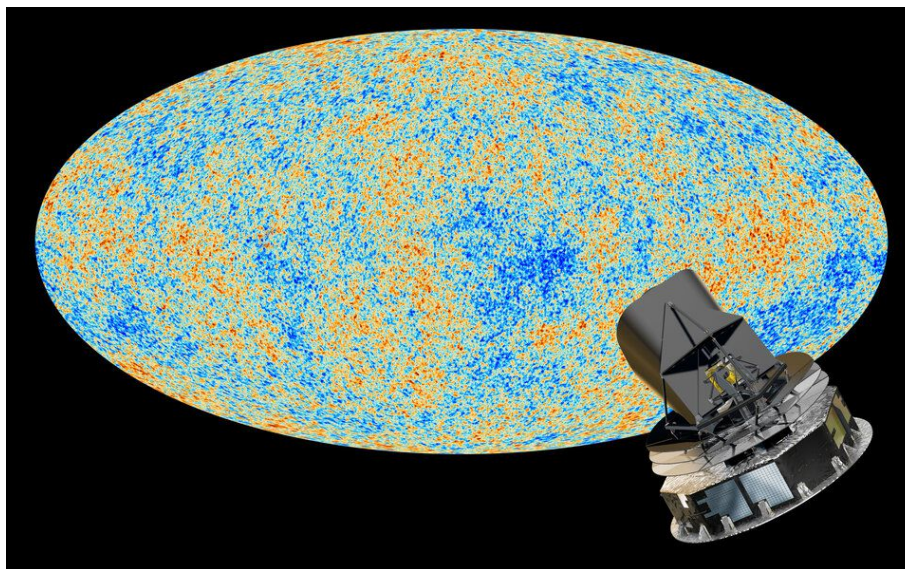
Největším pozemním projektem zkoumajícím vesmír v této oblasti spektra je ALMA (Atacama Large Millimeter Array), nacházející se na planině Chajnantor v poušti Atacama v Chile v nadmořské výšce 5000 m. Jedná se o soustavu 66 antén o průměru 12 m, resp. 7 m, které pracují společně jako interferometr s měnitelnou konfigurací, díky čemuž je možno dosáhnout řádově lepšího rozlišení než v případě jednotlivé antény, přičemž maximální vzdálenost antén lze měnit v rozmezí 150 m – 16 km. Systém pracuje v rozmezí vlnových délek 0,32 mm – 3,6 mm. Cílem prováděných pozorování je zejména

studium protoplanetárních disků a detekce složitějších organických molekul jako základních stavebních kamenů života [6]. Soustava antén je zachycena na Obr. 2.



Obr. 2: Antény systému ALMA (převzato z [7]).

Nejkomplexnějším přístrojem pracujícím u dolní hranice této oblasti spektra na oběžné dráze Země byl teleskop PLANCK Evropské kosmické agentury. Jednalo se o dalekohled Gregoryho konstrukce o průměru primární antény 1,5 m, pracující v rozsahu frekvencí 30 GHz – 875 GHz. Jeho hlavním vědeckým cílem bylo studium drobných fluktuací v reliktním záření s vysokým rozlišením, které mohou vypovídat o struktuře vesmíru v raných fázích jeho vývoje. Dále se rovněž zabýval studiem velkoškálové struktury vesmíru a chladné hmoty ve spirálních ramenech galaxií [5, 8]. Teleskop PLANCK a jím pořízená mapa mikrovlnného pozadí je zachycen na Obr. 3.



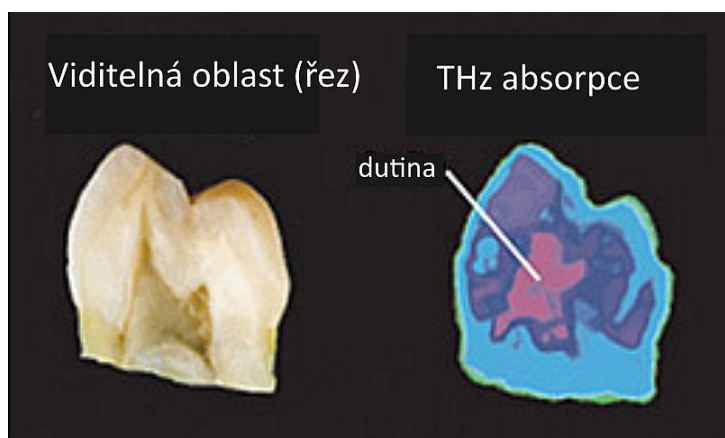
Obr 3: PLANCK a jím pořízená mapa reliktního záření (převzato z [9]).

## 1.2.2 Medicína

Současná medicína využívá terahertzové záření jak pro analýzu složení tkání pomocí spektroskopických metod, tak k přímému zobrazování. Tkáně obsahují velké množství vody, což v některých ohledech komplikuje využití tohoto typu záření, které je jejími molekulami velmi dobře absorbováno. Tohoto jevu lze však také využít, protože mezi jednotlivými typy tkání, například svalovinou a tukem, jsou rozdíly v obsahu vody, které umožní jejich odlišení na pořízeném snímku [10].

Vysoká míra absorpce při průchodu tkáněmi předurčuje terahertzové záření zejména k aplikacím v kožním lékařství, kde je využíváno odraženého záření. S jeho pomocí lze sledovat vývoj kožních onemocnění, například lupénky, bez nutnosti přímého kontaktu, a zejména nachází uplatnění v diagnostice karcinomů kůže. V případě odebraných vzorků tkání je rovněž využíváno záření procházející vzorkem. Princip zodpovědný za kontrast mezi zdravou a patologickou tkání není podle Ref. [10] způsoben rozdílným obsahem vody, neboť tento kontrast zůstává zachován i po dehydrataci vzorku. Ref. [1] rovněž uvádí využití terahertzového záření jako jednu z možných metod diagnostiky karcinomů prsu jako méně invazivní alternativu k rentgenové mamografii využívající ionizující záření. Při použití širokého spektra záření lze navíc jeho analýzou po průchodu tkání získat informaci o jejím složení [1, 10, 11].

Další oblastí, ve které terahertzové záření našlo uplatnění, je zubní lékařství. Metodou analýzy času letu záření procházejícího zubem lze dobře odlišit sklovinu od zuboviny a určit tak její tloušťku a rovněž lze dobře odhalit tvar dřeňové dutiny, v níž dochází v případě zdravého zubu k výrazné absorpci, naopak v případě odumřelého zubu lze očekávat absorpci výrazně nižší [10]. Lidský zub při zobrazení s pomocí prošlého záření je zachycen na Obr. 4. Výše zmíněné aplikace využívají THz záření v podobě pulsů.

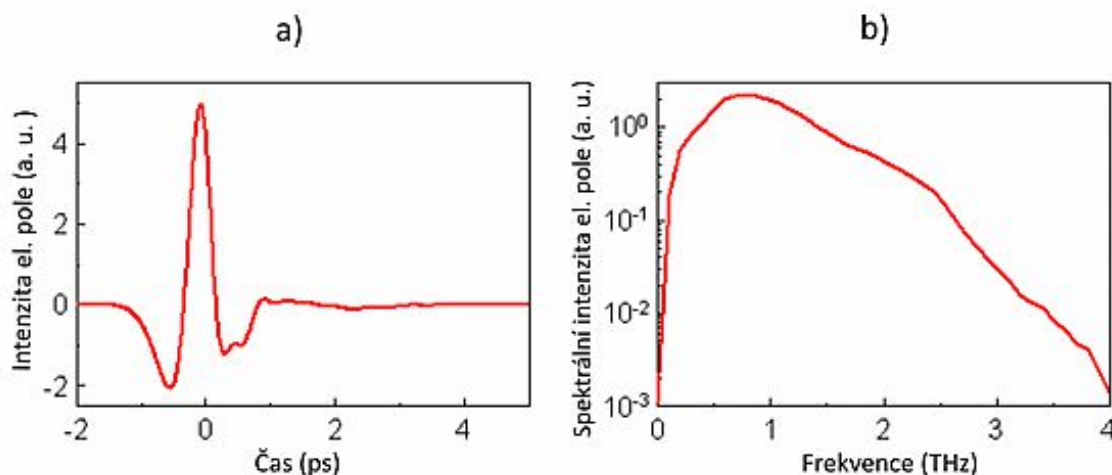


Obr. 4: Lidský zub ve viditelném světle a s využitím THz záření (převzato a upraveno z [12]).

## 1.2.3 Spektroskopie

Pravděpodobně nejrozšířenější technikou využívající terahertzové záření je spektroskopie v časové doméně (TDS). Tato technika vyžaduje širokofrekvenční pulsy, čehož lze docílit velmi krátkou dobou trvání pulsu. V praxi jsou pro tuto aplikaci využívány fotokonduktivní antény, ve kterých jsou oscilace vyvolávány pomocí laserů s ultrakrátkými/femtosekundovými pulsy. Nejprve je proveden záznam referenčního průběhu vlny a následně identická vlna interaguje se vzorkem, přičemž může jít jak o průchod vzorkem, tak o odraz či rozptyl. Při průchodu vzorkem dochází jednak k zeslabení záření vlivem Fresnelova odrazu na každém rozhraní a absorpcí a rozptylem uvnitř materiálu, a také ke zpoždění signálu vlivem vyššího indexu lomu, a tedy nižší rychlosti

šíření vlny uvnitř vzorku. Tato metoda tedy umožňuje získat informaci o absorpčním koeficientu a indexu lomu zkoumaného materiálu. Nalezení samotné odezvy funkce materiálu v časové doméně je komplikované a jako dostačující se jeví nalezení funkce propustnosti ve frekvenční doméně. Tu lze získat jako podíl frekvenčního spektra naměřené a referenční vlny, které získáme z jejich průběhů v časové doméně provedením Fourierovy transformace [13]. Typický průběh vlny v časové doméně a ve frekvenční doméně po provedené Fourierovy transformace je zachycen na Obr. 5.



Obr. 5: Typický průběh vlny a) v časové doméně, b) ve frekvenční doméně (převzato a upraveno z [14]).

Vzhledem k tomu, že terahertzové záření má energii odpovídající vibračním a rotačním stavům molekul, umožňují spektroskopické metody s jeho využitím studovat jejich stavbu a vzájemné reakce. THz spektroskopie výrazně přispěla ke studiu molekul DNA, jejichž pomalé vibrace související s vodíkovými můstky mezi bázemi se projeví v absorpčním spektru, i dalších složitějších organických molekul, například aminokyselin či bílkovin. Dále našla terahertzová spektroskopie uplatnění například při charakterizaci vrstev oxidu titaničitého ve fotovoltaických člancích, při detekci výbušnin a některých narkotických látek, kontrole potravin či léčiv [1, 15].

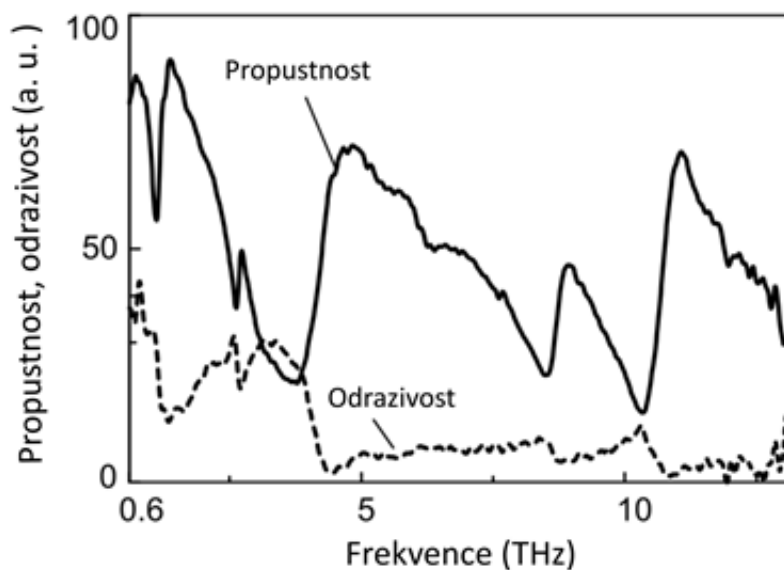
#### 1.2.4 Analýza uměleckých děl

Stěžejní pro tuto práci je aplikace terahertzového záření pro studium uměleckých děl. Výrazný rozvoj vědecké činnosti v této oblasti nastal počátkem tohoto tisíciletí a zaplnil tak mezeru, která zůstávala, ve snaze provést komplexní analýzu uměleckých děl a historických artefaktů v co největším spektrálním rozsahu. Zásadním přínosem terahertzového záření v této oblasti je možnost zkoumat neinvazivním způsobem podpovrchové vrstvy a nevystavovat cenný artefakt záření, které by na něj mohlo mít destruktivní vliv, jako tomu může být v případě rentgenového záření [2].

V této oblasti dominují dvě zobrazovací metody, a sice zobrazení v časové doméně za využití ultrakrátkých pulsů z fotokundktivní antény a zobrazení za pomoci frekvenčně modulované kontinuální vlny. Výhodou terahertzového záření oproti dalším oblastem spektra je výraznější rozdíl indexu lomu pro různé materiály, který při zobrazení v časové doméně umožňuje rozlišení i velmi tenkých vrstev o tloušťce 20  $\mu\text{m}$  – 50  $\mu\text{m}$ . Zobrazování může být dále doplněno spektroskopickými metodami, které umožňují na základě charakteristického spektrálního otisku identifikovat použité barviva a pigmenty. Vzhledem k tomu, že se jedná o poměrně novou techniku, neexistuje zatím kompletní databáze

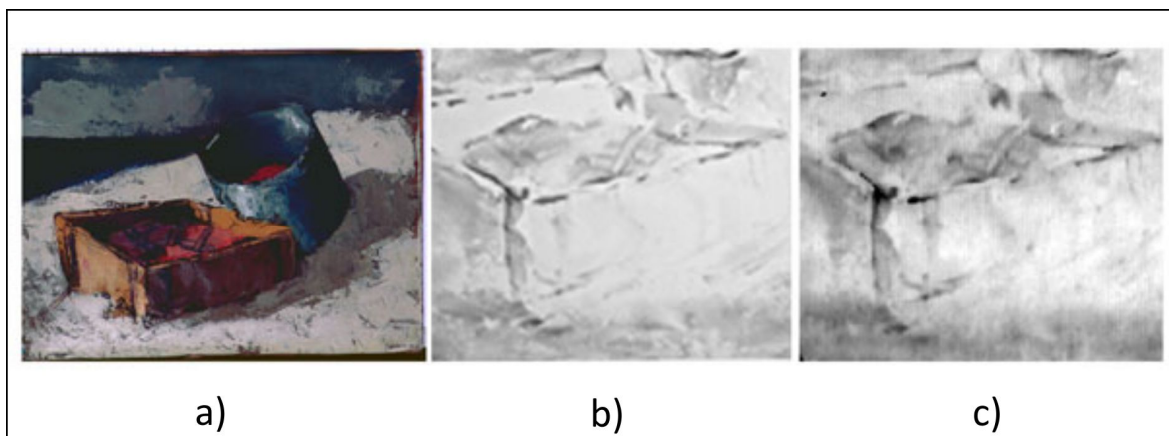


spekter pigmentů, jako je tomu v jiných oblastech spektra [2, 16]. Na Obr. 6 je ukázáno spektrum přírodního cinabaritu (HgS) ve frekvenční doméně.



Obr. 6: Spektrum přírodního cinabaritu ve frekvenční doméně (převzato a upraveno z [16]).

Analýza obrazů v THz oblasti umožňuje zobrazit podkladový materiál, základové vrstvy malby, náčrt skrytý pod vrstvou barvy, tahy štětce, tenké kovové folie, používané v některých výtvarných technikách, a odhalit případné pozdější úpravy obrazu provedené neoriginální technikou. Kromě obrazů byly terahertzové zobrazovací metody úspěšně použity i v případě nástěnných maleb, keramických předmětů, stavebních materiálů či mumií [2, 16]. Na Obr. 7 je zachycen obraz s názvem „After Fishing“ ve viditelné oblasti spektra a jeho výřez s využitím rentgenového záření a terahertzového záření.



Obr. 7: Obraz „After Fishing“ a) ve viditelném světle, b) výřez v rentgenové oblasti, c) výřez v terahertzové oblasti (převzato a upraveno z [17])

### 1.2.5 Další

Z dalších možností využití terahertzového záření lze zmínit například bezpečnostní skenery, které jsou používány pro detekci kovových předmětů, výbušnin, tekutin atd., ukrytých v obalech z materiálů propouštějících THz záření, tedy zejména papíru, plastů a textilií, a pod oblečením osob. V poslední době došlo ke komerčnímu rozšíření těchto technologií a například firma Terasense Group, Inc. nabízí jak jednořádkový skener pro skenování obálek či krabic, pracující v transmisním režimu, tak zařízení pro kontrolu osob, využívající odrazeného záření [18]. Toto zařízení je zachyceno na Obr. 8. Obě zařízení využívají nízkovýkonový kontinuální zdroj záření.



Obr. 8: Bezpečnostní skener osob od firmy Terasense Group, Inc. (převzato z [18]).

Terahertzové záření dále nalézá uplatnění například ve farmacii či potravinářském průmyslu, kde je využíváno ke kontrole naplněnosti obalů z neprůhledných materiálů, například plat s pilulkami. Zajímavé je využití THz záření při návrzích jednorázových dětských plen, kde je vzhledem k jeho výrazné absorpci ve vodě možno snadno určit množství zachycené kapaliny v dané oblasti výrobku [19].

Stále častěji je rovněž THz záření využíváno pro komunikační účely, kde je využíváno několik pásem, konkrétně 140 GHz, 220 GHz, 340 GHz, 410 GHz, a 460 GHz. Vzhledem k jeho vysokému útlumu v atmosféře, který je navíc závislý na aktuální vlhkosti, není vhodné pro bezdrátový přenos na velké vzdálenosti, nicméně je úspěšně využíváno například v interiérech budov, na druhou stranu tato skutečnost umožňuje lepší zabezpečení přenosu proti odposlechu. Jeho největší výhodou je velká přenosová rychlost, dosahující až desítek gigabitů za sekundu, rovněž rozměry vysílací a přijímací antény jsou výrazně menší než při použití záření o větší vlnové délce [20].

## 1.3 Technologie pro THz záření

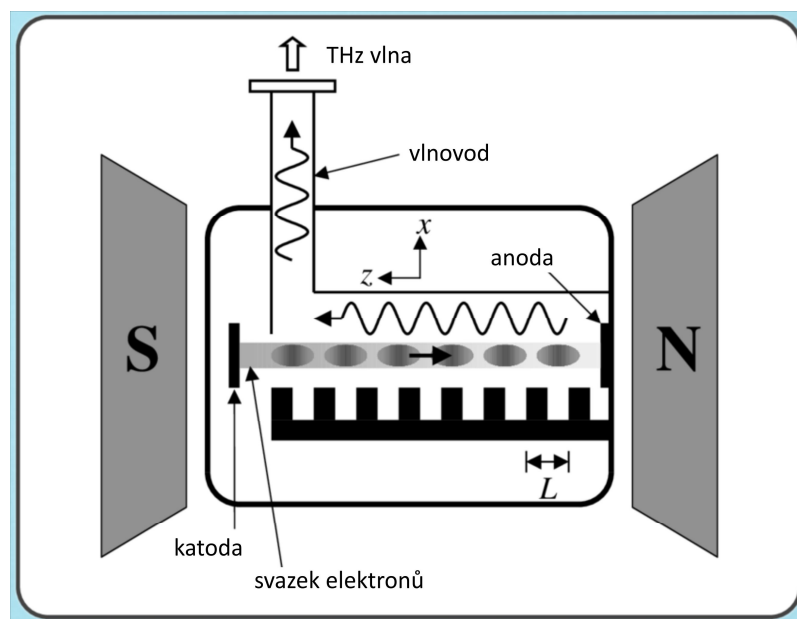
### 1.3.1 Zdroje THz záření

Velmi rozšířeným zdrojem terahertzového záření, používaným ve většině vědeckých aplikací, je fotokonduktivní anténa. Tato anténa může být použita jako zdroj i jako detektor záření. Sestává ze dvou kovových pásek na polovodičovém substrátu, většinou z arsenidu galia, mezi nimiž je úzká mezera. Na pásky je přivedeno stejnosměrné napětí a do mezery mezi nimi je zacílen ultrakrátký puls z femtosekundového laseru. Díky tomu dojde ke krátkodobému uzavření obvodu a prudká změna potenciálu vyvolá oscilace v THz oblasti.

