



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# VYUŽITIE FOTOGRAMETRIE PRI REVERZKOM NÁVRHU STROJNÝCH SÚČASTÍ

USE OF PHOTOGRAMMETRY IN MACHINE PARTS RECONSTRUCTION

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. David Raclavský

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Repka

BRNO 2024



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Ing. David Raclavský**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení  
Vedoucí práce: **Ing. Martin Repka**  
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Využitie fotogrametrie pri reverznom návrhu strojnych súčastí

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

K rekonštrukcii povrchu sa pri reverznom inžinierstve využívajú 3D skenery. Cieľom práce je rešerš dostupných 3D skenerov založených na princípe fotogrametrie. Vyhotovenie skenu súčastí a vymodelovanie povrchu v CAD prostredí.

### Cíle bakalářské práce:

Rešerš dostupných 3D skenerov.  
Vyhotovenie 3D skenu súčastí.  
Vyhotovenie CAD modelu na základe naskenovaných dát.

### Seznam doporučené literatury:

GUPTA, Mohit, et al.. A Practical Approach to 3D Scanning in the Presence of Interreflections, Subsurface Scattering and Defocus. International journal of computer vision [online]. Heidelberg: Springer, 2013, 102(1-3), 33-55. ISSN 0920-5691.

JECIĆ, Stjepan; DRVAR, Nenad. The assessment of structured light and laser scanning methods in 3D shape measurements. In: Proceedings of the 4th International Congress of Croatian Society of Mechanics. 2003. p. 237-244.

ČERMÁK, J. Metody 3D skenování objektů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Marada, Ph.D.

HALEEM, Abid, et al.. Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview. International Journal of Cognitive Computing in Engineering [online]. Elsevier B.V, 2022, 3, 161-171. ISSN 2666-3074.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato práce poskytuje obecný náhled na problematiku různých konstrukcí 3D skenerů a zvláště se zaměřuje na 3D skenery využívající princip fotogrammetrie a uvádí jejich dostupné zástupce na trhu. V praktické části je popsán postup konstrukce strojní součásti s využitím metod reverzního inženýrství, kdy je uveden průběh skenování a vyhotovení CAD modelu s následným porovnáním výsledku s původním 3D skenem.

## KLÍČOVÁ SLOVA

reverzní inženýrství, 3D skenery, fotogrammetrie, strukturované světlo

## ABSTRACT

This thesis provides a general overview of the various 3D scanner designs and focuses on 3D scanners using the principle of photogrammetry and presents their current representatives on the market. In the practical part, the procedure of constructing a machine component using reverse engineering methods is described, where the scanning process and the creation of a CAD model are presented, followed by a comparison of the result with the original 3D scan.

## KEYWORDS

reverse engineering, 3D scanners, photogrammetry, structured light

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Raclavský, D. *Využitie fotogrametrie pri reverznom návrhu strojnych súcastí*. Brno, 2024. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Martin Repka. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/153992>.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Martina Repky a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 24. května 2024

.....

David Raclavský

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinovi Repkovi za poskytnuté rady a perfektní přístup ke mně, jakožto studentovi, při jejím zpracování.

# OBSAH

Úvod.....	10
<b>1 Terminologie.....</b>	<b>11</b>
1.1 Reverzní inženýrství .....	11
1.2 Fotogrammetrie .....	11
1.3 Přesnost.....	11
1.4 Rozlišení .....	11
1.5 GOM Inspect 2019 .....	11
<b>2 3D skenery a jejich princip .....</b>	<b>12</b>
2.1 3D skenery na principu fotogrammetrie .....	12
2.1.1 3D skenery na principu stereovidění .....	13
2.1.2 3D skenery na principu strukturovaného světla .....	13
2.1.3 Problémy při skenování .....	14
2.1.4 Matnicí povlaky .....	14
<b>3 Dostupné 3D skenery na principu fotogrammetrie.....</b>	<b>16</b>
3.1 Mobilní 3D skenery .....	16
3.1.1 ATOS Q .....	16
3.1.2 ATOS Compact Scan.....	17
3.1.3 Shining 3D Transcan C.....	18
3.1.4 Seal 3D.....	19
3.2 Ruční 3D skenery .....	20
3.2.1 Shining 3D EinScan HX .....	20
<b>4 Skenování strojní součásti.....</b>	<b>21</b>
4.1 Kalibrace .....	21
4.2 Příprava na skenování.....	22
4.3 Skenování.....	23
<b>5 Zpracování skenu .....</b>	<b>25</b>
5.1 Vyhodnocení skenu v programu GOM Inspect 2019.....	25
5.2 Tvorba CAD modelu v programu Autodesk Inventor.....	26
5.2.1 Tvorba disků.....	27
5.2.2 Tvorba žeber.....	28
5.2.3 Tvorba spalovacího prostoru a kulového zaoblení v oblasti žeber.....	29
5.2.4 Tvorba děr .....	31
5.3 Vyhodnocení .....	32
<b>Závěr .....</b>	<b>33</b>
<b>Použité informační zdroje.....</b>	<b>34</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>37</b>
<b>Seznam příloh .....</b>	<b>38</b>