Generované záření má široký spektrální rozsah, přibližně 0,3 THz – 30 THz, a špičkový výkon okolo 1  $\mu\text{W}$ . Výhodou tohoto typu zdroje je možnost činnosti při pokojové teplotě. Fotokonduktivní anténa může být rovněž použita v kontinuálním režimu generace, kdy je použito dvou laserů, přičemž rozdíl jejich frekvencí spadá do terahertzové oblasti. Za použití vhodného krystalu, například selenidu galia, je z nich vytvořeno záření o frekvenci odpovídající rozdílu původních frekvencí a to je následně zacíleno do mezery mezi kovovými pásky antény. Tímto způsobem lze získat záření o velmi přesné hodnotě frekvence a při možnosti ladění frekvence jednoho z laserů je možno rovněž ladit frekvenci výsledného záření [12, 21].

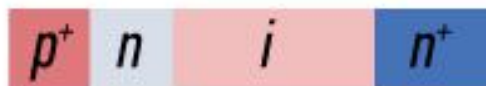
Další metodou je generace koherentního THz záření s využitím MASERu (mikrovlnného laseru). Aktivní prostředí představuje molekulární plyn o nízkém tlaku v uzavřené kavitě. Frekvence emitovaného záření závisí na konkrétním plynu a je omezeně laditelná změnou jeho tlaku. Mezi používané plyny patří například metanol, produkující záření o frekvenci 2,5 THz, dále pak amoniak, chlormetan, jódmelan a difluormetan. K čerpání je využíván  $\text{CO}_2$  laser. Účinnost čerpání je velmi nízká, pohybuje se řádově v desetínách procenta [21 - 23].

Pro generaci záření o vyšším výkonu jsou používány gyrotrony, lasery na volných elektronech (free electron laser) a oscilátory zpětné vlny (backward wave oscillator). Laser na volných elektronech je založen na interakci vysokoenergetických relativistických elektronů se silným magnetickým polem. Elektrony jsou urychleny a následně vstupují do undulátoru, periodické struktury magnetů, které na elektrony působí Lorentzovou silou a střídavě je vychylují z původního směru letu, přičemž dochází k uvolnění záření. Frekvenci získaného záření lze měnit ve velkém rozsahu prostřednictvím hustoty magnetů undulátoru, energie vstupujících elektronů a intenzity magnetického pole. Oscilátor zpětné vlny převádí energii svazku elektronů pohybujících se vakuovou trubicí, které jsou bržděny mřížkou vytvářející periodické změny intenzity elektrického pole, na energii elektromagnetické vlny šířící se v opačném směru. Ladění frekvence získaného záření je možno provádět pomocí změny energie elektronů či napětí na mřížce. U oscilátoru zpětné vlny dosahuje maximální výkon u dolní hranice THz oblasti řádově desítek mW, s rostoucí frekvencí klesá k jednotkám mW [12, 23 - 25]. Schéma oscilátoru zpětné vlny je zachyceno na Obr. 9.



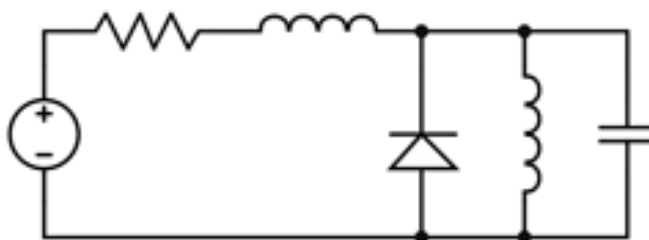
Obr. 9: Schéma oscilátoru zpětné vlny (převzato a upraveno z [26]).

Pro generování záření o nižších frekvencích lze rovněž použít polovodičové součástky běžně používané v mikrovlnné oblasti spektra, například Gunnovy (Gunn) a IMPATT (Impact Ionization Avalanche Transit Time) diody. IMPATT dioda je součástka s negativní resistencí se strukturou  $p^+ - n - i - n^+$ , kde  $i$  představuje oblast driftu elektronů. Schéma IMPATT diody je zachyceno na Obr. 10.



Obr. 10: Schéma struktury IMPATT diody (převzato z [27]).

Při zapojení do rezonančního obvodu v závěrném směru dochází na přechodu  $p^+ - n$  ke generaci párů elektron – díra. Elektrony putují skrze driftovou oblast do oblasti  $n^+$ , čímž vzniká fázové zpoždění. Elektrony uvnitř diody se pohybují proti směru působení střídavého pole oscilačního obvodu, čímž jsou brzděny a předávají střídavému poli svou energii. Při fázovém rozdílu  $180^\circ$  nabude dioda charakteru záporného odporu, což umožní generování signálu. [28]. Schéma zapojení IMPATT diody do obvodu je ukázáno na Obr. 11.



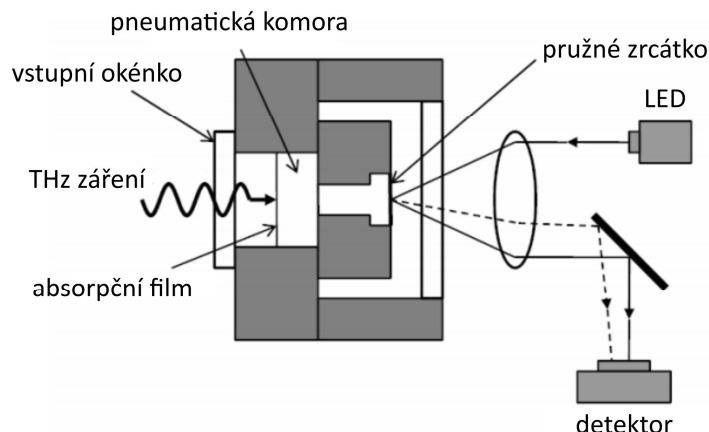
Obr. 11: Schéma zapojení IMPATT diody (převzato z [27]).

### 1.3.2 Detektory THz záření

První z možností detekce terahertzového záření představují tepelné detektory. Podstatou činnosti těchto zařízení je převod intenzity elektromagnetického pole vlny na měřitelnou elektrickou veličinu tím, že absorpcí záření v materiálu detektoru dojde ke změně jeho fyzikálních vlastností. Tyto detektory jsou schopny poskytnout pouze informaci o intenzitě dopadajícího záření, informace o fázi vlny není detekována a vyznačují se poměrně pomalou odezvou. Mezi nejrozšířenější tepelné detektory patří Golayovy cely (Golay cell), pyroelektrické detektory, termoelektrické detektory, termočlánky a bolometry [23].

Golayova cela využívá absorbéru, za níž je dutina vyplněná plynem. Absorbér pohlcuje dopadající záření, a je tak zahříván, což způsobí změnu objemu plynu uvnitř dutiny. Tato změna může být detekována pomocí citlivého mikrofonu nebo pomocí deformace odrazné plochy nanesené na pružnou membránu v zadní straně dutiny, která směřuje dopadající záření z externího zdroje do optického zesilovače. Jejich odezva se pohybuje okolo  $10^5 \text{ V}\cdot\text{W}^{-1}$  při frekvenci záření okolo 1 THz [23]. Schéma Golayovy cely je zachyceno na Obr. 12.





Obr. 12: Schéma Golayovy cely (převzato a upraveno z [26]).

Pyroelektrický detektor využívá pyroelektrického jevu, tedy deformace krystalové mřížky materiálu vlivem změny teploty, která se projevívá vznikem dipólového momentu, jenž vyvolá měřitelné napětí mezi povrchy materiálu. Pyroelektrické detektory jsou častěji využívány pro záření v infračervené oblasti spektra, v terahertzové oblasti jsou vhodné pro využití u její horní hranice, tedy pro záření s vyšší energií, které vyvolá výraznější deformaci krystalové mřížky [23].

Bolometr využívá k detekci terahertzového záření odporový teploměr připojený k vrstvě materiálu absorbující dopadající záření. Toto záření způsobí zahřátí materiálu, změna teploty je následně zaznamenána teploměrem. Po tomto materiálu je požadována dobrá absorptivita a nízká tepelná kapacita. V praxi jsou pro tento účel využívány kovy, dopované polovodiče i tenké supravodivé filmy. Při pokojové teplotě se odezva bolometrů pohybuje okolo  $100 \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$ , přičemž čas odezvy je okolo 1 s. Bolometry pracující při velmi nízkých teplotách za využití chlazení kapalným heliem vykazují odezvu až v řádu  $10^9 \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$  při stejném odezvoovém čase [23].

Další používanou technologií jsou plasmové oscilace v tranzistorech řízených elektrickým polem. Tato technologie dosahuje odezvy okolo  $200 \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$ . V současné době dochází k rozvoji detekce v THz oblasti s pomocí CMOS detektorů [23].

Další z variant představují detektory využívající k detekci referenční vlnu z lokálního oscilátoru. Výhodou těchto zařízení je možnost detekce nejen intenzity elektromagnetické vlny, ale rovněž její fáze. Vstupní signál je smíchán se signálem z lokálního oscilátoru v nelineárním směšovacím zařízení. Pokud má referenční vlna stejnou frekvenci jako signál, hovoříme o homodynní detekci. Při odlišné frekvenci hovoříme o heterodynní detekci, kdy smícháním vznikají záněže o nižší frekvenci, detekovatelné intenzitním detektorem. Jako směšovací zařízení jsou využívány Schottkyho diody, bolometry horkých elektronů (hot electron bolometer) nebo struktury supravodič – izolant – supravodič (SIS). Nevýhodou těchto zařízení, s výjimkou Schottkyho diody pracující při pokojové teplotě, je nutnost jejich chlazení na nízkou teplotu. Bolometry horkých elektronů vyžadují chlazení na teplotu kapalného dusíku, přičemž jsou schopny detekce až do frekvence záření 3 THz za velmi nízkého výkonu lokálního oscilátoru, řádově v desítkách nW. SIS struktury musí být chlazeny na teplotu kapalného helia, výkon lokálního oscilátoru je v jednotkách  $\mu\text{W}$ . Tento typ detektoru má oproti ostatním výrazně vyšší citlivost [23].

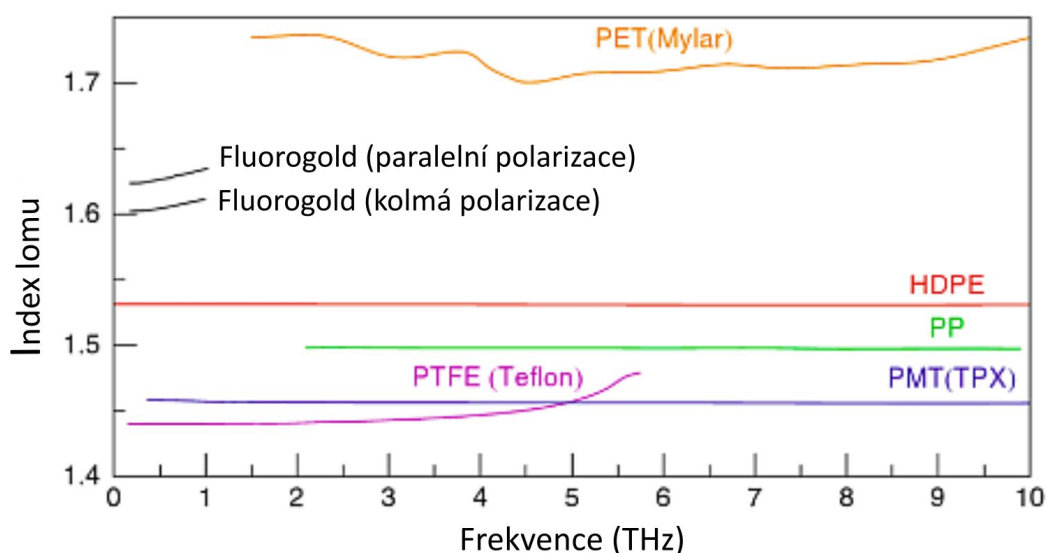
V případě, že chceme získat i informaci o fázi dopadající vlny, můžeme rovněž využít optoelektronických detekčních metod. Jednou z možností je využití fotokonduktivní

antény, která byla popsána již v kapitole týkající se zdrojů THz záření. Opět je využit buď pulsní laser s velmi krátkými pulsy, nebo dvojice laserových svazků s rozdílem frekvencí spadajícím do terahertzové oblasti. Příchozí elektromagnetická vlna pak na anténě vyvolá elektrický proud, jehož velikost je úměrná amplitudě této vlny. Další variantou je využití nelineárního optoelektronického krystalu, kde dopadající záření interaguje s laserovým paprskem, což způsobí změnu v jeho polarizačním stavu, kterou je možno následně detekovat [23].

### 1.3.3 Optické prvky pro THz záření

V terahertzové oblasti spektra jsou využívány optické prvky rozšířené pro využití i v jiných spektrálních oblastech, tedy čočky, zrcadla, filtry či polarizátory. Vzhledem k nedostatku materiálů s dostatečnou transmisivitou v této spektrální oblasti nabývají většího významu reflektivní optické prvky s odraznými vrstvami z kovových materiálů, jejichž odrazivost v THz oblasti spektra je velmi dobrá. Vzhledem k tomu, že celá řada zdrojů produkujících terahertzové záření září silně i v jiných oblastech spektra, patří mezi nejčastěji používané optické prvky pásmové filtry propouštějící právě THz záření [4].

Pro výrobu čoček jsou využívány polymerní materiály, mezi nejvýznamnější patří například polytetrafluoretylen (PTFE), běžně známý pod názvem teflon. Pro tento materiál je v THz oblasti udávána hodnota indexu lomu 1,43, přičemž tato hodnota s rostoucí frekvencí stoupá, stejně jako absorptivita, což teflon předurčuje k využití zejména pro záření s frekvencí u dolní hranice této spektrální oblasti. Dále je využíván například polypropylen (PP) s indexem lomu okolo hodnoty 1,5, která jen velmi málo kolísá v rámci celé terahertzové oblasti. Absorptivita polypropylenu je poměrně vysoká, nicméně vzhledem k dobré mechanické pevnosti je využíván na vstupní okénka vakuovaných zařízení. Dále mezi používané materiály patří polyetylen (PE), polyethylentereftalát (PET) v podobě mylarového filmu či materiály na bázi již výše zmíněných s příměsí skleněných zrn. Závislost indexu lomu využívaných polymerních materiálů na frekvenci je ukázána v grafu na Obr. 13. Ke koncentraci záření jsou kromě čoček rovněž používány zužující se trubice, například Winstonův kužel (Winston cone) [4].



Obr. 13: Závislost indexu lomu na frekvenci pro vybrané polymerní materiály, zkratky vysvětleny v kap. 1.1 (převzato a upraveno z [4]).

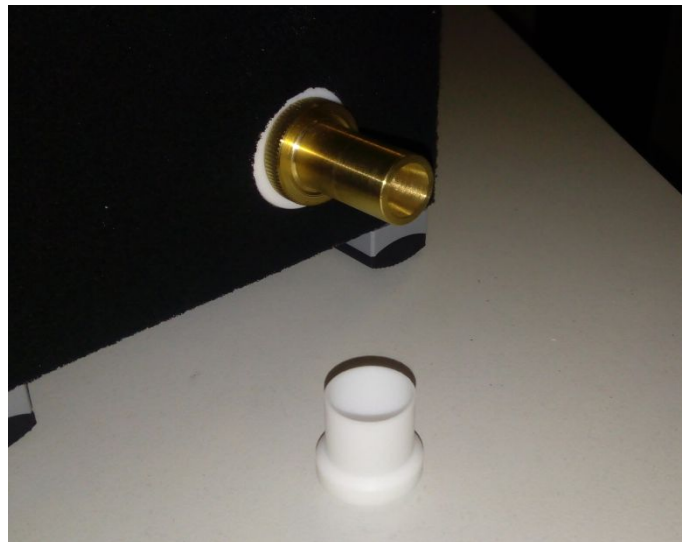
## 2 Experiment

Obsahem této části práce je seznámení s jednotlivými přístroji a zařízeními použitými pro realizaci experimentů. Dále pak popis jednotlivých experimentálních úloh, nastavení přístrojů a uspořádání jednotlivých prvků pro jejich realizaci a metodiky zpracování naměřených dat.

### 2.1 Přístroje a vybavení

#### 2.1.1 Zdroj THz záření

Ke generaci terahertzového záření je použit zdroj TeraSense THz Source 100 GHz, 400 mW, firmy Terasense Group, Inc. Této frekvenci odpovídá vlnová délka záření 3 mm. Podle údajů výrobce [29] využívá technologii IMPATT diody a je vybaven kovovým kolimátorem v podobě dutého válce, který je za účelem stabilizace výstupního výkonu opatřen ochranným izolátorem. Při využití této antény by podle [30] měl svazek mít Gaussovský profil a divergenci 18°. Detail antény se sejmutým ochranným izolátorem je zachycen na Obr. 14. Pro realizaci experimentů byl zdroj umístěn na otočné platformě umožňující otočení o definovaný úhel a změnu výšky zdroje nad pracovní plochou.



Obr. 14: Anténa zdroje se sejmutým ochranným izolátorem.

#### 2.1.2 Detektor THz záření

Jako detektor terahertzového záření byla zvolena kamera Tera-1024, model T15/32/32 od firmy Terasense Group, Inc. Kamera disponuje detekční plochou  $(48 \times 48) \text{ mm}^2$  a rozlišením 1024  $(32 \times 32)$  pixelů, pixel je tedy čtverec o straně 1,5 mm. K jejímu ovládání slouží výrobcem dodávaný software TeraSense Viewer (TSV). Uživatelské rozhraní softwaru umožňuje nastavení velkého množství předvoleb, přičemž pro naše měření je zásadní zejména volba mezi obrazem ve falešných barvách, nebo černobílou variantou, která je výhodná pro další softwarové zpracování obrazu, nastavení gama korekce, nastavení orientace obrazu, které lze využít při zobrazení optickou soustavou poskytující převrácený obraz, a možnost nastavení expoziční doby snímku. Délku expozice nelze volit přímo v časových jednotkách, software nabízí 11 hodnot expozice označených 0 - 10. Příslušné počty snímků za sekundu a relativní zesílení signálu oproti základní hodnotě expozice jsou uvedené v Tab. 1, sestavené na základě dat z manuálu výrobce [31].

Tab. 1: Počet snímků za sekundu a relativní zesílení signálu pro jednotlivé hodnoty expozice.

| expozice              | 0  | 1   | 2   | 3  | 4  | 5   | 6   | 7   | 8   | 9    | 10   |
|-----------------------|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| snímků za sekundu     | 90 | 85  | 52  | 24 | 13 | 7,7 | 3,6 | 1,9 | 0,9 | 0,45 | 0,23 |
| rel. zesílení signálu | 1  | 2,4 | 5,2 | 11 | 22 | 44  | 88  | 177 | 355 | 709  | 1420 |

Kamera byla připevněna na stojánek umožňující změnu výšky nad pracovní plochou a na kolejnici umožňující horizontální posun. Pro všechna měření byla nastavena gama korekce na hodnotu 1, obraz byl snímán v černobílém režimu a délka expozice byla volena s ohledem na to, aby nedocházelo k saturaci snímku. Kamera včetně uchycení je zachycena na Obr. 15.



Obr. 15: Kamera s uchycením.

### 2.1.3 Optické prvky

Pro tvarování svazku záření a zobrazování předmětů byly využity tři plankonvexní spojné čočky od firmy Thorlabs Inc. zhotovené z polytetrafluoretylenu (PTFE). Podle údajů výrobce [32] má čočka LAT075 o průměru 2" (50,8 mm) ohniskovou vzdálenost 75 mm, čočka LAT115 o průměru 3" (76,2 mm) ohniskovou vzdálenost 115 mm a čočka LAT200 o průměru 4" (101,6 mm) 200 mm. Nejmenší čočka byla využita pro kolimaci svazku. Dvě větší čočky byly sestaveny do podoby dubletu s pevnou vzdáleností čoček 5 cm a v této podobě byly využívány pro zobrazení předmětů. Pro další výpočty je výhodné tento dublet považovat za jeden optický prvek, pro jehož ohniskovou vzdálenost  $f$  lze podle [33] na základě zobrazovací rovnice odvodit vztah (1).

$$f = \frac{f_1 \cdot f_2}{f_1 + f_2 - d}, \quad (1)$$

kde  $f_1$  a  $f_2$  jsou ohniskové vzdálenosti jednotlivých čoček a  $d$  vzdálenost mezi nimi. V tomto konkrétním případě tak byla vypočtena pro dublet ohnisková vzdálenost  $f = 87$  mm. Čočky byly připevněny na stojánek umožňující změnu výšky nad pracovní

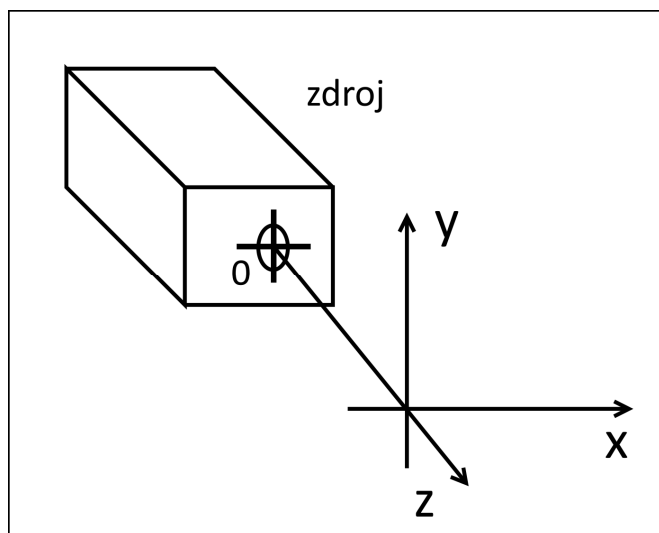
plochou a na kolejnici umožňující horizontální posun. Použité čočky jsou zachyceny na Obr. 16.