## ÚVOD

3D skenery se staly podstatnou součástí strojírenství, zejména v oblasti metrologie a reverzního inženýrství, ve kterém by bylo bez jejich existence velice obtížné vytvářet CAD modely strojních součástí se složitou geometrií. V oblasti strojírenství se značně rozšířily 3D skenery na bázi fotogrammetrie spolu s využitím strukturovaného světla. Jejich využití je závislé na podmínkách skenování a požadované přesnosti výstupu.

V bakalářské práci je uvedeno rozdělení 3D skenerů a je popsán princip 3D skenerů na bázi fotogrammetrie spolu s jejich využitím a nedostatky. Další část se zabývá postupem vytvoření 3D skenu a CAD modelu hlavy válce z motocyklu ČZ 125 Scott.

# 1 TERMINOLOGIE

Zde je uveden základní přehled důležitých pojmů, které jsou potřebné pro účely této práce.

## 1.1 REVERZNÍ INŽENÝRSTVÍ

Reverzní inženýrství je proces měření, analyzování a testování s účelem rekonstrukce a reprodukce zájmového objektu, jehož konstrukční údaje nejsou k dispozici. Uplatnění nalézá při opětovném vytvoření velice drahých dílů a také i při historickém restaurování. Pro potřeby rekonstrukce je nutné porozumět původnímu účelu dílu. [1]

## 1.2 FOTOGRAMMETRIE

Definovat fotogrammetrii je možné jako „vědní obor zabývající se získáváním informací (především geometrických vztahů) z obrazových záznamů (nejčastěji měřických snímků).“ [2]

## 1.3 PŘESNOST

Přesnost je pro účely 3D skenování definována jako „rozdíl mezi skutečnou a změřenou hodnotou.“ [3]

## 1.4 ROZLIŠENÍ

Rozlišení je v rámci 3D skenování chápáno jako nejkratší možná vzdálenost mezi dvěma prvky, kterou 3D skener dokáže změřit. [3]

## 1.5 GOM INSPECT 2019

GOM Inspect je software zajišťující zpracování zaznamenaných skenů z různých typů měřících přístrojů. Umožňuje analýzu rozměrů a tvarů, editaci polygonové sítě a 3D kontrolu výstupů. [4]

## 2 3D SKENERY A JEJICH PRINCIP

V průmyslové praxi se využívá široké spektrum různých typů skenerů v závislosti na principu, který skener používá, požadované přesnosti, rozlišení a s ohledem na cíl digitalizace.

3D skenery slouží k digitální trojrozměrné rekonstrukci fyzického objektu. Uplatnění nalézají v širokém spektru oborů od strojírenství, stavebnictví až po medicínské využití a podle typu umožňují digitalizovat vnější, ale i vnitřní povrch objektu. S ohledem na způsob sběru informací jsou děleny na dotykové a bezkontaktní. [5]

Dotykové 3D skenery potřebují fyzický kontakt se skenovaným objektem. Nejrozšířenější jsou elektrokontaktní snímací systémy s využitím spínací nebo skenující sondy. Princip funkce spočívá v odečtení souřadnic na spínací sondě po uskutečnění dotyku povrchu skenovaného objektu. V případě, kdy se měření souřadnic provádí ve vybraných bodech, jedná se o diskrétní měření a je využito u spínacích sond. Skenující sondy navíc umožňují spojitě snímání v tzv. dynamickém režimu, díky tomu, že je měřicí hrot pomocí přítlaku neustále v kontaktu s povrchem měřeného objektu. [6]

Bezdotykové skenery nevyužívají přímého kontaktu se skenovaným objektem. Na rozdíl od dotykových skenerů mají většinou nižší časovou náročnost na skenování a hustější pokrytí povrchu objektu měřenými body v místech, kde se dotyková sonda obtížně dostane. Mezi jedny z nejrozšířenějších patří optické skenery pracující na principu fotogrammetrie. [6]

Rozdělení bezdotykových 3D skenerů podle použité technologie [6]:

- Optické skenery
- Laserové skenery
- Mechanické skenery
- Destruktivní skenery
- Ultrazvukové skenery
- Rentgenové skenery

Další rozdělení může být na stacionární a mobilní v závislosti na tom, zda je možné 3D skener libovolně přenášet ke skenovanému objektu či nikoli. Mezi mobilní se také řadí 3D skenery označované jako ruční. Důležité je také znát rozdělení na destruktivní a nedestruktivní, kdy výběr takového 3D skeneru je závislý na tom, zda je možné, či účelné skenovaný objekt zničit. [5]

### 2.1 3D SKENERY NA PRINCIPU FOTOGRAMMETRIE

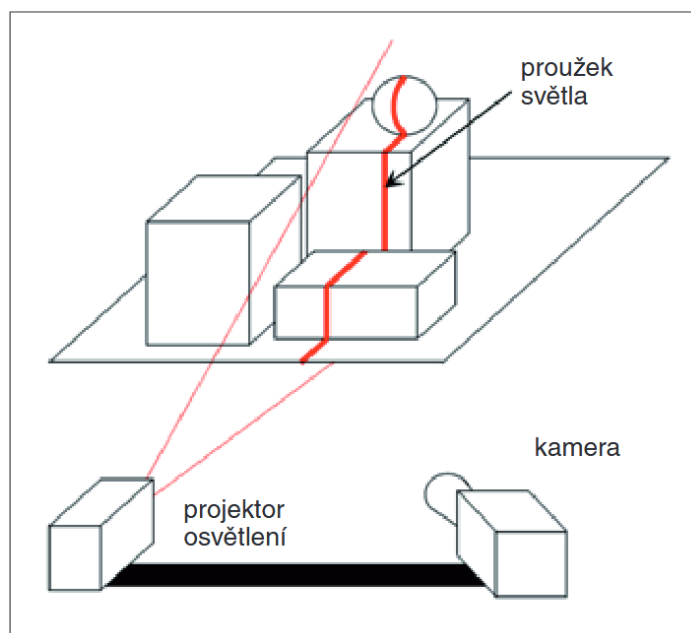
3D skenery na principu fotogrammetrie se řadí mezi optické skenery a je možné je rozdělit na přístroje využívající stereovidění, projekci rastru světla (tzv. strukturovaného světla), nebo jejich kombinaci. [3] Tyto přístroje mají veškeré zmíněné výhody bezkontaktních 3D skenerů. Jejich nevýhodou je obtížné zaznamenání objektů s lesklými, nebo průhlednými povrchy. Výstupem skenování je tzv. mračno bodů. Jedná se o shluk naměřených bodů, které mají určeny prostorové souřadnice a reprezentují skenovaný povrch. Dalším výstupem může být trojúhelníková síť, která je z mračna bodů vytvořena.

### 2.1.1 3D SKENERY NA PRINCIPU STEREOVIDĚNÍ

3D skenery využívající princip stereovidění jsou vybaveny minimálně dvěma, nebo i více kamerami a souřadnice povrchu skenovaného objektu jsou vypočteny na základě známých poloh těchto kamer. Nevýhodou je poměrně malá přesnost výstupů. Co se týče problematických povrchů dosahují lepších výsledků než skenery s projekcí světelného rastru. [3] Nicméně, pro transparentní povrchy je také nelze téměř využít.