Obr. 16: Použité čočky, zleva: LAT 75, LAT115, LAT200.

## 2.2 Experimentální úlohy

Pro popis následujících úloh byl zaveden souřadný systém s počátkem ve zdroji, jenž má osu  $x$  orientovanou vodorovně, kolmo na směr šíření svazku, osu  $y$  svisle a osu  $z$  ve směru šíření svazku. V částech úlohy, kde byla využita kolimační čočka, se počátek souřadné soustavy nachází v této čočce. Schéma souřadného systému je zobrazeno na Obr. 17.



Obr. 17: Schéma zavedeného souřadného systému.

### 2.2.1 Charakterizace neupraveného svazku

Cílem první prováděné úlohy je charakterizace svazku záření vycházejícího ze zdroje, konkrétně průběhu intenzity záření v závislosti na vzdálenosti od osy svazku a od zdroje záření, a ověření údajů výrobce o divergenci a profilu svazku. Pro další úlohy,



zejména pro zobrazování předmětů, je klíčové docílit homogenního osvětlení plochy srovnatelné s rozměry zobrazovaného předmětu, respektive detekční plochy kamery, a proto je naším cílem nalézt takovou vzdálenost kamery od zdroje, kde k této situaci dochází. Pro tuto úlohu nebyly využity žádné optické prvky. Zdroj byl umístěn na otočnou platformu, kamera byla umístěna na kolejnici umožňující posun kolmý k ose svazku a pomocí stojánku nastavena tak, aby osa svazku procházela středem snímací plochy. Pro první měření byla kamera umístěna ve vzdálenosti 15 cm od zdroje, následně byla tato vzdálenost zvyšována s krokem 15 cm až na hodnotu 75 cm a poté s krokem 25 cm až po hodnotu 150 cm. Hodnota posunu byla určována pomocí svinovacího metru s přesností 1 mm. V každé z těchto vzdáleností byl zkoumán příčný profil svazku tak, že byl pořízen snímek a následně byla kamera po kolejnici posunuta o 3 cm, aby mezi snímky vznikl překryv, a tento postup byl opakován, dokud bylo možno zaznamenat nějakou úroveň signálu. Expozice snímku byla průběžně měněna s ohledem na aktuální intenzitu záření.

### 2.2.2 Kolimace svazku

Pro další zlepšení homogenity osvětlení zobrazovaných předmětů byla do soustavy zařazena kolimační čočka. Za tímto účelem byla použita čočka LAT075 o průměru 50,8 mm s výrobcem udávanou ohniskovou vzdáleností 75 mm. Měření byla provedena pro celkem tři různé vzdálenosti této čočky od zdroje, konkrétně 50 mm, 75 mm a 100 mm, s cílem nalezení optimální vzdálenosti pro dosažení maximální homogenity svazku. Čočka byla orientována planární stranou ke zdroji. Opět byl zaznamenáván průběh intenzity v závislosti na vzdálenosti od osy svazku a od zdroje. Měření bylo prováděno stejným způsobem a pro stejné vzdálenosti od zdroje jako v předchozí úloze. Sestava pro realizaci této úlohy je zachycena na Obr. 18.



Obr. 18: Sestava pro měření profilu kolimovaného svazku.

### 2.2.3 Ověření údajů o ohniskových vzdálenostech čoček

Cílem této úlohy je ověření údajů výrobce o ohniskových vzdálenostech čoček LAT115 a LAT200, které budou využity pro zobrazování předmětů, a rovněž hodnoty ohniskové vzdálenosti z nich sestaveného dubletu určené na základě výpočtu podle vztahu (1). Kolimační čočka byla, stejně jako pro všechny následující úlohy, umístěna do vzdálenosti 5 cm od zdroje, určené na základě výsledků předchozí úlohy. Zkoumaná čočka byla umístěna do vzdálenosti 100 cm od kolimační čočky, ve které byla na základě předchozí úlohy zjištěna dostatečná homogenita osvětlení. Měření profilu svazku bylo provedeno v několika vzdálenostech detektoru od čočky v okolí předpokládané hodnoty

ohniskové vzdálenosti stejným způsobem jako v předchozích úlohách. V případě čočky LAT115 s předpokládanou ohniskovou vzdáleností 115 mm byla provedena měření v rozmezí vzdáleností 45 mm – 220 mm s krokem 35 mm a pro čočku LAT200 s předpokládanou ohniskovou vzdáleností 200 mm v rozmezí 100 mm – 300 mm s krokem 50 mm. Čočky byly orientovány planární stranou ke zdroji. Pro obě čočky bylo rovněž realizováno měření s jejich opačnou orientací, kde byl profil svazku zkoumán pro tři různé vzdálenosti detektoru od čočky. V případě dubletu byly zkoumány obě možné orientace, tedy větší i menší čočkou směrem ke zdroji. Měření byla provedena ve vzdálenostech 50 mm, 87 mm, 150 mm a dále s krokem 50 mm až do hodnoty 250 mm. Při všech měřeních byly jako clona po stranách čočky umístěny kovové desky, aby bylo zamezeno detekci artefaktů vznikajících difrakcí na kovové objímce čočky.

#### 2.2.4 Studium difrakčních jevů

Při zobrazení pomocí optických prvků, jejichž rozměry jsou pouze o dva řády větší než vlnová délka použitého záření, lze předpokládat, že difrakční jevy, k nimž dochází na těchto prvcích, budou výrazně ovlivňovat výsledné zobrazení. V této úloze byla studována difrakce na svislé štěrbině vytvořené umístěním dvou kovových desek blízko sebe v ose svazku ve vzdálenosti 30 cm od kolimační čočky. Měření byla provedena pro šířku štěrbin 10,5 mm a 15,0 mm. Šířka štěrbin byla určena s pomocí posuvného měřidla s přesností 0,1 mm. V obou případech byl zaznamenán intenzitní průběh ve vzdálenostech kamery 100 cm a 150 cm od štěrbin stejným způsobem, který byl popsán u předchozích úloh. Vzhledem k očekávané nižší úrovni signálu nebyly zaznamenávány jednotlivé snímky, ale každý snímek vznikl sečtením čtyř dílčích snímků.

Pro posouzení, zda uvažovat Fresnelovu nebo Fraunhoferovu difrakci, je klíčová hodnota Fresnelova čísla  $N_F$ , které můžeme podle [34] určit na základě vztahu (2).

$$N_F = \frac{b^2}{\lambda z}, \quad (2)$$

kde  $b$  je šířka štěrbin,  $\lambda$  vlnová délka záření a  $z$  vzdálenost roviny detektoru od štěrbin. V případě našeho měření nabývá  $N_F$  maximální hodnoty 0,04 pro případ štěrbin o šířce 10,5 mm a vzdálenost detektoru 100 cm od štěrbin. Protože platí  $N_F \ll 1$ , lze uvažovat Fraunhoferovu difrakci. Očekávaný průběh intenzity v závislosti na příčné vzdálenosti  $x$  od osy štěrbin podle [34] odpovídá druhé mocnině amplitudy  $A$  rovinné vlny v tomto místě prostoru, kterou je možno nalézt jako řešení příslušného difrakčního integrálu, viz vztah (3).

$$A = b \cdot \text{sinc}\left(\frac{\pi b x}{\lambda z}\right). \quad (3)$$

Získaná data byla porovnána s teoretickým průběhem intenzity podle vztahu (3). Sestava použitá pro studium difrakce je zachycena na Obr. 19.



Obr. 19: Sestava pro studium difrakce.

### 2.2.5 Detekce a zobrazení předmětů v transmisním režimu

Při průchodu záření materiálem dochází k jeho útlumu, přičemž u kovových předmětů lze očekávat výraznější útlum než v případě jiných materiálů. Tohoto jevu je možno využít k detekci předmětů ukrytých v jiném materiálu. Pro realizaci úlohy bylo zvoleno šest testovacích předmětů: nerezové kolečko o průměru 38 mm a tloušťce 3 mm, proužek hliníkového plechu tloušťky 0,3 mm o šířce 12 mm, podložky o vnějším průměru 15 mm, resp. 14 mm, vnitřním průměru 5 mm, resp. 10 mm a tloušťce 5 mm, resp. 2 mm a hřebíky o délce 24 mm, resp. 15 mm, průměru 2 mm, resp. 1 mm a průměru hlavičky 5 mm, resp. 2 mm. Testovací předměty jsou zachyceny na Obr. 20.



Obr. 20: Testovací předměty, zleva: nerezové kolečko, proužek hliníkového plechu, podložka o vnějším průměru 15 mm, podložka o vnějším průměru 14 mm, hřebík o délce 24 mm, hřebík o délce 15 mm.



Nejprve bylo zkoumáno zobrazení bez využití optických prvků. Předměty byly lepicí páskou přichyceny k listu papíru, ten následně uchycen do stojánku a umístěn tak, aby se dotýkal detekční plochy detektoru. Detektor se zkoumanými předměty byl umístěn do vzdálenosti 100 cm od kolimační čočky. Byl zaznamenán snímek. Dále byla zvětšována vzdálenost předmětů od detektoru do hodnoty 5 cm s krokem 1 cm, dále pak na 7,5 cm, 10 cm a s krokem 5 cm až po 25 cm. Byl sledován vliv vzdálenosti od detektoru na detekovatelnost předmětu, velikost a tvar obrazu. Rovněž byla ověřována možnost detekce těchto předmětů v případě jejich umístění uvnitř materiálu, v našem případě za zadní deskou obrazu tvořenou sololitem o tloušťce 2 mm.

Dále bylo testováno zobrazení předmětů s využitím optických prvků. Stojánek s předměty byl umístěn do vzdálenosti 100 cm od kolimační čočky. Mezi předmět a kameru byl umístěn dublet tak aby byly splněny podmínky pro zobrazení optickou soustavou. Vzdálenosti jednotlivých prvků byly určeny s využitím postupu popsáno v [33] následovně, viz vztahy (4 – 7). Nejprve byly nalezeny polohy hlavních rovin  $a_{1h}$  a  $a_{2h}$  obou čoček dubletu na základě vztahu:

$$a_{1h} = \frac{f_1 d}{d - f_1 - f_2}. \quad (4)$$

Analogicky bylo postupováno i v případě druhé čočky. Vzdálenost předmětu od bližší čočky byla označena  $a_1$ . Dále byla zavedena vzdálenost  $a$ , pro niž platí:

$$a = a_1 - a_{1h}. \quad (5)$$

Následně byla na základě Gaussovy zobrazovací rovnice s využitím ohniskové vzdálenosti vypočtené na základě vztahu (1) určena poloha obrazu  $a'$  jako:

$$a' = \frac{af}{a-f}. \quad (6)$$

Pro vzdálenost obrazu  $a_2$  od druhé čočky pak platí vztah:

$$a_2 = a' + a_{2h}. \quad (7)$$

Zvětšení  $Z$  této optické soustavy pak bylo určeno na základě vztahu (8).

$$Z = \frac{-f}{a-f}. \quad (8)$$

Pro naše měření se jeví jako vhodnější použít za volený parametr soustavy hodnotu zvětšení. Vzdálenosti předmětu a kamery od dubletu pak lze určit na základě výše uvedených vztahů. Vzhledem k vlnové délce použitého záření lze očekávat výrazné ovlivnění získaného obrazu difrakcí na optických prvcích. Rozlišení soustavy  $\Delta x$  je možno určit na základě vztahu (9):

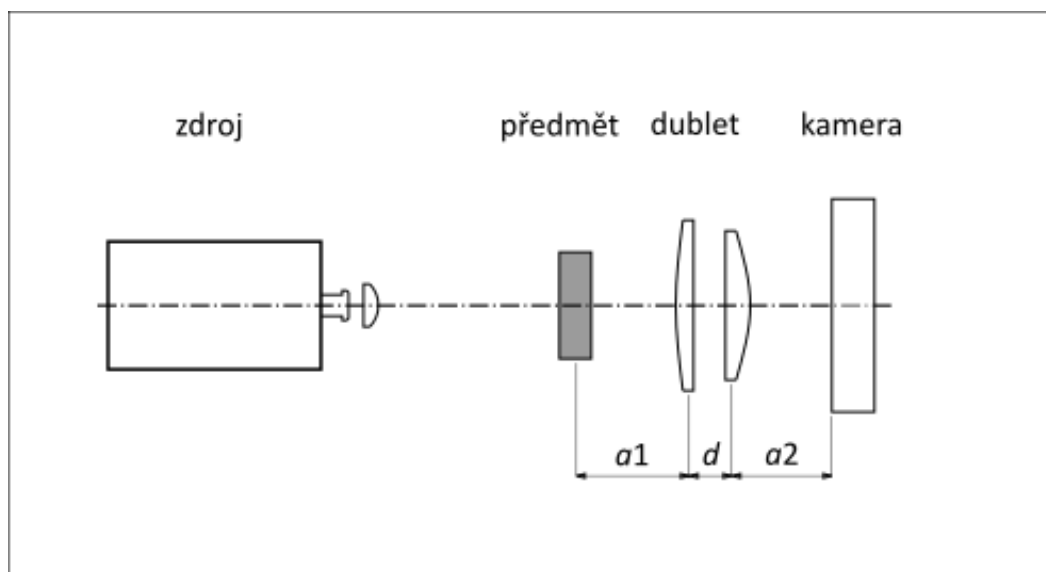
$$\Delta x = \frac{1,22\lambda}{D} \cdot a_1, \quad (9)$$

kde  $D$  je průměr menší z čoček dubletu. Vypočtené rozměrové parametry soustavy pro vybraná zvětšení a příslušné hodnoty rozlišení jsou uvedeny v Tab. 2. Zobrazená plocha je čtverec o délce strany rovné podílu délky strany snímáče a aktuálního zvětšení.

Tab. 2: Vypočtené parametry soustavy pro dané hodnoty zvětšení.

| Z    | $a_1$ [mm] | $a_2$ [mm] | $\Delta x$ [mm] |
|------|------------|------------|-----------------|
| -0,1 | 933,0      | 57,7       | 33,4            |
| -0,5 | 238,7      | 92,4       | 8,5             |
| -1   | 151,9      | 135,8      | 5,4             |
| -1,5 | 123,0      | 179,2      | 4,4             |
| -2   | 108,5      | 222,6      | 3,9             |
| -2,5 | 99,8       | 266,0      | 3,6             |
| -3   | 94,0       | 309,4      | 3,4             |
| -3,5 | 89,9       | 352,8      | 3,2             |
| -4   | 86,8       | 396,2      | 3,1             |
| -4,5 | 84,4       | 439,6      | 3,0             |
| -5   | 82,4       | 483,0      | 3,0             |
| -5,5 | 80,9       | 526,4      | 2,9             |
| -6   | 79,6       | 569,8      | 2,8             |

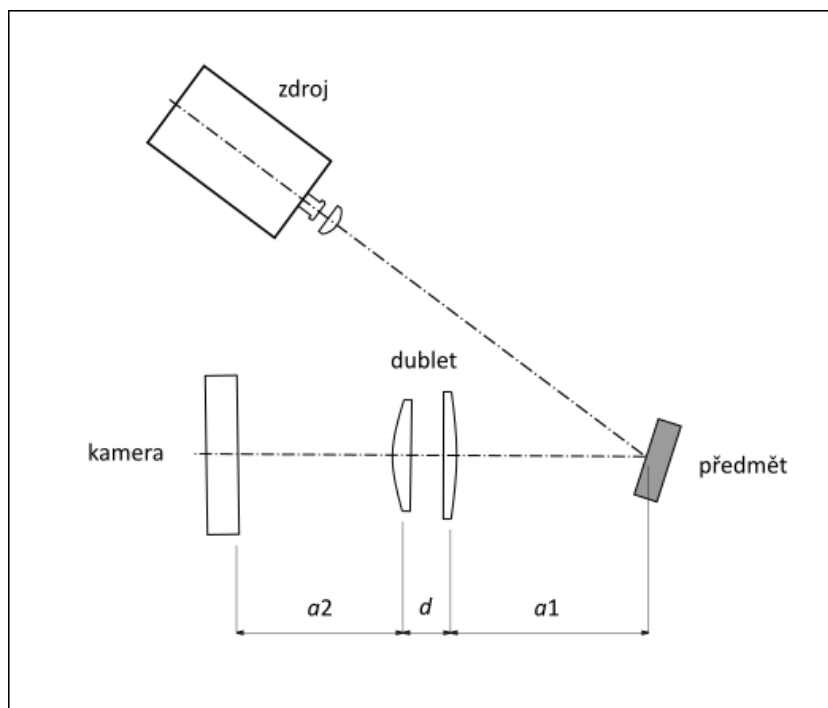
Pro různé varianty nastavení zobrazovací soustavy byla zkoumána detekovatelnost předmětů a vliv těchto nastavení na kvalitu získaného obrazu. Schéma soustavy pro zobrazení s využitím optických prvků v transmisním režimu je ukázáno na Obr. 21.



Obr. 21: Sestava pro zobrazení v transmisním režimu.

### 2.2.6 Detekce a zobrazení předmětů s využitím odrazu

V případě detekce a zobrazení některých předmětů se jeví jako výhodnější využití metody odrazu, kdy je předmět nasvícen svazkem ze zdroje a odražené záření je pomocí optických prvků dovedeno na detekční plochu kamery, kde je vytvořen obraz předmětu. Předmět uchycený na stojánku byl opět umístěn do vzdálenosti 100 cm od kolimační čočky, aby osvětlení bylo dostatečně homogenní. Optické prvky a kamera byly umístěny tak, aby předmět ležel v ose optické soustavy. Rozměrové parametry soustavy byly stanoveny stejným způsobem jako v předchozí úloze. Schéma soustavy pro zobrazení s využitím odrazu je ukázáno na Obr. 22.



Obr. 22: Sestava pro zobrazení s využitím odrazu.

Nejprve bylo provedeno ověření zobrazení soustavou. Za testovací předmět bylo zvoleno nerezové kolečko z předchozí úlohy. Rozměrové parametry soustavy byly nastaveny na základě hodnot z Tab. 2. Pro jednotlivá nastavení byl vždy zaznamenán snímek předmětu, z něj byla odečtena hodnota průměru obrazu kolečka a vypočtena skutečná hodnota zvětšení. Snímky v tomto případě byly zaznamenány ve falešných barvách, protože zpracování obrazu nebylo provedeno softwarově, ale odečtením příslušných rozměrů pomocí kurzoru na obrazovce.

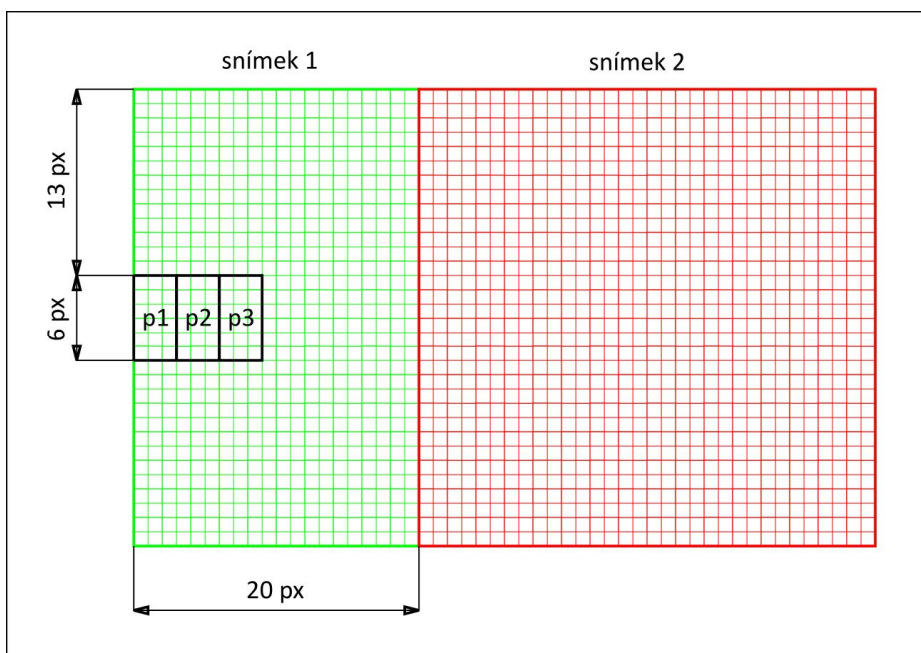
Dále byla zkoumána odrazivost různých materiálů, konkrétně výše zmíněného lesklého nerezového kolečka, černě eloxované ocelové desky, alobalu umístěného za list silného papíru a dřevěné desky. V této úloze byla sestava nastavena do konfigurace pro zvětšení  $Z = -0,1$ , příslušný materiál byl orientován tak, aby kamera ležela v ose odraženého svazku. Cílem bylo porovnání intenzity záření odraženého od těchto materiálů.