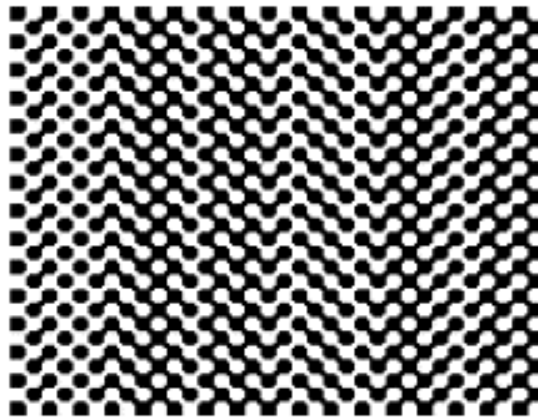
### 2.1.2 3D SKENERY NA PRINCIPU STRUKTUROVANÉHO SVĚTLA

3D skenery využívající projekci rastru (tzv. strukturované světlo) jsou vybaveny projektorem a kamerou viz *obr. 1*. V praxi jsou často konstruovány se dvěma kamerami pro zajištění větší přesnosti a možnosti globální orientace skeneru, která je popsána níže. Pracují na principu triangulace světelného rastru. Obraz rastru je zaznamenán kamerou a počítačově zpracován. Jako rastr je možné použít i jeden proužek, v praxi se používá sada proužků. Výsledkem skenování jsou prostorové souřadnice bodů v místě projekce strukturovaného světla v lokálním souřadnicovém systému. Aby bylo možné naskenovat větší část povrchu objektu, je nutné měnit polohu 3D skeneru vzhledem ke skenovanému objektu. Pro určení absolutní polohy 3D skeneru vzhledem k objektu je možné využít měřicí rameno, které snímá jeho polohu. To však omezuje pohyb 3D skeneru. Častěji se využívá tzv. referenčních bodů. Jedná se o rozměrově standardizované terče nalepené na povrch skenovaného objektu. Tento způsob je možné uplatnit, pokud je 3D skener vybaven alespoň dvěma kamerami. Zpracování snímků nejprve probíhá na základě principu stereovidění, kdy je pomocí referenčních bodů globálně určena poloha skeneru. Poté je proveden výpočet lokálních souřadnic z projekce strukturovaného světla, které jsou přepočteny do globálního souřadnicového systému. Tento způsob má nevýhodu v podobě hromadění nepřesností při pořízení více snímků, z důvodu transformace souřadnic do globálního systému, což je možné odstranit nejprve vytvořením 3D modelu ze snímků a získat tak globální souřadnice referenčních bodů. Méně přesným způsobem určení globálních souřadnic je s využitím křivosti samotného objektu. Uplatňuje se v situacích, kdy není možné na skenovaný objekt lepit referenční body. [3]



Obr. 1 3D skener využívající princip projekce strukturovaného světla [3]

Pro dosažení lepšího výsledku skenování se používá kódované strukturované světlo viz. *obr. 2*, které je považováno za jednu z nejspolehlivějších technik skenování povrchů. Kódovaný světelný vzor je promítnutý na povrch skenovaného objektu a po nasnímání kamerou porovnán s původním vzorem. Díky tomu lze snadno najít korespondence mezi body obrazu a promítaného vzoru. [7]



*Obr. 2 Příklad projekce strukturovaného kódu [7]*

### 2.1.3 PROBLÉMY PŘI SKENOVÁNÍ

Při skenování některých povrchů skenovaných objektů, mohou nastat problémy s odrazivostí světla od skenovaného povrchu. Jedná se především o objekty, jež jsou vyrobeny z transparentního materiálu, nebo mají lesklé či světlo pohlcující povrchy [8]. Řešením pak může být celá řada technik procesu skenování a vyhodnocení dat. Jedním z nich je využití speciálního algoritmu pro zpracování promítaného kódu odraženého z lesklého povrchu [9], projekce strukturovaného světla s vysokým dynamickým rozsahem [10], nebo světlo pohlcujících a lesklých částí povrchu s rozdílnou intenzitou ozáření každým promítaným pixelem zvlášť [11]. Tyto metody však nelze běžně použít pro komerčně vyráběné skenery, u kterých nelze standardně měnit algoritmy projekce, nebo zpracování výstupu snímaného obrazu. Z toho důvodu je nutné přistoupit na jiné metody, které zajistí precizní naskenování problematických povrchů. Řešením může být vytvoření speciálních povlaků na skenovaných objektech, které mají požadované vlastnosti odrazu světla.