Následně bylo testováno zobrazení dalších předmětů pro různé parametry zobrazovací soustavy s cílem zhodnocení jejich detekovatelnosti a kvality zobrazení.

### 2.3 Metodika zpracování dat

Tato kapitola se zabývá způsobem zpracování a analýzy získaného obrazu. Jednotlivé snímky záznamu svazku byly zpracovány pomocí softwaru Octave následujícím způsobem. Po načtení snímků byla provedena korekce na expoziční dobu, tedy všechny hodnoty v získaném intenzitním poli byly vyděleny hodnotou relativního zesílení odpovídajícího této hodnotě expozice podle Tab. 1. Protože lze předpokládat rotační symetrii svazku, bylo cílem získání profilu svazku pouze ve vodorovné rovině, které se jeví jako technicky jednodušší. Z každého snímku byl vybrán pás prostředních 6 pixelů (čísla 14 – 19). Dále byly snímky složeny dohromady, posunutí kamery o 3 cm odpovídá délce překryvu snímků 1,8 cm, tedy 12 pixelů. Z každého snímku byly tedy použity pixely číslo 1 – 20 vyjma posledního snímku, který byl využit v plném rozsahu 32 pixelů. Pro eliminaci náhodných fluktuací byly vždy hodnoty intenzity v šesti pixelech téhož sloupce sečteny a pro vyhlazení průběhu profilu byly rovněž sečteny hodnoty ve třech sousedních sloupcích, takto získané hodnoty intenzity odpovídají jednotlivým bodům  $p_1, p_2, \dots$  ve

výsledném grafu, který zobrazuje závislost intenzity záření na vzdálenosti od osy svazku. Tento postup je znázorněn na Obr. 23.



Obr. 23: Způsob skládání snímků a získání hodnot intenzitního profilu.

Vzorový skript realizující výše popsany postup je ukázán na Obr. 24.

```

1 #načtení a korekce na expozici
2 pic1=double(imread('picture1.png'));
3 pic2=double(imread('picture2.png'))./5.2;
4 pic3=double(imread('picture3.png'))./22;
5
6 #vybrání příslušných pixelů
7 a=pic1(14:19,1:20);
8 b=pic2(14:19,1:20);
9 c=pic3(14:19,:);
10
11 M=[a b c]; #složení
12
13 p=[]; #hodnoty intenzity
14 r=0; #pomocná proměnná
15
16 #sčítání hodnot v rámci sloupce
17 #a tři sousedních sloupců
18 for i=1:72
19     x=sum(M(1:6,i));
20     r+=x;
21     if mod(i,3)==0
22         p=[p r];
23         r=0;
24     end;
25 end;
26
27 X=-24:4.5:84; #hodnoty osa x
28 plot(X,p)#vykreslení grafu

```

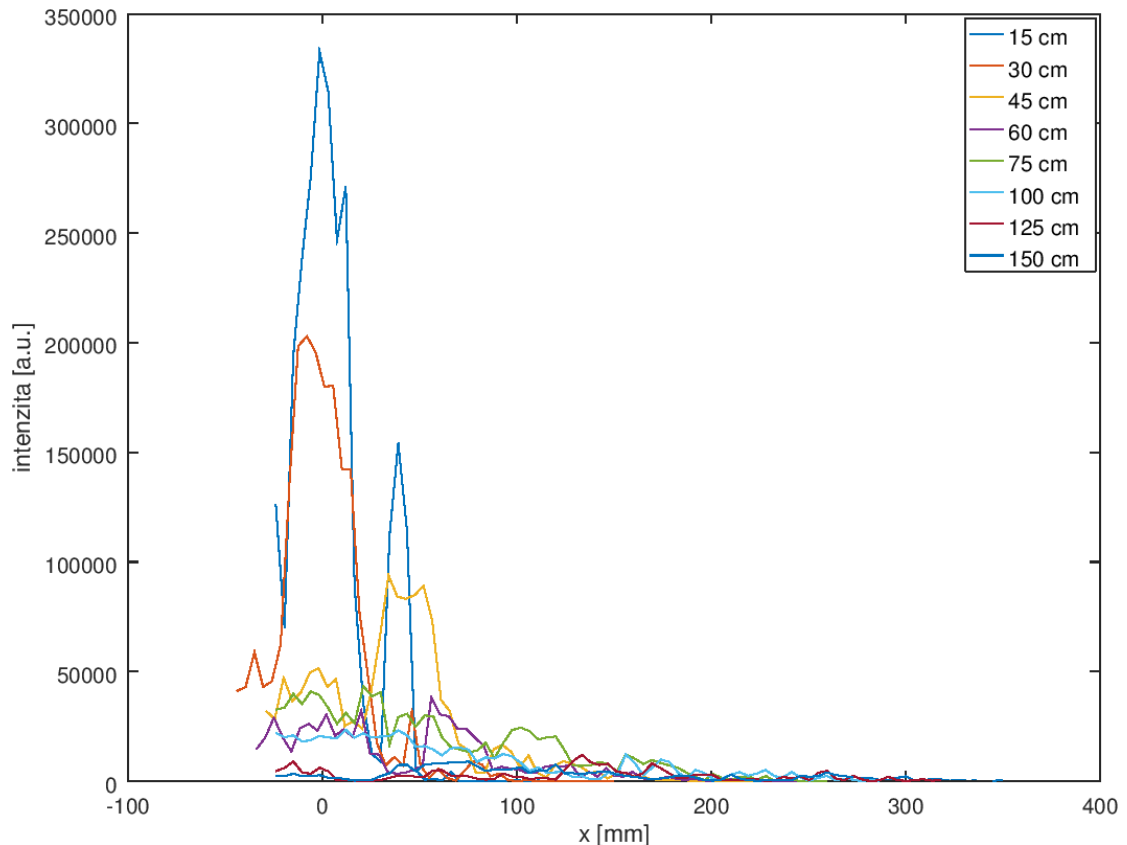
Obr. 24: Vzorový skript pro vyhodnocení intenzitního profilu.

Pro odečet velikosti obrazu předmětů z výsledného snímku byl použit vlastní skript v jazyce C#, kde byla nejprve provedena kalibrace na základě rozměru detekční plochy kamery a následně odečítány souřadnice požadovaných bodů na snímku. Určení průměru obrazu kolečka v rámci úlohy týkající se zobrazení s využitím odrazu, jehož obraz byl ve většině případů větší než detekční plocha kamery, bylo provedeno v programu Inkscape za použití nástroje kružnice.

## 3. Výsledky a diskuse

### 3.1 Charakterizace neupraveného svazku

Nejprve bylo provedeno měření intenzitního profilu svazku samotného zdroje. Postup je popsán v kapitole 2.2.1, získané snímky byly následně zpracovány postupem popsaným v kapitole 2.3. Výsledky jsou zobrazeny v grafu na Obr. 25. Na vodorovné ose je vynesena vzdálenost od osy svazku, na svislé ose intenzita záření. Jednotlivé položky legendy představují jednotlivé vzdálenosti, ve kterých byl profil zaznamenáván.

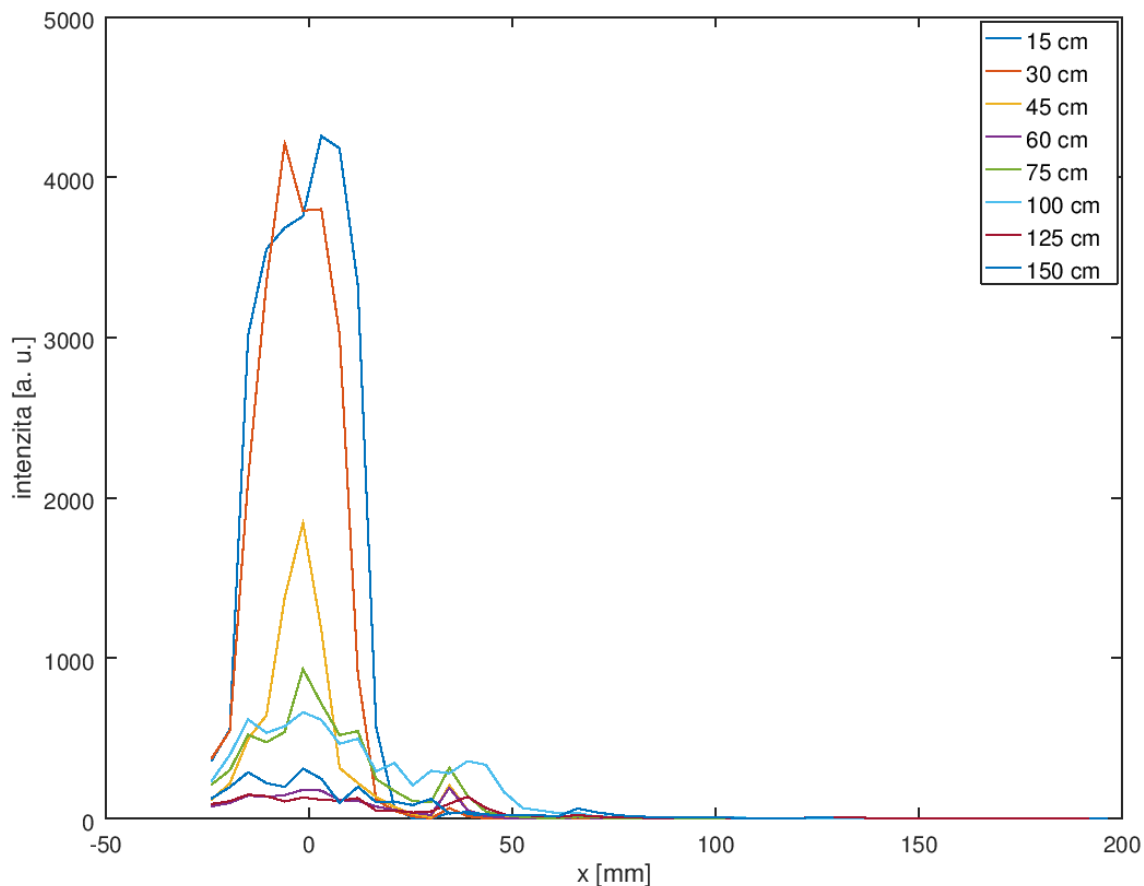


Obr. 25: Příčný intenzitní průběh nekolimovaného svazku v různých vzdálenostech od zdroje.

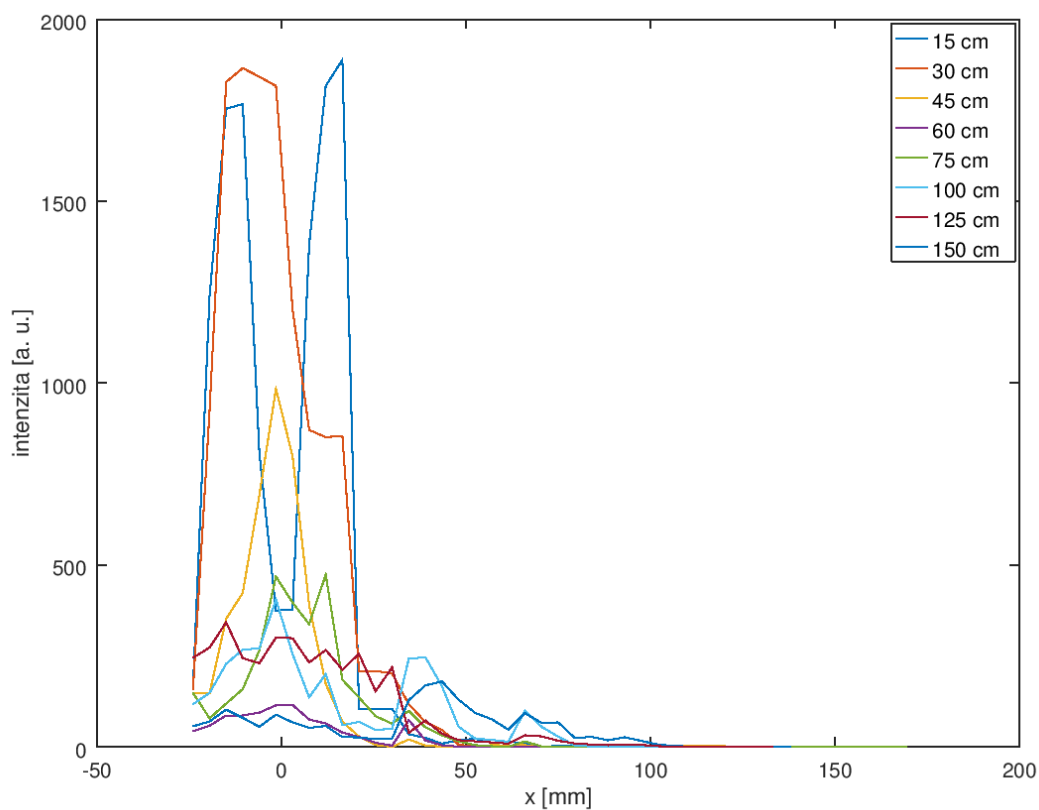
Získaný intenzitní profil navzdory sčítání hodnot z více pixelů vykazuje velké lokální výkyvy v hodnotách intenzity. Vyjma drobných odchylek jsou patrné i výraznější propady a peaky, které v malých vzdálenostech od zdroje mohou být způsobeny tvarem kovového nástavce antény, jenž slouží ke kolimaci svazku a má podobu dutého válce, ve větších vzdálenostech naopak mohou být způsobeny interferencí se zářením odraženým od pracovní plochy a předmětů v okolí měřicí aparatury. Svazek má alespoň pro malé vzdálenosti od zdroje profil připomínající Gaussovský. Divergenci svazku nelze na základě získaných dat stanovit, většina získaných průběhů intenzity neobsahuje žádný výrazný jasně ohraničený centrální peak, jenž by bylo možno považovat za šířku svazku v dané vzdálenosti. Jako vzdálenost s vyhovující homogenitou intenzity v oblasti srovnatelné s velikostí detekční plochy kamery se jeví hodnota 100 cm.

### 3.2 Kolimace svazku

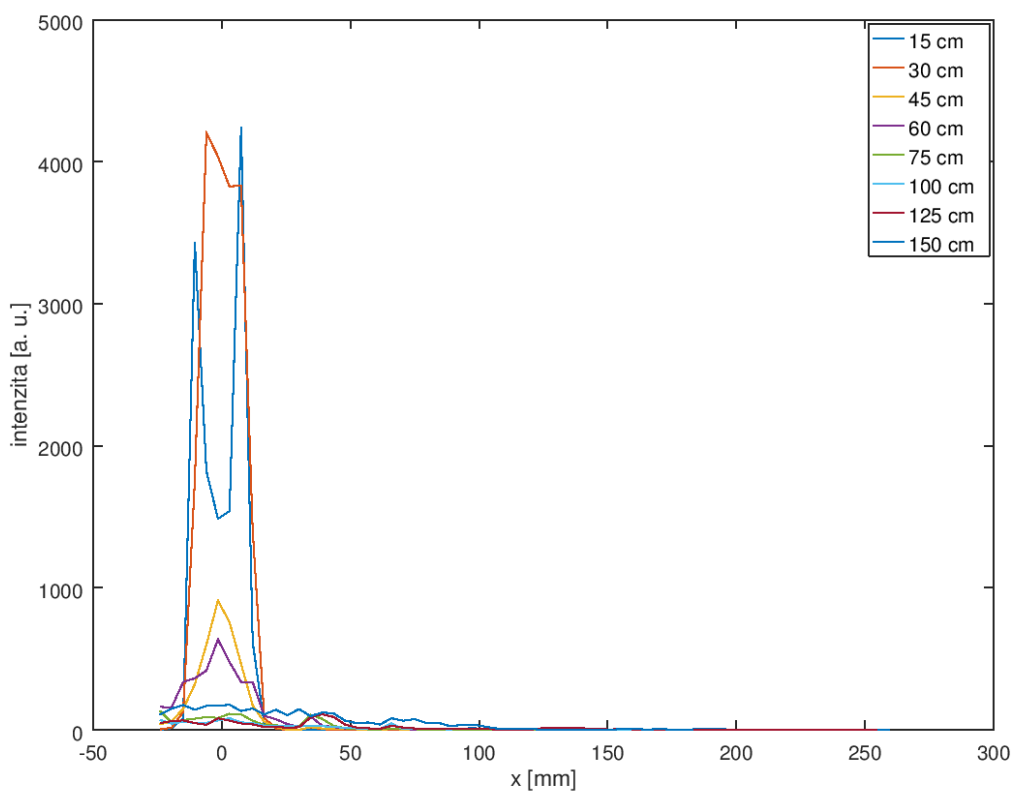
Dále byla testována kolimace svazku s využitím kolimační čočky LAT75. Postup realizace úlohy je popsán v kapitole 2.2.2. Měření bylo provedeno pro vzdálenosti 50 mm, 75 mm a 100 mm čočky od zdroje, čočka byla orientována planární stranou ke zdroji. Získané intenzitní profily jsou zachyceny v grafech na Obr. 26 až Obr. 28, jednotlivé položky legendy opět představují vzdálenost detektoru od kolimační čočky.



Obr. 26: Příčný intenzitní průběh svazku s kolimační čočkou ve vzdálenosti 5 cm od zdroje pro různé vzdálenosti detektoru od kolimační čočky.



Obr. 27: Příčný intenzitní průběh svazku s kolimační čočkou ve vzdálenosti 7,5 cm od zdroje pro různé vzdálenosti detektoru od kolimační čočky.



Obr. 28: Příčný intenzitní průběh svazku s kolimační čočkou ve vzdálenosti 10 cm od zdroje pro různé vzdálenosti detektoru od kolimační čočky.

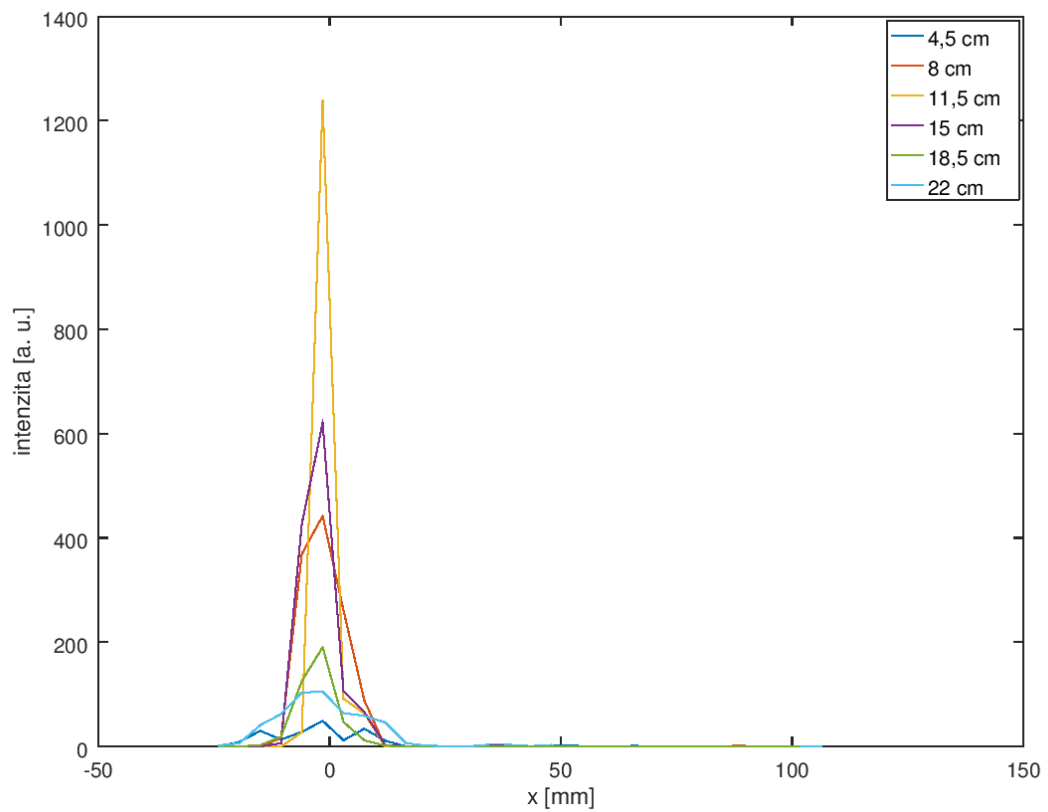


Po zařazení kolimační čočky je patrná výrazná změna charakteru svazku, který nabyl podoby ostře ohraničené oblasti s intenzitou výrazně vyšší oproti okolí, přičemž rozměr této oblasti přibližně odpovídá průměru 50,8 mm použité kolimační čočky. Toto se jeví pro další úlohy jako vyhovující, protože lze homogenně osvětlit celou detekční plochu kamery představovanou čtvercem o straně 48 mm. Na základě získaných dat lze za nejvhodnější pro další aplikace považovat vzdálenost kolimační čočky od zdroje 5 cm, která poskytuje nejplynulejší průběh intenzity. U větších vzdálenosti bylo zaznamenáno lokální minimum intenzity ve středu svazku, které je pravděpodobně způsobeno tvarem kovového nástavce antény. Jako dostačující hodnota vzdálenosti od zdroje, ve které již nedochází k výraznějším změnám intenzity v rozsahu detekční plochy, se opět jeví 100 cm, a tato hodnota byla používána pro následující úlohy.

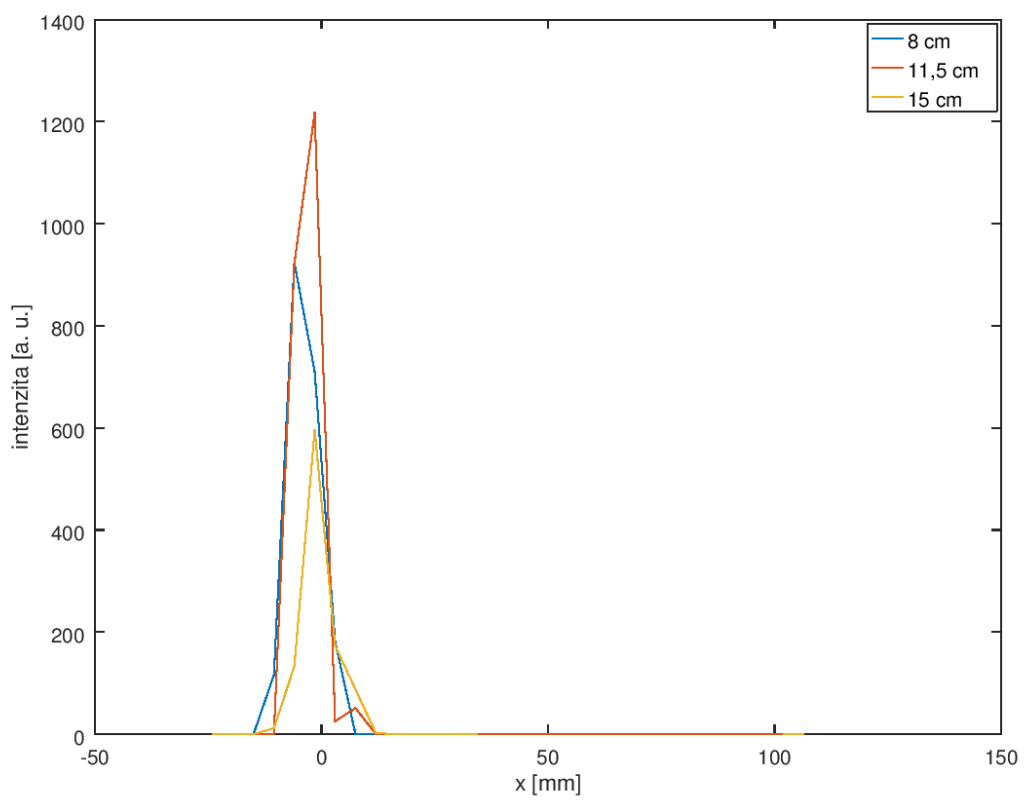
V souvislosti s grafy výše je vhodné upozornit na jev, který vzniká v důsledku možnosti volby pouze pevně daných hodnot expozice. Při všech měřeních bylo snahou nastavit expoziční dobu tak, aby nedocházelo k saturaci detektoru. U některých měření to však mělo za následek velmi nízkou úroveň detekovaného signálu, až do té míry, že některé poměrně výrazně nenulové hodnoty mohly být vyhodnoceny jako nulové. Tento efekt je znásoben sečtením hodnot z většího množství pixelů, což v konečném důsledku vyvolává nepoměr mezi hodnotami intenzity v různých vzdálenostech od zdroje. Například v grafu na Obr. 26 je intenzita signálu ve vzdálenosti 60 cm srovnatelná se vzdáleností 125 cm, což zjevně neodpovídá realitě. Pro odstranění tohoto nedostatku by bylo žádoucí volit délku expozice mezi nabízenými hodnotami, nicméně cílem úlohy je získání informace o homogenitě svazku v rámci jednotlivých vzdáleností a skutečná hodnota intenzity není zásadní.

### **3.3 Ověření údajů o ohniskových vzdálenostech čoček**

Dále bylo provedeno ověření údajů o ohniskových vzdálenostech čoček LAT115 a LAT200 a z nich sestaveného dubletu, jehož ohnisková vzdálenost byla vypočtena na základě vztahu (1). Postup provedení úlohy je popsán v kapitole 2.2.3. Měření byla provedena pro obě možné orientace čoček i dubletu. Čočky byly umístěny do vzdálenosti 100 cm od kolimační čočky. Výsledky pro čočku LAT115 jsou zachyceny v grafech na Obr. 29 a Obr. 30.



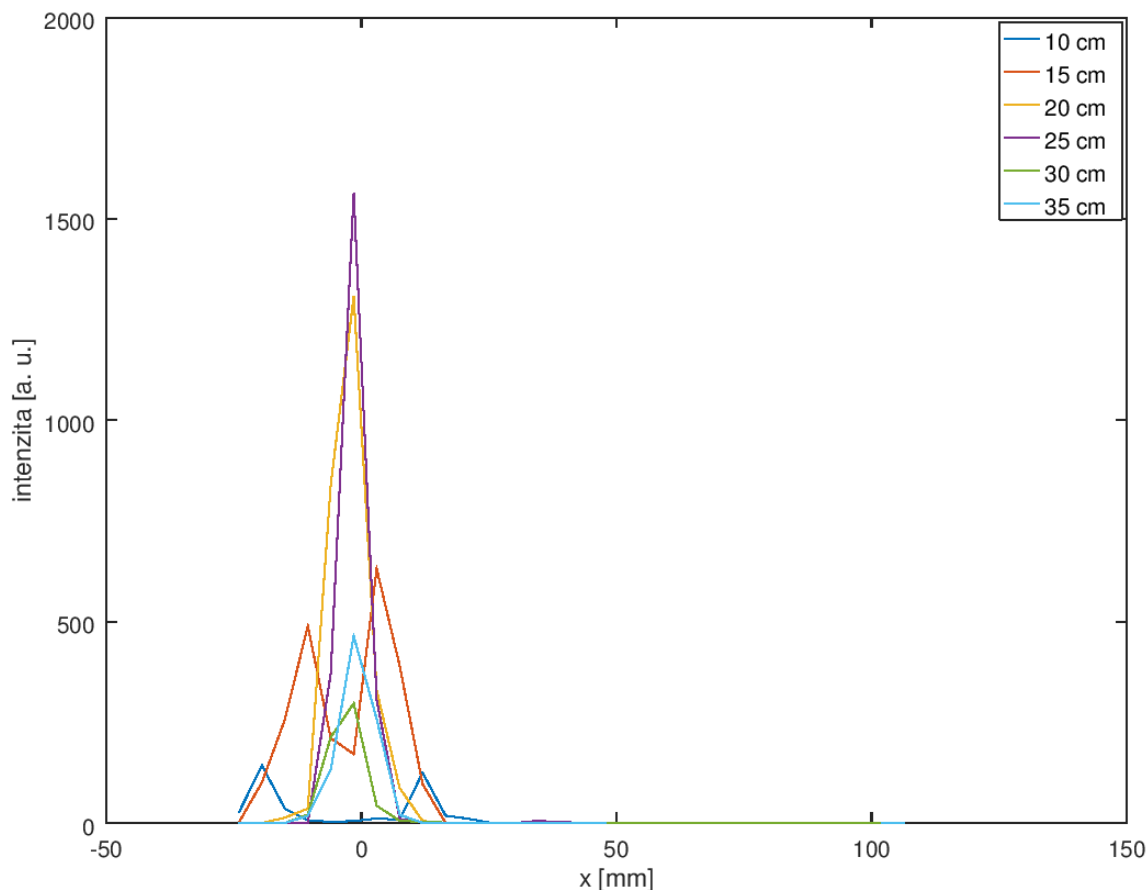
Obr. 29: Příčný intenzitní průběh svazku pro čočku LAT115 orientovanou planární stranou ke zdroji pro různé vzdálenosti detektoru od čočky.



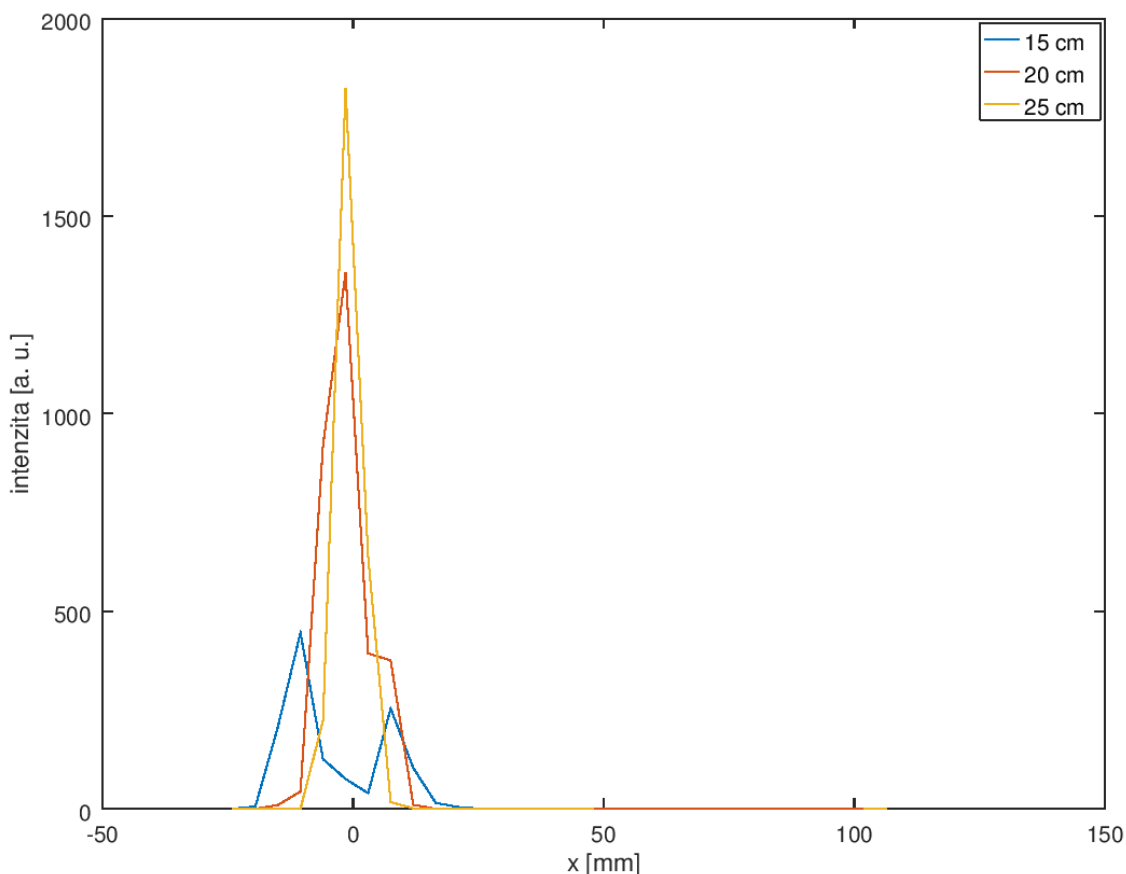
Obr. 30: Příčný intenzitní průběh svazku pro čočku LAT115 orientovanou vypuklou stranou ke zdroji pro různé vzdálenosti detektoru od čočky.

Získané průběhy intenzity ukazují její maximum pro vzdálenost 11,5 cm, tedy výrobcem udávanou hodnotu ohniskové vzdálenosti. Tento údaj lze tedy považovat za ověřený. Mezi jednotlivými orientacemi čočky nejsou v intenzitním profilu patrné výraznější rozdíly, ani co do hodnoty ohniskové vzdálenosti, ani závislosti profilu svazku na vzdálenosti od čočky. Pro použití v následujících úlohách tedy orientace čočky nemá zásadnější význam.

Výsledky pro čočku LAT200 jsou zachyceny na v grafech na Obr. 31 a Obr. 32.



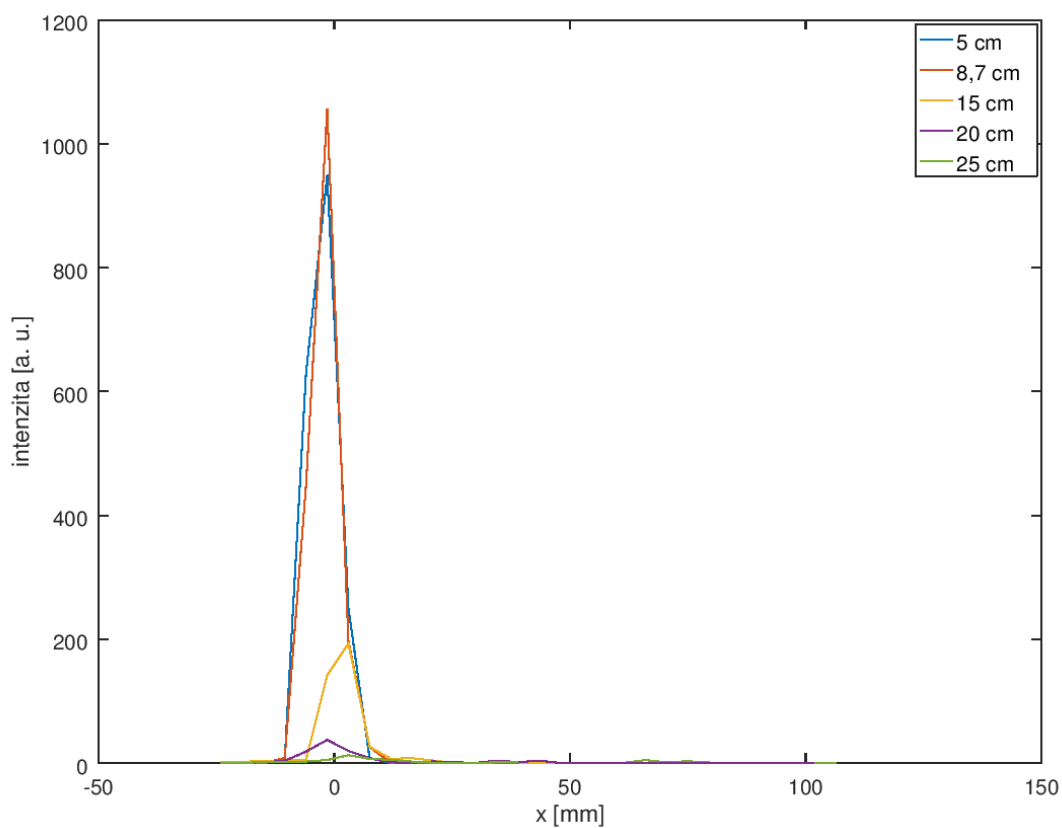
Obr. 31: Příčný intenzitní průběh svazku pro čočku LAT200 orientovanou planární stranou ke zdroji pro různé vzdálenosti detektoru od čočky.



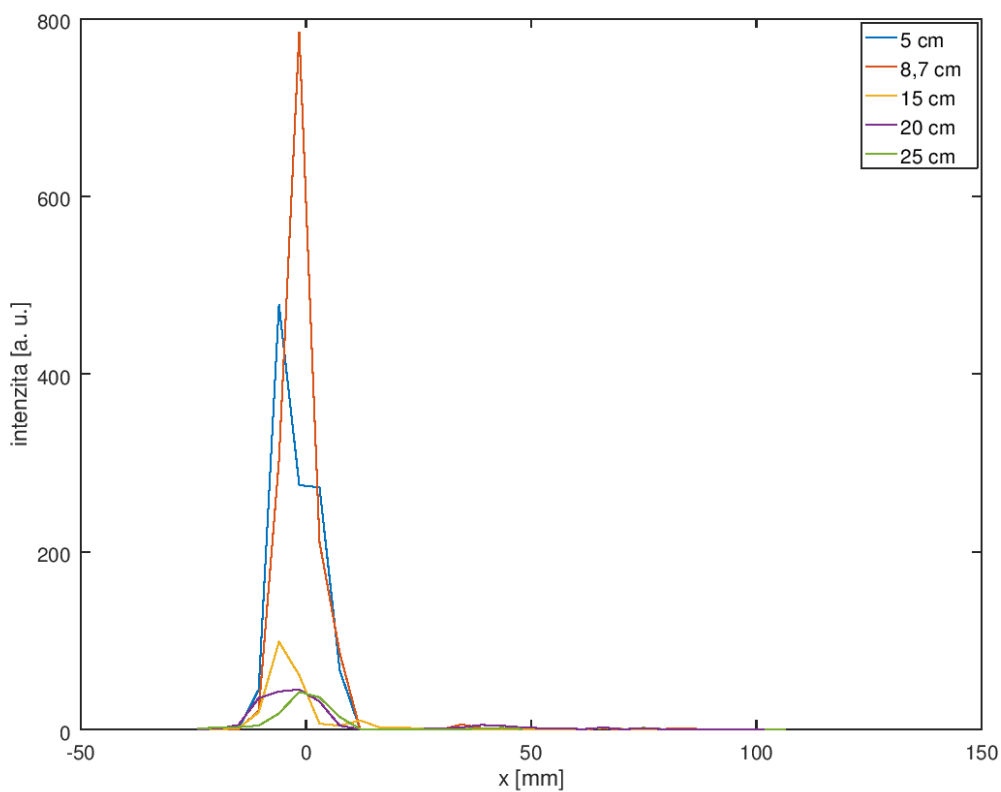
Obr. 32: Příčný intenzitní průběh svazku pro čočku LAT200 orientovanou vypuklou stranou ke zdroji pro různé vzdálenosti detektoru od čočky.

V tomto případě vychází pro obě orientace čočky maximální hodnota intenzity ve vzdálenosti 25 cm od čočky. Nicméně ve vzdálenosti odpovídající hodnotě výrobcem udávané ohniskové vzdálenosti 200 mm je šířka svazku srovnatelná, a vzhledem k možným odchylkám v hodnotě intenzity jako takové, způsobené volbou expoziční doby, viz výše, lze konstatovat, že hodnota ohniskové vzdálenosti se zásadněji neodchyluje od údaje výrobce. Čočka navíc sama o sobě má určitou tloušťku a není zcela zjevné, odkud vzdálenost odměřovat. V tomto případě bylo měřeno od těžiště čočky.

Pro dublet sestavený z těchto čoček byla za předpokladu ohniskových vzdáleností udávaných výrobcem určena na základě vztahu (1) hodnota ohniskové vzdálenosti 87 mm. Výsledky měření pro obě jeho možné orientace jsou zachyceny v grafech na Obr. 33 a Obr. 34.



Obr. 33: Příčný intenzitní průběh svazku pro dublet orientovaný čočkou LAT115 ke zdroji pro různé vzdálenosti detektoru od druhé čočky dubletu.