### 2.1.4 MATNÍCÍ POVLAKY

Matnicí povlaky nanosené na skenovaný objekt dokáží zlepšit vlastnosti odrazu světla pro potřeby skenování, avšak za cenu snížení výsledné přesnosti skenu [8]. Povlak vytvořený na povrchu skenovaného objektu má určitou tloušťku, která však za použití konvenčních metod není v každém místě konstantní a nelze tedy vzniklou rozměrovou nepřesnost jednoduše odstranit. Průměrnou tloušťku nanosené vrstvy matnicího povlaku je možné odhadnout na základě použitého matnicího povlaku a metody jeho aplikace [12]. Z toho vyplývá, že při skenování objektu, u kterého je potřebné povrch zmatnit je důležité zamyslet se nad požadovanou přesností výsledného skenu a na základě této informace zvolit vhodný matnicí povlak a metodu aplikace.

Mezi nejčastěji používané patří křídové, titanové a sublimační povlaky. Je-li nutné uvést skenované objekty do původního stavu, pak mají křídové a titanové povlaky nevýhodu v podobě nutnosti čištění povrchů po skenování na které byly aplikovány. Čištění je standardně provedeno tkaninovým hadříkem, kartáčkem, mytím nebo je možné využít ultrazvukovou

čističku. V některých případech při použití titanového povlaku na pryžových, nebo drsných površích je velmi obtížné nanesený povlak odstranit. Proto je vhodné pro tyto povrchy využít sublimačních povlaků. [13]

### **KŘÍDOVÝ POVLAKE**

Nejběžnější typ matricího materiálu, který poskytuje dobré rozptylové vlastnosti světla. Výhodnou je relativně nízká cena oproti ostatním typům povlaků. Běžně jej lze koupit jako sprej již ve směsi s rozpouštědlem. Nevýhodou je vyšší tloušťka vrstvy, která dle výzkumu dosahovala 44  $\mu\text{m}$ . [12]

### **TITANOVÝ POVLAKE**

Tento typ matricího materiálu umožňuje vytvářet velmi tenké vrstvy ulpívající na skenovaném povrchu. Ze všech zde popisovaných typů povlaků je titanový povlak nejvhodnější pro přesné skenování. Dle výzkumu dosahovala tloušťka nanesené vrstvy na povrchu objektu 5  $\mu\text{m}$ . [12] Nevýhodou jsou možná karcinogenní rizika pro člověka [14] a poměrně vysoká cena. Oxid titaničitý je možné koupit jako prášek z kterého lze následně vyrobit směs pro nanesení na skenovaný povrch. Ve spreji jej běžně koupit nelze.

### **SUBLIMAČNÍ POVLAKE**

Sublimační povlaky bývají často na bázi cyklodekanu [15], nebo cyklopentanu [16]. Vytvořený povlak se po určité době z povrchu odpaří. Jejich výhoda spočívá v tom, že lze zmatněný povrch je po skenování velice jednoduše očistit a uvést do původního stavu.

Z výzkumu, který se zabýval sublimačními spreji různých typů a výrobců vyplývá různá doba sublimace jednotlivých sprejů. Ta se pohybovala od 60 minut po 444 minut. Tloušťky zkoumaných povlaků se pohybovaly v rozmezí 25  $\mu\text{m}$  až 43  $\mu\text{m}$  a závislosti na typu spreje a počtu aplikovaných vrstev povlaku, jejichž počet byl stanoven, tak aby povrch, na který byly aplikovány měl dostatečné optické vlastnosti pro skenování. Z hlediska tloušťky tak sublimační povlaky spadají mezi povlaky křídové a titanové. [13]

U sublimačních sprejů je nutné brát v potaz dobu sublimace a závislosti na skenovaném objektu z důvodu odpařování povlaku během skenování, což je zároveň jedna z nevýhod těchto povlaků.

### 3 DOSTUPNÉ 3D SKENERY NA PRINCIPU FOTOGRAMMETRIE

Na trhu se nachází celá řada 3D skenerů na bázi fotogrammetrie a častou jsou si velmi podobné. Níže jsou uvedeny pouze ty nejzajímavější.