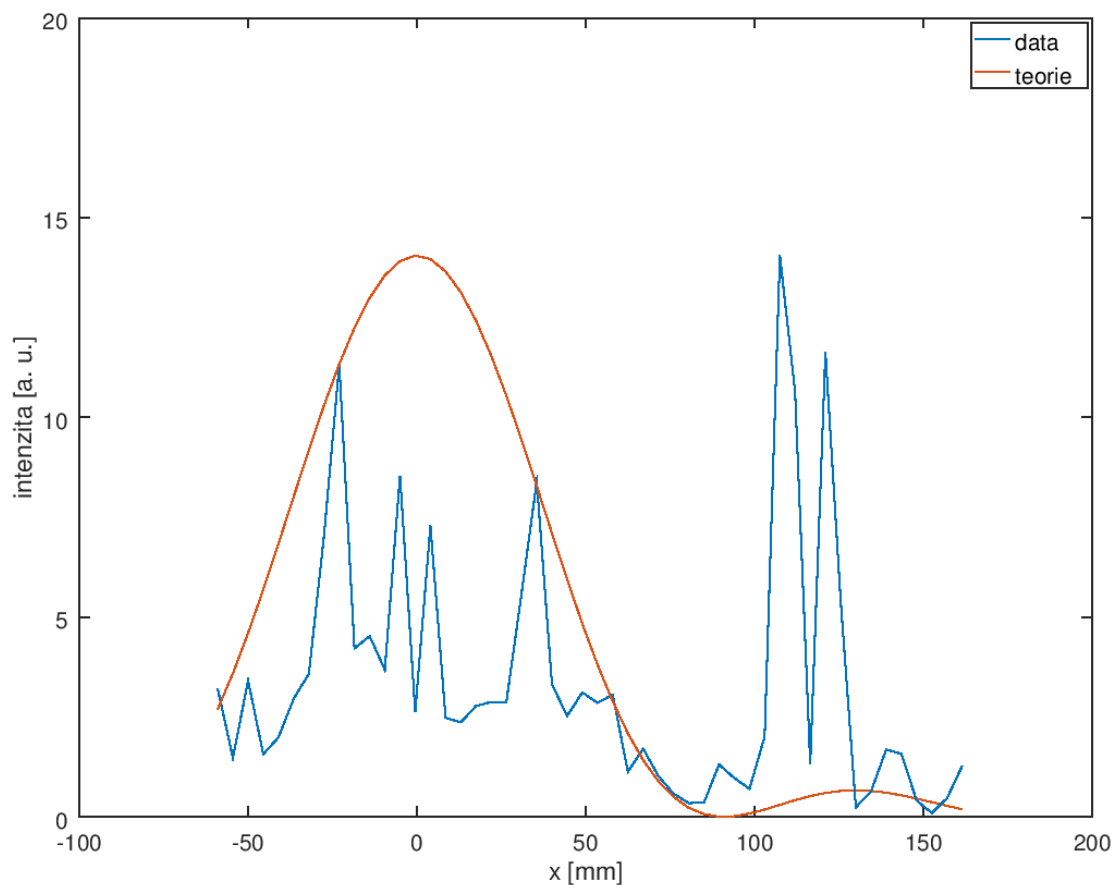


Obr. 34: Příčný intenzitní průběh svazku pro dublet orientovaný čočkou LAT200 ke zdroji pro různé vzdálenosti detektoru od druhé čočky dubletu.

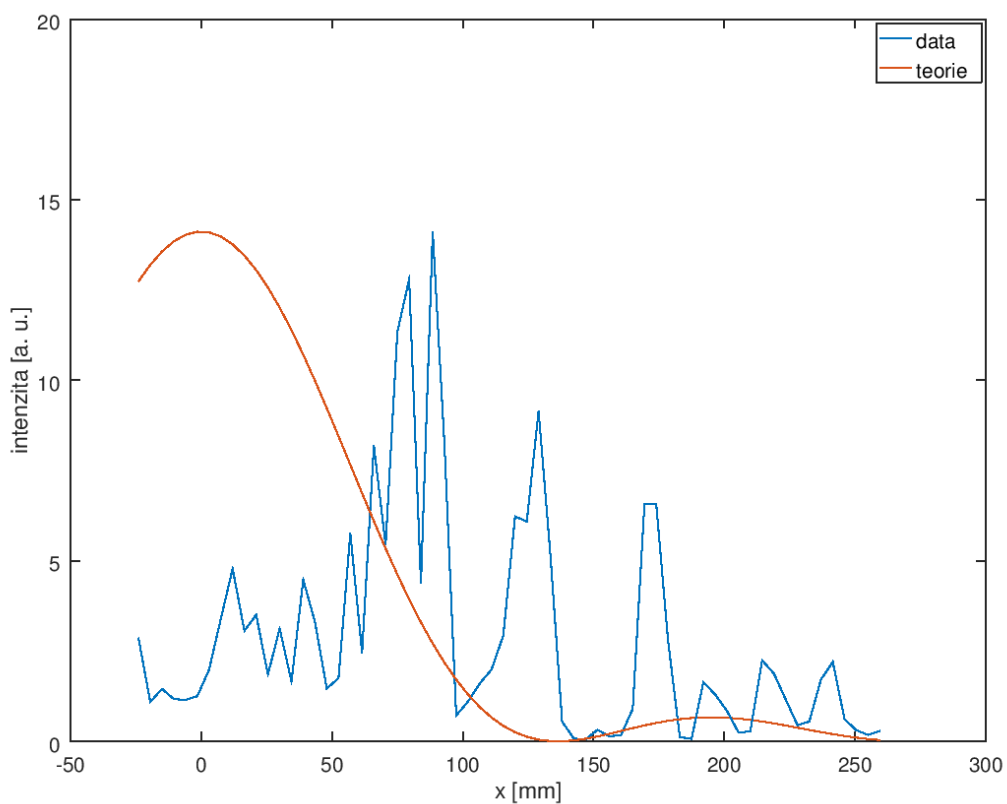
Příčný intenzitní profil po fokusaci svazku pomocí dubletu oproti jednotlivým čočkám vykazuje větší pokles intenzity s rostoucí vzdáleností od ohniska, což je v souladu s kratší ohniskovou vzdáleností dubletu oproti jednotlivým čočkám. Pro obě orientace dubletu byla naměřena největší intenzita záření a nejužší svazek pro vzdálenost detektoru 87 mm od bližší čočky dubletu, vypočtenou hodnotu ohniskové vzdálenosti tedy lze považovat za správnou a použít ji pro výpočty v dalších úlohách. V případě čočky LAT200 blíže ke zdroji vykazuje profil výraznější pokles intenzity i pro vzdálenost detektoru menší než ohnisková vzdálenost a tato konfigurace rovněž umožňuje zobrazení většího předmětu v transmisním režimu, aniž by byla zastíněna celá plocha čočky, a proto byla pro další úlohy zvolena tato konfigurace.

### 3.4 Studium difrakčních jevů

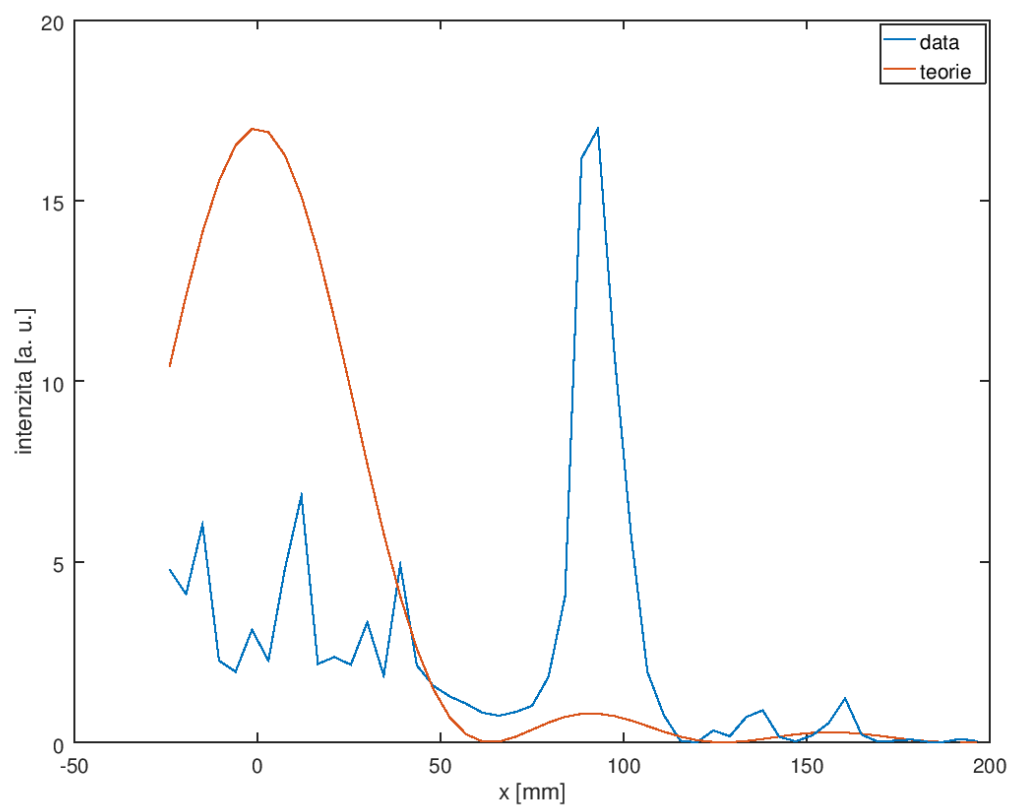
Dále byly zkoumány difrakční jevy, konkrétně difrakce na štěrbině. Měření byla provedena pro šířku štěrbinu 10,5 mm a 15,0 mm, pro obě šířky byl zaznamenán příčný průběh intenzity ve vzdálenostech 100 cm a 150 cm od štěrbinu. Postup je popsán v kapitole 2.2.4. Spolu se získanými daty byl do grafu vynesena rovněž teoretický průběh intenzity podle vztahu (3). Výsledky pro štěrbinu o šířce 10,5 mm jsou zachyceny v grafech na Obr. 35 a Obr. 36, pro štěrbinu o šířce 15,0 mm pak na Obr. 37 a Obr. 38.



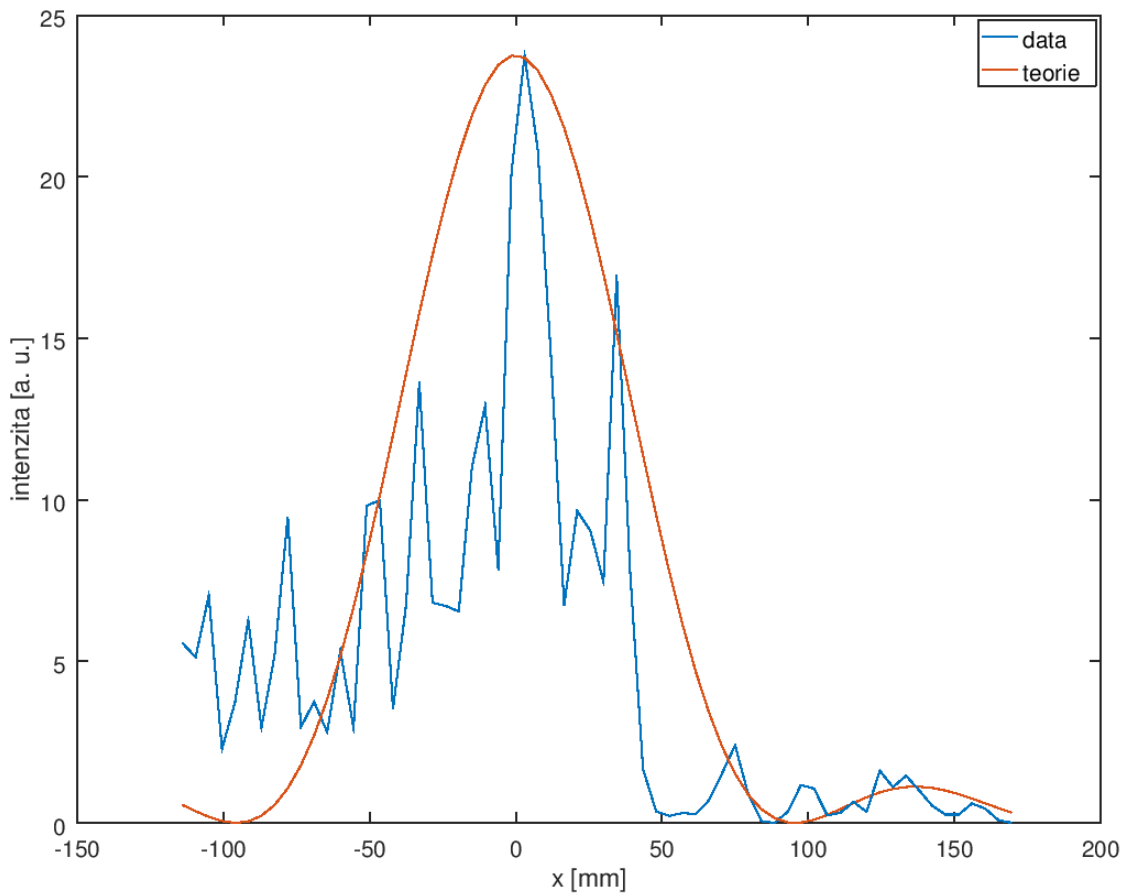
Obr. 35: Naměřený a teoretický příčný intenzitní průběh svazku pro štěrbinu o šířce 10,5 mm ve vzdálenosti 100 cm od štěrbinu.



Obr. 36: Naměřený a teoretický příčný intenzitní průběh svazku pro šěrbinu o šířce 10,5 mm ve vzdálenosti 150 cm od šěrbinu.



Obr. 37: Naměřený a teoretický příčný intenzitní průběh svazku pro šěrbinu o šířce 15,0 mm ve vzdálenosti 100 cm od šěrbinu.



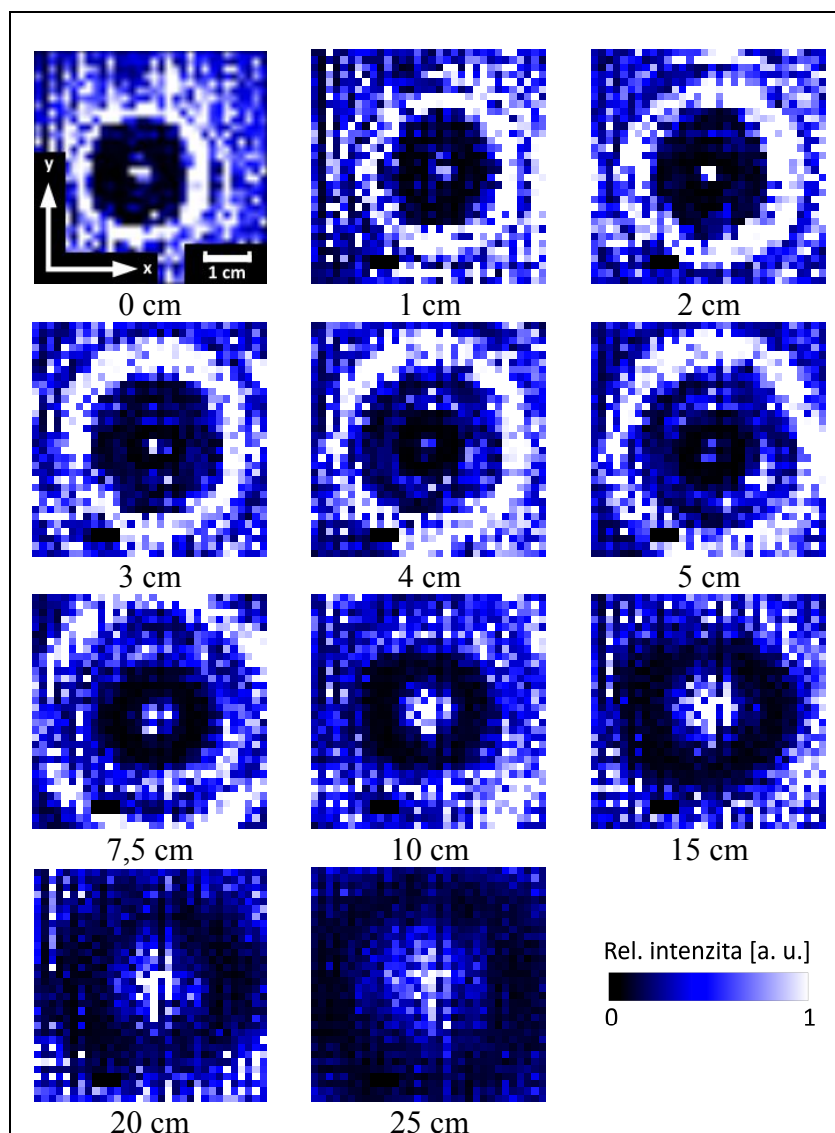
Obr. 38: Naměřený a teoretický příčný intenzitní průběh svazku pro štěrbinu o šířce 15,0 mm ve vzdálenosti 150 cm od štěrbiny.

Získané průběhy intenzity se velmi výrazně odchyľují od teoretických. Zejména je nápadná absence výrazného jednoznačně ohraničeného centrálního peaku u všech zaznamenaných intenzitních profilů. Další výraznější peaky s výjimkou průběhu na Obr. 37 navíc neodpovídají očekávaným pozicím vyšších difrakčních řádů. Není zřejmé, co je příčinou takto výrazných odchylek od teoretických předpokladů. Získaná data můžou být ve výrazné míře ovlivněna interferencí se zářením odraženým od pracovní desky. Měření může být rovněž ovlivněno špatnou odezvou detektoru pro nízké hodnoty intenzity dopadajícího záření a tím výrazně vyššího vlivu šumu. Oproti předchozím úlohám, kdy byly v ose svazku voleny hodnoty expozice 0 či 1, v tomto případě bylo nutno volit hodnoty 5 či 6 a jeden výsledný snímek byl navíc získán složením čtyř dílčích snímků. Naopak výrazně vyšší intenzita prvního oproti nultému difrakčnímu řádu u profilu na Obr. 37 v tomto případě jednoznačně není způsobena nemožností dostatečně přesné volby expozice, protože až do hodnoty posunu kamery o 9 cm oproti ose svazku byla hodnota expozice pro všechny snímky stejná. Vzhledem k nejednoznačnosti výsledků této části úlohy nelze vyslovit jednoznačné závěry, například co se týče ověření hodnoty vlnové délky použitého záření. Na základě těchto výsledků lze očekávat podobné problémy i u dalších aplikací, zejména tam, kde je zaznamenáván signál o nízké intenzitě a je třeba to zohlednit při interpretaci získaných dat.



### 3.5 Detekce a zobrazení předmětů v transmisním režimu

Dále byla realizována úloha týkající se zobrazování v transmisním režimu. Postup je popsán v kapitole 2.2.5. Nejprve bylo testováno zobrazení bez využití zobrazovací soustavy. Pro tuto úlohu byly z testovacích předmětů zvoleny obě podložky a oba hřebíky. Obraz byl zaznamenáván pro různé vzdálenosti předmětu od detektoru. Pořízené snímky podložky o vnějším průměru 15 mm, vnitřním průměru 5 mm a tloušťce 5 mm jsou zachyceny na Obr. 39, měřítko a orientace všech snímků jsou shodné.

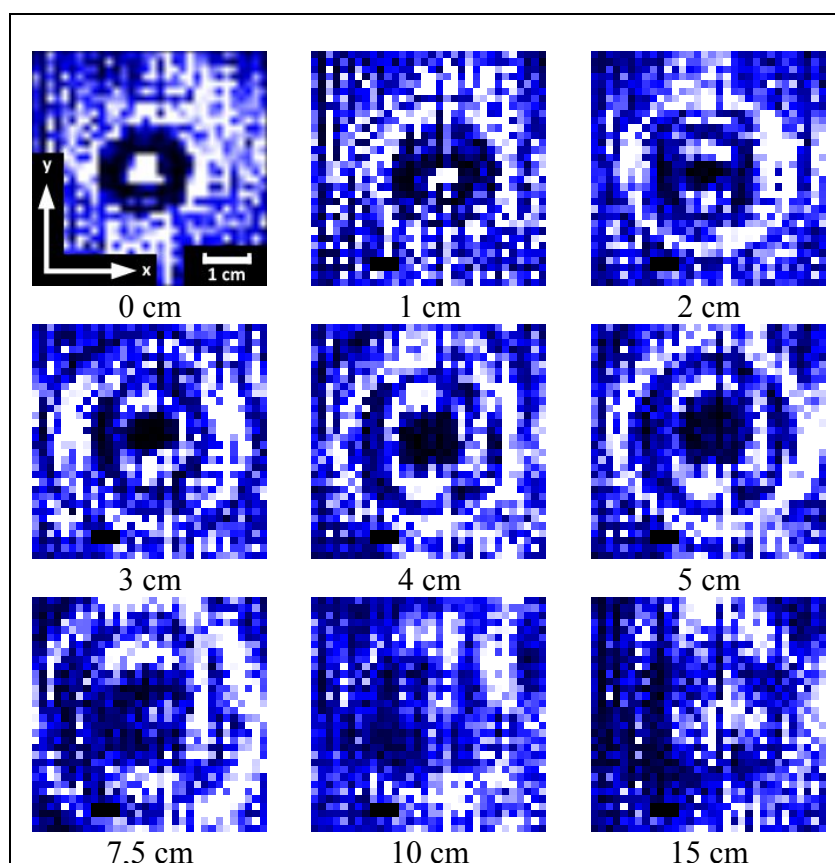


Obr. 39: Obraz podložky o vnějším průměru 15 mm, vnitřním průměru 5 mm a tloušťce 5 mm v různých vzdálenostech od detektoru bez využití zobrazovací soustavy.

Podložka byla jednoznačně detekovatelná do vzdálenosti 25 cm od detektoru. Vyjma samotného obrazu podložky vznikají výrazné kruhové struktury, které komplikují určení velikosti předmětu. Tyto struktury s velkou pravděpodobností vznikají součtem záření ohýbajícího se na hranách předmětu, nicméně tuto skutečnost není možno vzhledem ke složitosti tvaru předmětu jednoznačně prokázat. Na základě snímků pořízených do vzdálenosti podložky 3 cm od detektoru by bylo logické považovat za rozměr předmětu celou tmavou oblast ve středu snímku, jejíž rozměr je pro podložku dotýkající se detektoru 15 px, tedy 22,5 mm, což je výrazně více než skutečný průměr podložky. Počínaje

snímkem s předmětem ve vzdálenosti 4 cm od detektoru je zřejmé, že tmavá oblast na předchozích snímcích vznikla splynutím více minim kruhových struktury. Určením průměru centrálního minima pro tento snímek byla určena hodnota 10 px, tedy 15 mm, což souhlasí se skutečným průměrem podložky. S rostoucí vzdáleností předmětu od detektoru se jeho obraz zvětšuje, což je v souladu s předpokladem mírně divergentního svazku vzniklého umístěním kolimační čočky do menší vzdálenosti od zdroje, než je její ohnisková vzdálenost.

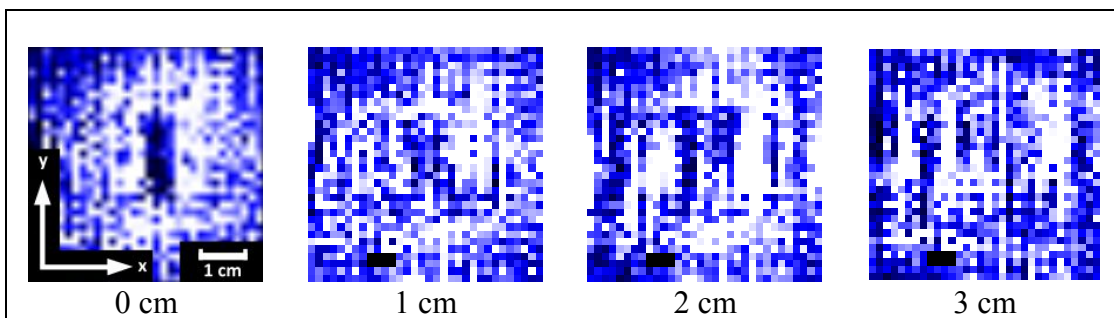
Následně byla snímána podložka o vnějším průměru 14 mm, vnitřním průměru 10 mm a tloušťce 2 mm. Snímky jsou zachyceny na Obr. 40, měřítko a orientace všech snímků jsou shodné.



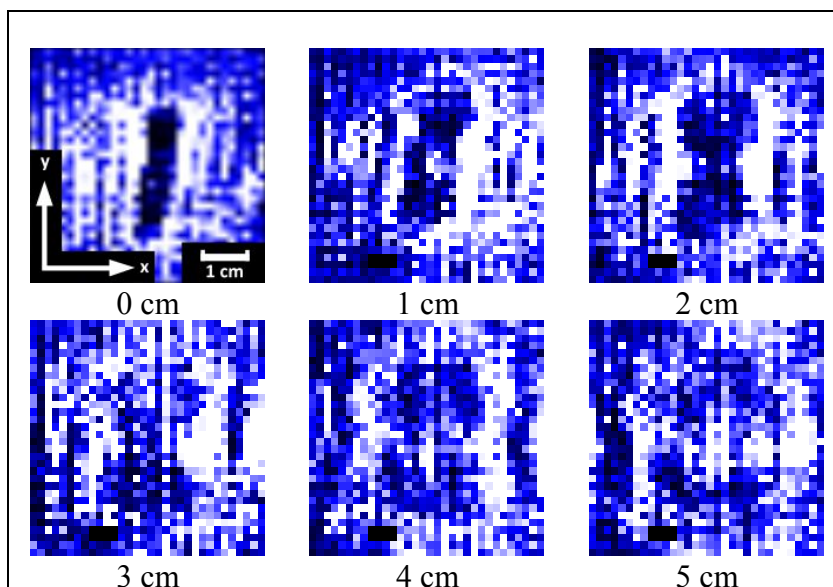
Obr. 40: Obraz podložky o vnějším průměru 14 mm, vnitřním průměru 10 mm a tloušťce 2 mm v různých vzdálenostech od detektoru bez využití zobrazovací soustavy.

Tato podložka je detekovatelná do vzdálenosti 15 cm od detektoru. V obraze jsou opět výrazné kruhové struktury. Skutečný rozměr podložky je patrný pouze ze snímku ve vzdálenosti 1 cm od detektoru, ze kterého byla určena hodnota průměru podložky 9 px, tedy 13,5 mm, což je opět v souladu se skutečným průměrem podložky.

Dále byly snímány hřebíky. Snímky hřebíku o délce 15 mm, průměru 1 mm a průměru hlavičky 2 mm jsou zachyceny na Obr. 41 a hřebíku o délce 24 mm, průměru 2 mm a průměru hlavičky 5 mm na Obr. 42, měřítko a orientace všech snímků jsou shodné.



Obr. 41: Obráz hřebíku o délce 15 mm, průměru 1 mm a průměru hlavičky 2 mm v různých vzdálenostech od detektoru bez využití zobrazovací soustavy.

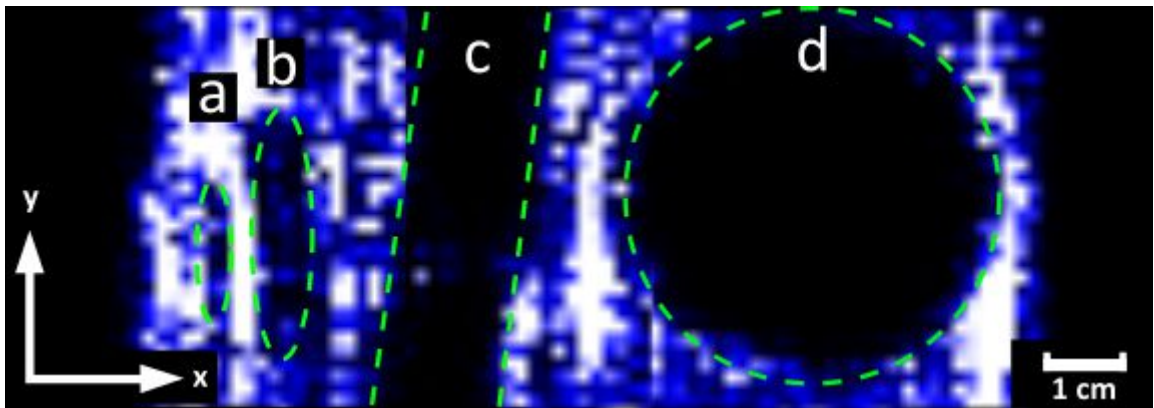


Obr. 42: Obráz hřebíku o délce 24 mm, průměru 2 mm a průměru hlavičky 5 mm v různých vzdálenostech od detektoru bez využití zobrazovací soustavy.

Menší z hřebíků je s jistotou detekovatelný pouze při umístění přímo na detekční plochu detektoru. S rostoucí vzdáleností jeho obraz velmi rychle zaniká, do vzdálenosti 3 cm od detektoru je patrná intenzitní struktura svědčící o jeho přítomnosti. Určením jeho délky z prvního snímku byla získána hodnota 15 mm, což odpovídá jeho skutečné délce. Vzhledem k tloušťce hřebíku odpovídající třetině vlnové délky použitého zařízení nemá smysl se určením tloušťky zabývat.

Větší z hřebíků je detekovatelný do vzdálenosti 5 cm od detektoru, přičemž ale opět pouze snímek předmětu při jeho umístění přímo na detekční ploše vypovídá o jeho skutečném tvaru, ve větší vzdálenosti je již opět patrná jen struktura vzniklá sečtením záření ohýbajícího se na předmětu. Ze snímku byla určena délka hřebíku 25,5 mm, která se od skutečné hodnoty liší o méně než jednu vlnovou délku, konkrétně o 1,5 mm. Určení tloušťky opět nemá fyzikální význam, protože její hodnota je menší než vlnová délka použitého záření.

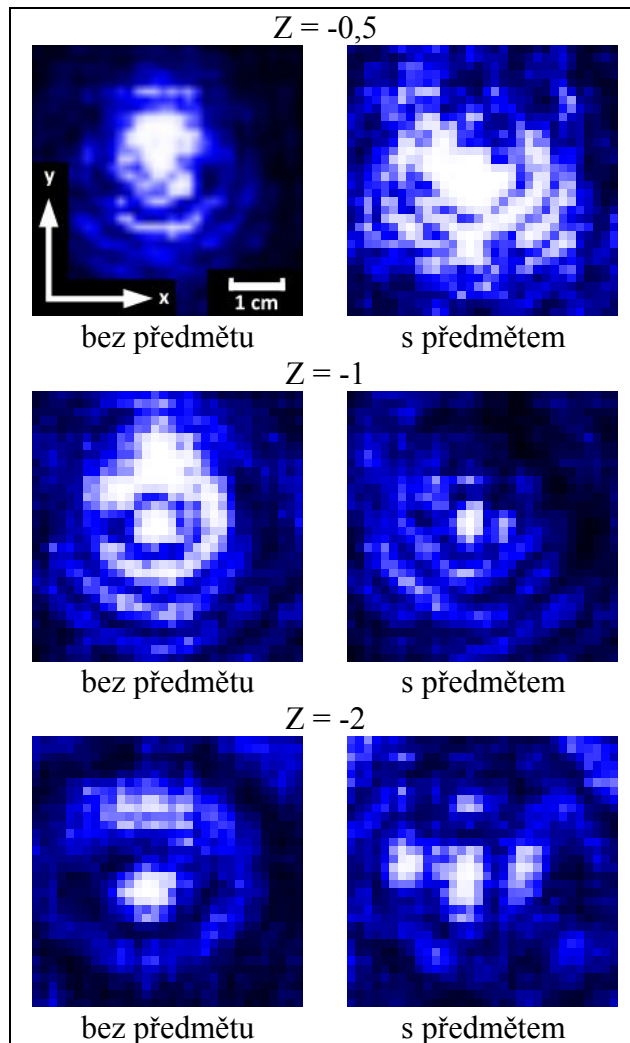
Dále bylo testováno zobrazení za podmínek odpovídajících zamýšlené aplikaci. Nerezové kolečko, proužek hliníkového plechu a oba hřebíky byly umístěny za zadní desku obrazu tvořenou sololitem o tloušťce 2 mm. Zadní deska obrazu se dotýkala detekční plochy detektoru. Byly pořízeny snímky oblasti s umístěnými předměty, na Obr. 43 je snímek této oblasti, vzniklý složením čtyř jednotlivých snímků.



Obr. 43: Obraz předmětů za zadní deskou obrazu a) hřebík o délce 15 mm, b) hřebík o délce 24 mm, c) proužek hliníkového plechu, d) nerezové kolečko.

Na pořízeném snímku jsou všechny testovací předměty dobře patrné, průchod záření obrazem a následně jeho zadní deskou neměl na kvalitu zobrazení výraznější vliv, snímek odpovídá obrazům předmětů při jejich předchozím snímání v kontaktu s detektorem. Dřevěný rám obrazu, na snímku patrný jako tmavé oblasti na okrajích, naopak záření v porovnání se zbytkem obrazu velmi dobře absorboval.

Následně bylo testováno zobrazení v transmisním režimu s využitím zobrazovací soustavy. Do vzdálenosti 100 cm od zdroje bylo umístěno nerezové kolečko, mezi něj a detektor byl umístěn dublet, vzdálenosti mezi jednotlivými prvky byly nastaveny na základě údajů v Tab. 2. Snímky byly zaznamenány pro hodnoty zvětšení -0,5; -1 a -2 (znaménko minus značí převrácený obraz), pro porovnání byl rovněž pro každou hodnotu zvětšení pořízen snímek bez přítomnosti testovacího předmětu. Snímky jsou zachyceny na Obr. 44, měřítko a orientace všech snímků jsou shodné.

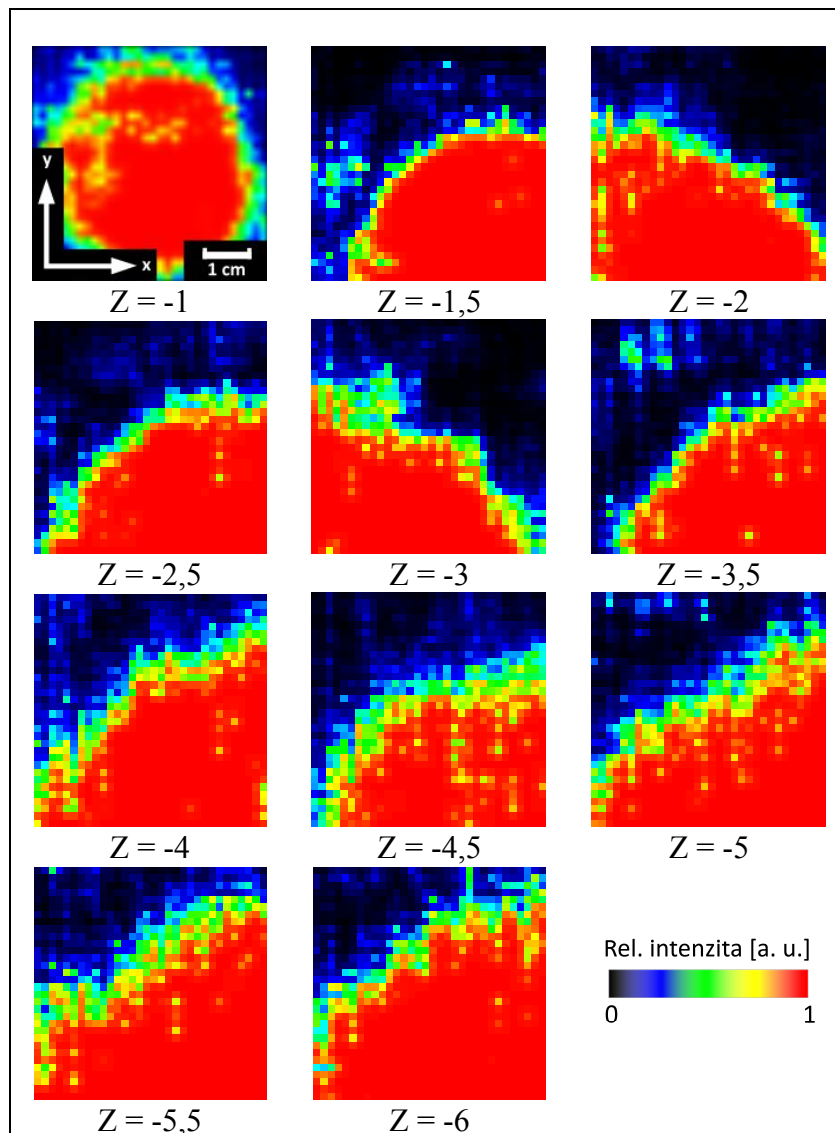


Obr. 44: Referenční snímek a zobrazení nerezového kolečka s pomocí dubletu pro různé hodnoty zvětšení.

Již samotným průchodem záření skrze zobrazovací soustavu vznikají výrazné difrakční obrazce kruhového tvaru. Přidáním kolečka vznikají další difrakční struktury, opět kruhového tvaru, které s původními splývají natolik, že kolečko je naprosto nedetekovatelné. Zobrazení bylo testováno i pro další hodnoty zvětšení, nicméně výsledek byl stejný jako v uvedených případech. Situace není lepší ani při využití předmětu jiného než kruhového tvaru.

### 3.6 Detekce a zobrazení předmětů s využitím odrazu

Dále bylo testováno zobrazení s využitím odraženého záření. Postup realizace úlohy je popsán v kapitole 2.2.6. Nejprve bylo ověřováno zvětšení zobrazovací soustavy v různých konfiguracích, jako testovací předmět bylo použito nerezové kolečko o průměru 38 mm, parametry experimentální sestavy byly voleny na základě hodnot v Tab. 2. Pořízené snímky pro různá zvětšení jsou zachyceny na Obr. 45, měřítko a orientace všech snímků jsou shodné.



Obr. 45: Snímky nerezového kolečka s využitím odraženého záření pro různé hodnoty zvětšení.

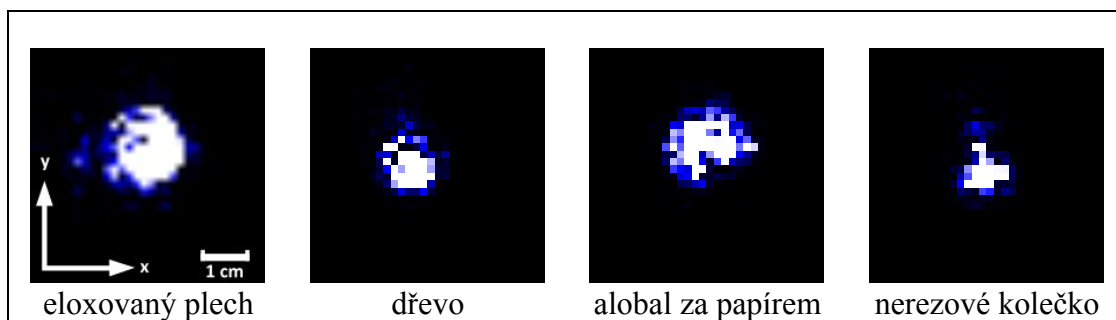
S pomocí nástroje kružnice v software Inkscape byly určeny průměry obrazu kolečka na jednotlivých snímcích. Jejich vydělením skutečným průměrem byla zjištěna skutečná hodnota zvětšení. Výsledky shrnuje Tab. 3.  $Z$  označuje teoretickou hodnotu zvětšení,  $D_k$  naměřené hodnoty průměru obrazu kolečka,  $|Z'|$  vypočtenou hodnotu zvětšení bez ohledu na orientaci obrazu a  $\delta Z$  relativní odchylku této hodnoty od teoretické.

Tab. 3: Naměřené hodnoty průměru obrazu kolečka a z nich vypočtené absolutní hodnoty zvětšení pro různá nastavení zobrazovací soustavy.

| Z    | $D_k$ [mm] | $ Z' $ | $\delta Z$ [%] |
|------|------------|--------|----------------|
| -1   | 37,5       | 0,99   | 1,3            |
| -1,5 | 56         | 1,47   | 1,8            |
| -2   | 72         | 1,89   | 5,3            |
| -2,5 | 76,5       | 2,01   | 19,5           |
| -3   | 90         | 2,37   | 21,1           |
| -3,5 | 111        | 2,92   | 16,5           |
| -4   | 153        | 4,03   | 0,7            |
| -4,5 | 150        | 3,95   | 12,3           |
| -5   | 213        | 5,61   | 12,1           |
| -5,5 | 243        | 6,39   | 16,3           |
| -6   | 252        | 6,63   | 10,5           |

Při nastavení soustavy pro zvětšení 1 velikost obrazu velmi přesně odpovídá předpokladům, relativní odchylka zvětšení je 1,3 %. S rostoucím zvětšením odchylky narůstají, maximální relativní odchylka činí 21,1 %. Při větších zvětšeních je určení průměru výrazně komplikováno pořízením snímku pouze části kolečka a výrazně neostrým okrajem obrazu, který neumožňuje přesné proložení odpovídající kružnice, nemusí tedy nutně jít o nesoulad s teoretickými předpoklady. Navíc je třeba vzít v úvahu rozlišovací schopnost zobrazovací soustavy, tedy fakt, že i při největším zvětšení se může zachycený průměr kolečka lišit o téměř tři milimetry oproti skutečnému. Rozsáhlá část snímků je saturována, což není zcela optimální, nicméně při volbě kratší expoziční doby nebyly okraje kolečka dobře patrné. Toto může mít určitý vliv na výslednou velikost obrazu, který se může jevit mírně větší než při optimálně zvolené expozici. S ohledem na tyto skutečnosti lze konstatovat, že zobrazení soustavou odpovídá teoretickým předpokladům.