#### 3.1 MOBILNÍ 3D SKENERY

Uvedené dostupné 3D skenery se řadí mezi mobilní. Ke každému skeneru jsou uvedeny informace prezentované výrobcem přístroje. Cenu některých přístrojů pro Českou republiku bylo obtížné získat a proto je uvedena přibližná cena zjištěná ze zahraničního prodeje.

##### 3.1.1 ATOS Q

Jedná se o mobilní optický 3D skener od firmy GOM, pracující na principu projekce strukturovaného světla. Vzhled přístroje je zobrazen na *obr. 3*. Pro projekci je využíváno ekvalizéru modrého světla, díky kterému je zajištěna vysokorychlostní projekce. [17] Jeho použití je univerzální od vývoje a ověření prototypů až po výstupní kontrolu kvality finální produkce. Skener je určen pro skenování malých a středně velkých objektů. Změnu rozsahu skenovaného objemu, lze provést výměnou objektivů. [18] Výrobce uvádí odolnost skeneru proti prachu a stříkající vodě. ATOS Q umožňuje automatizaci procesu připojením rotačního stolu, nebo jej lze umístit na robotické rameno Gom SanCobot a dosáhnout tak plné automatizace. Přístroj se vyrábí ve dvou variantách s odlišnými specifikaci viz *tab. 1* [17]



*Obr. 3 3D skener ATOS Q [27]*

Tab. 1 Specifikace 3D skeneru ATOS Q [17]

Parametry	ATOS Q	
	8M	12M
Počet bodů na sken	8 milionů	12 milionů
Rozlišení [mm]	0,04 – 0,15	0,03 – 0,12
Hmotnost [kg]	4	4
Měřicí objemy	100; 170; 270; 350; 500	100; 170; 270; 350; 500
Rozměry přístroje [mm]	340 x 240 x 83	340 x 240 x 83
Odhadovaná cena [19] [Kč]	1 milion	

### 3.1.2 ATOS COMPACT SCAN

Jedná se o starší mobilní 3D skener od firmy GOM, pracující na principu modrého strukturovaného světla. Vzhled přístroje je zobrazen na *obr. 4*. Projekce probíhá v úzkých pásech, což umožňuje odfiltrovat okolní světlo při skenování. Podle volby měřícího objemu je nutné měnit objektivy a rameno na kterém jsou kamery umístěny. [20] Model ATOS Compact Scan 2M byl využit v praktické části bakalářské práce. Za nejnovějšího nástupce tohoto skeneru je možné považovat ATOS Q. Přístroj se vyrábí ve dvou variantách s odlišnými specifikaci viz *tab. 2*.



Obr. 4 3D skener ATOS Compact Scan 2M

Tab. 2 Specifikace 3D skeneru ATOS Compact Scan [21]

Parametry	ATOS Compact Scan	
	2M	5M
Počet bodů na sken	2 miliony	5 milionů
Rozlišení [mm]	0,021 – 0,615	0,017 – 0,481
Hmotnost [kg]	4	
Měřicí objemy	35 - 1000	40 - 1200
Rozměry přístroje [mm]	340 x 130 x 230	
Cena [Kč]	-	

### 3.1.3 SHINING 3D TRANSCAN C

3D skener využívá strukturovaného světla a umožňuje skenování malých a středně velkých objektů. Podle toho má nastavitelný rozsah skenování. Umožňuje plynule přepínat mezi třemi úrovněmi rozlišení a dokáže vytvářet texturované modely. [22] Vzhled přístroje je zobrazen na obr. 5. Technické specifikace přístroje jsou uvedeny v tab. 3.



Obr. 5 3D skener Shining 3D Transcan C [29]

Tab. 3 Specifikace 3D skeneru Shining 3D Transcan C [22]

Parametry	Shining 3D Transcan C
Rozlišení [mm]	0,035 – 0,500
Barevnost textury	RGB, 24 bit
Hmotnost [kg]	2,7
Rozsah snímaných předmětů [mm]	150 x 96 – 300 x 190
Rozměry přístroje [mm]	332 x 110 x 142
Cena [Kč]	133 000