Dále byla testována odrazivost různých materiálů. Černě eloxovaného plechu, dřeva, alobalu umístěného za listem silného papíru a výše zmíněného nerezového kolečka. Zobrazovací soustava byla použita v konfiguraci pro zvětšení  $Z = -0,1$ . Pořízené snímky jsou zachyceny na Obr. 46, měřítko a orientace všech snímků jsou shodné.

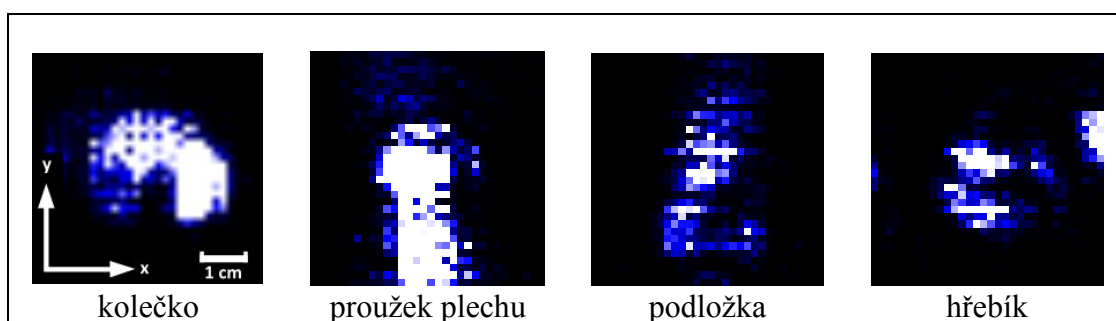


Obr. 46: Snímky svazku odraženého od různých materiálů bez použití zobrazovací soustavy.

Pro první tři snímky byla volena stejná délka expozice (hodnota 3), pro snímek nerezového kolečka vzhledem k jeho menšímu rozměru a tím menšímu množství odraženého záření byla zvolena hodnota expozice 4. Zkoumané materiály nevykazují výrazné rozdíly v odrazivosti. I dřevo, které je v tenké vrstvě pro THz záření dobře propustné, odráží velké množství dopadajícího záření. Tato metoda se tedy jednoznačně

nejeví jako vhodná pro odlišení více různých materiálů od sebe. Naopak intenzita detekovaného záření je značně závislá na orientaci předmětu a už při odchylkách v řádu jednotek stupňů dochází k velmi výraznému poklesu. S ohledem na tuto skutečnost se tato metoda nejvíce jako vhodná ani k detekci předmětů ukrytých pod povrchem materiálu. Jejich orientace je náhodná, a i když je za vhodných okolností možné tento předmět detekovat, rozhodně nelze vyloučit jeho přítomnost v případě, že detekován nebyl.

Následně bylo testováno zobrazení dalších předmětů v režimu odrazu. Jako testovací předměty byly zvoleny nerezové kolečko, proužek hliníkového plechu, podložka o vnějším průměru 15 mm, vnitřním průměru 5 mm a tloušťce 5 mm a hřebík o délce 24 mm, průměru 2 mm a průměru hlavičky 5 mm. Kolečko bylo ke stojánku připevněno pomocí dřevěného kolíčku, proužek plechu byl upnut do stojánku, ostatní předměty byly lepicí páskou přichyceny k listu papíru a ten následně chycen do stojánku. Všechny předměty byly snímány při nastavení soustavy pro zvětšení  $Z = -1$ . Snímky předmětů jsou zachyceny na Obr. 47, měřítko a orientace všech snímků jsou shodné.



Obr. 47: Testovací předměty zobrazené s využitím odraženého záření.

Nerezové kolečko na prvním snímku je poměrně dobře patrné. Na snímku lze rozeznat i kolíček, kterým bylo kolečko upevněno, obraz je převrácený. Obraz proužku hliníkového plechu rovněž tvarem odpovídá předmětu. V případě podložky a hřebíku je předmět naprosto neidentifikovatelný. Vzhledem k velmi malému rozměru předměty odráží jen velmi malé množství záření. Naproti tomu papír, soudě na základě předchozích výsledků, odráží poměrně dobře a záření odražené samotným předmětem tak zaniká. Tuto metodu lze tedy použít pouze pro detekci předmětů o velikosti v řádu minimálně desítek milimetrů a navíc se předmět nemůže nacházet na nebo v jiném materiálu. Je také třeba dbát na přesné nastavení vzájemné geometrie předmětu, zdroje, zobrazovací soustavy a detektoru.



## Závěr

Pro zdroj terahertzového záření TeraSense THz Source 100 GHz, 400 mW bylo zkoumáno prostorové rozložení intenzity generovaného záření. Pro malé vzdálenosti od zdroje svazek v souladu s dostupnými údaji vykazuje přibližně Gaussovský profil, nicméně samotný profil je zatížen velkými lokálními výkyvy a nemá hladký průběh. Získaná data neumožňují jednoznačné určení hodnoty divergence svazku. Ve větších vzdálenostech od zdroje vykazuje dle očekávání svazek vyšší homogenitu, která se jeví jako dostatečná pro zamýšlené využití ve vzdálenostech větších než 100 cm. Je zřejmé, že není možno dobře porovnávat hodnoty intenzity záření ze snímků pořízených s různou expoziční dobou, tato problematika je podrobněji popsána v diskusi příslušné úlohy.

Dále byla zkoumána možnost kolimace svazku pomocí kolimační čočky LAT75. Zařazení kolimační čočky ve všech jejích vzdálenostech od zdroje způsobilo dle očekávání výrazné zúžení svazku, který navíc získal jasně ohraničenou centrální oblast o výrazně vyšší intenzitě než okolí. Na základě získaných dat byla pro další úlohy zvolena jako optimální vzdálenost kolimační čočky od zdroje hodnota 50 mm. Soudě podle získaných dat kolimační čočka dobře plní zamýšlený účel a umožňuje dostatečně homogenní osvětlení oblasti srovnatelné s rozměry detektoru.

Následně byly ověřovány údaje o ohniskových vzdálenostech čoček LAT115 a LAT200. S přihlédnutím k jevům popsaným v diskusi této úlohy lze konstatovat, že v případě obou čoček naměřené hodnoty jejich ohniskových vzdáleností odpovídají výrobcem udávaným hodnotám. Orientace čočky nemá na hodnotu ohniskové vzdálenosti vliv. Při sestavení čoček do podoby dubletu opět naměřená hodnota ohniskové vzdálenosti odpovídá vypočtené hodnotě, a to bez ohledu na orientaci dubletu. Na základě těchto výsledků lze konstatovat potvrzení platnosti zobrazovací rovnice v terahertzové oblasti a vhodnost jejího využití pro volbu vzájemných pozic předmětu, optických komponent a detektoru v dalších aplikacích.

Rovněž byly studovány difrakční jevy, konkrétně difrakce na štěrbině. Získané průběhy intenzity pro obě zkoumané šířky štěrbinu nevykazují téměř žádnou shodu s očekávanými průběhy na základě teorie difrakce. Zejména nebyl zaznamenán žádný výrazný centrální peak, který by odpovídal nultému řádu difrakce, a rovněž pozice maxim vyšších difrakčních řádů až na výjimky neodpovídají jejich očekávaným polohám. Na základě získaných dat nelze posoudit platnost teorie difrakce v terahertzové oblasti, nicméně je zřejmé, že s její pomocí nelze vzhledem k velkému množství nekvantifikovatelných vlivů jednoznačně předvídat výsledek měření. Vzhledem k tomu, že v tomto případě byla geometrie experimentu poměrně přesně definována, lze očekávat, že výsledky v reálné aplikaci by byly ještě výrazně horší.

Dále již bylo testováno samotné zobrazení předmětů. Nejprve byly testovací předměty snímány v transmisním režimu bez využití zobrazovací soustavy. Použité testovací předměty byly detekovatelné do vzdálenosti jednotek, maximálně desítek centimetrů od detektoru, přičemž jasnou informaci o tvaru předmětu lze získat pouze při jeho umístění v těsné blízkosti detektoru. Určení přesného rozměru předmětu je prakticky znemožněno vzájemně splývajícími strukturami, které pravděpodobně vznikají sečtením záření ohýbajícího se na hranách předmětů. Umístění předmětů za desku sololitu o tloušťce 2 mm nemá na zobrazení zásadnější vliv. Ačkoliv je předměty možno detekovat, vzhledem k nemožnosti zjištění přesnějších informací o jejich tvaru a rozměrech se tato metoda jeví v praxi jako nepoužitelná.

Následně bylo zkoumáno zobrazení v transmisním režimu s využitím zobrazovací soustavy. V tomto případě se záření ohýbá nejen na hranách předmětu, ale také na objímce čočky, což je dobře patrné při pořízení snímku bez předmětu. Takto vzniklé struktury se

dále sčítají, což má za následek nemožnost detekce předmětů s rozměry i v řádu desítek milimetrů. Zvětšení soustavy a tvar předmětu na tuto skutečnost nemají výraznější vliv. Tato metoda se jeví pro analýzu uměleckých děl jako naprosto nepoužitelná.

Při zobrazení s využitím odraženého záření bylo nejprve ověřováno zvětšení zobrazovací soustavy. V rámci nejistot diskutovaných u příslušné úlohy se experimentálně určené hodnoty zvětšení shodují s vypočtenými, což opět potvrzuje platnost zobrazovací rovnice v terahertzové oblasti. Dále byla testována odrazivost různých materiálů. Navzdory očekávání materiály nevykazují výraznější rozdíly v odrazivosti, což znemožňuje detekci předmětu ukrytého pod povrchem, případně i na povrchu jiného materiálu. Následně byla zkoumána možnost zobrazení konkrétních předmětů. V případě předmětů o rozměrech v řádu desítek milimetrů, které jsou volně umístěny v prostoru, lze získat přibližnou představu o tvaru a rozměru předmětu, nicméně zobrazení je velmi citlivé na vzájemnou geometrii jednotlivých komponent. V případě předmětů o rozměrech v řádu jednotek milimetrů není detekce možná. Vzhledem k výše popsáným skutečnostem se i tato metoda jeví v praxi jako naprosto nepoužitelná.

Na základě získaných výsledků lze jednoznačně konstatovat, že testované komponenty nelze použít k analýze uměleckých děl, a to ani v transmisním režimu, ani s využitím odraženého záření.

## Seznam použitých pramenů

- [1] Rostami, Ali & Rasooli, Hassan & Baghban, Hamed. (2011). *Terahertz Technology - Fundamentals and Applications*. ISBN 978-3-642- 15792-9.
- [2] Daukantas, Patricia. (2018). Cultural Artifacts in Terahertz Light. *Optics and Photonics News*. 29. 28. 10.1364/OPN.29.3.000028.
- [3] FUKUNAGA, Kaori. *THz Technology Applied to Cultural Heritage in Practice*. Tokyo: Springer Japan, 2016. Cultural Heritage Science. ISBN 978-4-431-55883-5.
- [4] BRÜNDERMANN, Erik, Heinz-Wilhelm HÜBERS a Maurice FitzGerald KIMMITT. *Terahertz Techniques*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. Springer Series in Optical Sciences. ISBN 978-3-642-02591-4.
- [5] Withington, Stafford. (2004). Terahertz astronomical telescopes and instrumentation: One contribution of 16 to a Discussion Meeting 'The terahertz gap: the generation of far-infrared radiation and its applications'. *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 362. 395-402. 10.1098/rsta.2003.1322.
- [6] ALMA | ESO Česko [online]. [cit. 02.05.2020]. Dostupné z: <https://www.eso.org/public/czechrepublic/teles-instr/alma/?lang>
- [7] ALMA array from the air | ESO [online]. [cit. 02.05.2020]. Dostupné z: <https://www.eso.org/public/images/eso1312a/>
- [8] ESA - Science objectives. European Space Agency [online]. [cit. 02.05.2020]. Dostupné z: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Planck/Science\\_objectives](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Planck/Science_objectives)
- [9] ESA - Planck overview. European Space Agency [online]. [cit. 02.05.2020]. Dostupné z: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Planck\\_overview](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Planck_overview)
- [10] Donald D. Arnone, Craig M. Ciesla, Alessandra Corchia, S. Egusa, Michael Pepper, J. Martyn Chamberlain, C. Bezant, Edmund H. Linfield, R. Clothier, N. Khammo, "Applications of terahertz (THz) technology to medical imaging," *Proc. SPIE 3828, Terahertz Spectroscopy and Applications II*, (9 September 1999)
- [11] K. Humphreys et al., "Medical applications of terahertz imaging: a review of current technology and potential applications in biomedical engineering," *The 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, San Francisco, CA, 2004, pp. 1302-1305.
- [12] Paul Townsend. Research [online]. Copyright © 2013 Paul Townsend [cit. 02.05.2020]. Dostupné z: <http://www.paultownsend.co.uk/research/fundamentals/terahertz-radiation/>
- [13] PERENZONI, Matteo a Douglas J. PAUL, ed. *Physics and Applications of Terahertz Radiation*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. Springer Series in Optical Sciences. ISBN 978-94-007-3837-9.
- [14] Laboratory of Terahertz Spectroscopy, Prague – Research – terahertz spectroscopy [online]. [cit. 02.05.2020]. Dostupné z: <https://lts.fzu.cz/en/res-thz.php>

- [15] Terahertz (THz) Spectroscopy: A Cutting-Edge Technology | IntechOpen. IntechOpen - Open Science Open Minds | IntechOpen [online]. Copyright © 2020 IntechOpen. All rights reserved. [cit. 02.05.2020]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/terahertz-spectroscopy-a-cutting-edge-technology/terahertz-thz-spectroscopy-a-cutting-edge-technology>
- [16] Fukunaga, Kaori & Marcello, Picollo. (2010). Terahertz spectroscopy applied to the analysis of artist's materials. *Applied Physics A*. 100. 591-597. 10.1007/s00339-010-5643-y.
- [17] TISCH—Terahertz Imaging and Spectroscopy in Cultural Heritage: applications in archaeology, architecture and art conservation science | Spectroscopy Europe/Asia. Spectroscopy Europe/Asia | Informing Spectroscopists for Over 40 Years [online]. [cit. 02.05.2020]. Dostupné z: <https://www.spectroscopyeurope.com/article/tisch—terahertz-imaging-and-spectroscopy-cultural-heritage-applications-archaeology>
- [18] Terahertz security applications | TeraSense. Terahertz equipment for THz imaging | TeraSense [online]. Copyright © 2008 [cit. 02.05.2020]. Dostupné z: <https://terasense.com/applications/security/>
- [19] Terahertz applications in pharmaceutical industry | TeraSense. Terahertz equipment for THz imaging | TeraSense [online]. Copyright © 2008 [cit. 02.05.2020]. Dostupné z: <https://terasense.com/applications/pharmaceutical-applications/>
- [20] Xiao, Zhenyang & Yang, Qiuji & Jingguo, Huang & Huang, Zhiming & Zhou, Wei & Gao, Y. & Shu, Rong & he, Zhiping. (2018). Terahertz communication windows and their point-to-point transmission verification. *Applied Optics*. 57. 7673. 10.1364/AO.57.007673.
- [21] RP Photonics Encyclopedia - terahertz sources, microwave, gas laser, quantum cascade laser, photoconductive antenna, nonlinear crystals, optical rectification. RP Photonics - consulting on laser technology, nonlinear optics, fiber optics; simulation and design software [online]. Copyright © RP Photonics Consulting GmbH [cit. 03.05.2020]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/terahertz\\_sources.html](https://www.rp-photonics.com/terahertz_sources.html)
- [22] LEE, Yun-Shik. *Principles of Terahertz Science and Technology*. Oregon : Springer, 2009. 340 s. ISBN 978-0-387-09539-4.
- [23] Saeedkia, Daryoosh. *Handbook of terahertz technology for imaging, sensing and communications*. Oxford, England Philadelphia, Pennsylvania: WP Woodhead Publishing, 2013. ISBN 978-0-85709-235-9.
- [24] RP Photonics – free electron lasers [online]. [cit. 03.05.2020]. Dostupné z: [http://www.rp-photonics.com/free\\_electron\\_lasers.html](http://www.rp-photonics.com/free_electron_lasers.html)
- [25] Li, Xiang & Zheng, Yuan & Hurd, Christian & Gamzina, Diana & Paoloni, Claudio & Himes, Logan & Letizia, Rosa & Luhmann, Neville & Tang, Ye & Hao, Xuejiao & Gonzalez, Michelle & Li, Hanyan & Pan, Pan & Feng, Jinjun. (2017). Backward wave oscillator for high power generation at THz frequencies. 2. 10.1117/12.2273256.
- [26] Haase, Christa & Schäfer, Martin & Hogan, Stephen & Merkt, Frédéric. (2011). *Perturbations in the Spectra of High Rydberg States: Channel Interactions, Stark and Zeeman Effects*.

- [27] IMPATT diodes and generators | TeraSense. Terahertz equipment for THz imaging | TeraSense [online]. Copyright © 2008 [cit. 03.05.2020]. Dostupné z: <https://terasense.com/terahertz-technology/impatt-diodes/>
- [28] ACKOO – Učební texty. Mikrovlnná dioda[online]. Copyright © 2020 eStránky.cz [cit. 03.05.2020]. Dostupné z: <https://ackoo.estranky.cz/clanky/mikrovlne-diody.html>
- [29] Terahertz sources and generators | TeraSense. Terahertz equipment for THz imaging | TeraSense [online]. Copyright © 2008 [cit. 10.04.2020]. Dostupné z: <https://terasense.com/products/terahertz-sources/>
- [30] Horn Antennas | TeraSense. Terahertz equipment for THz imaging | TeraSense [online]. Copyright © 2008 [cit. 10.04.2020]. Dostupné z: <https://terasense.com/products/microwave-and-terahertz-horn-antennas/>
- [31] TeraSense. TeraSense T15 Manual [online]. Copyright © [cit. 10.04.2020]. Dostupné z: <http://terasense.com/downloads/current/2.2.1/Terasense%20T15%20Manual.pdf>
- [32] PTFE Plano-Convex Lenses. Thorlabs, Inc. - Your Source for Fiber Optics, Laser Diodes, Optical Instrumentation and Polarization Measurement & Control [online]. Copyright © 1999 [cit. 10.04.2020]. Dostupné z: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_ID=1627](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_ID=1627)
- [33] Fyzikální olympiáda – Aktuality [online]. [cit. 11.04.2020]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/cocky.pdf>
- [34] VUT Brno. Huygensův-Fresnelův princip a odvození difrakčních integrálů [online]. [cit. 11.04.2020]. Dostupné z: <http://physics.fme.vutbr.cz/~komrska/Difrakce/KapD03.pdf>

## Seznam použitých symbolů a zkratek

- $A$  ... amplituda rovinné vlny  
 $a$  ... vzdálenost předmětu od hlavní roviny první čočky  
 $a'$  ... vzdálenost obrazu od hlavní roviny druhé čočky  
 $a_1$  ... vzdálenost předmětu od první čočky  
 $a_2$  ... vzdálenost obrazu od druhé čočky  
 $a_{1h}$  ... vzdálenost hlavní roviny od první čočky  
 $a_{2h}$  ... vzdálenost hlavní roviny od druhé čočky  
 $b$  ... šířka štěrbin  
 $D$  ... průměr čočky  
 $d$  ... vzdálenost čoček dubletu  
 $D_k$  ... průměr obrazu kolečka  
 $f$  ... výsledná ohnisková vzdálenost dubletu  
 $f_1, f_2$  ... ohniskové vzdálenosti čoček  
HDPE ... high density polyethylene (vysokohustotní polyetylen)  
 $N_F$  ... Fresnelovo číslo  
PET ... polyethylentereftalát  
PP ... polypropylen  
PTFE ... polytetrafluoretylen  
TPX ... polymetylpenten  
 $x$  ... vodorovná souřadnice ve směru kolmém na směr šíření svazku  
 $y$  ... svislá souřadnice ve směru kolmém na směr šíření svazku  
 $Z$  ... zvětšení optické soustavy  
 $z$  ... souřadnice ve směru šíření svazku  
 $Z'$  ... hodnota zvětšení vypočtená z naměřených hodnot  
 $\Delta x$  ... rozlišovací schopnost optické soustavy  
 $\delta Z$  ... relativní odchylka hodnoty zvětšení získané z naměřených hodnot od teoretické hodnoty  
 $\lambda$  ... vlnová délka záření