### 3.1.4 SEAL 3D

Tento 3D skener od firmy 3D MakerPro zaujme především svojí cenou. Využívá principu modrého strukturovaného světla a prodává se ve dvou verzích Seal a Seal Lite. První zmíněná umožňuje vytvářet síťový model s barevnou texturou. Snímače mají optickou stabilizaci, která zamezuje negativním vlivům vzniklých z otřesů při skenování. [23] Vzhled přístroje je zobrazen na obr. 6. Příklad se vyrábí ve dvou variantách s odlišnými specifikacemi viz tab. 4. Parametry tohoto skeneru jsou velice zajímavé, nicméně by bylo vhodné tento skener otestovat a zjistit skutečné hodnoty, například o dosažené přesnosti. Oproti výše zmíněným 3D skenerům bude nalézat využití spíše pro hobby skenování, případně pro nenáročné účely u kterých není prioritní vysoká kvalita získaných dat.



Obr. 6 3D skener Seal 3D Lite [28]

Tab. 4 Specifikace 3D skeneru [23]

Parametry	Seal 3D Scanner	
	Seal	Seal Lite
Počet bodů na sken	100 000	
Rozlišení [mm]	0,05	0,07
Přesnost [mm]	0,01	0,02
Hmotnost [kg]	0,254	0,226
Rozsah snímaných předmětů [mm]	10 – 300	
Rozměry přístroje [mm]	110 x 60 x 35	
Zjištěná cena [Kč]	16 500	8 400

## 3.2 RUČNÍ 3D SKENERY

Oproti mobilním 3D skenerům, které jsou často umístěny na stativu, nebo nějakém druhu podstavce jsou ruční 3D skenery drženy přímo v ruce operátora, který provádí skenování.

### 3.2.1 SHINING 3D EINSCAN HX

Tento skener je zajímavý v tom, že kombinuje princip promítání modrého strukturovaného světla a laseru, což by mělo podle uvedených informací přinést lepší výsledky skenování tmavých i reflexních povrchů. Skener umožňuje zachytit plnobarevnou texturu povrchu. [24] Vzhled přístroje je zobrazen na *obr. 7*. Technické specifikace přístroje jsou uvedeny v *tab. 5*.



*Obr. 7 3D skener Shining 3D EinScan HX [24]*

*Tab. 5 Specifikace 3D skeneru Shining 3D EinScan HX [24]*

Parametry	Shining 3D EinScan HX	
	Strukturované světlo	Laser
Počet bodů na sken	1,2 milionu	0,48 milionu
Přesnost snímání [mm]	-	0,04
Rozlišení [mm]	0,05	-
Hmotnost [kg]	0,71	0,71
Rozměry přístroje [mm]	108 x 110 x 237	
Zjištěná cena [Kč]	300 000	

## 4 SKENOVÁNÍ STROJNÍ SOUČÁSTI

Skenovanou součástí je žebrovaná hlava válce ČZ 125 Scott. Cílem je vytvoření skenu a následně CAD modelu pro účely nové výroby. Z CAD modelu má být vytvořena nová součást pomocí SLA 3D tiskárny a z ní vytvořena negativní forma pro finální výrobu. Výsledkem má být odlitek z blíže nespecifikované slitiny. Výroba nové strojí součásti není předmětem této práce, ale pro správné zpracování CAD modelu je znalost budoucího technologického postupu výroby důležitá. Očekávaná přesnost byla specifikována přibližně na 1 mm oproti původnímu skenu.

### 4.1 KALIBRACE

Podle velikosti skenované součásti byl v návodu k přístroji [25] vybrán příslušný měřicí objem 3D skeneru. Jednalo se o objem označen jako „250“. Nastavení 3D skeneru proběhlo podle pokynů pro tento objem. Po sestavení 3D skeneru a umístění na stojan bylo provedeno jeho zahřátí, které trvalo přibližně 30 minut. Pro kalibraci byla využita kalibrační deska s označením CP40/MV320 s ohledem na aktuální konfiguraci 3D skeneru, měřený objem a byla provedena kontrola certifikátu a kalibračních údajů. Kalibrační deska je zobrazena na *obr. 8* a skládá se z černě vyznačených kruhových bodů se standardizovanými rozměry umístěných na bílém podkladu. Během procesu kalibrace byla po celou dobu kalibrační deska v ochranném kufru z důvodu zamezení poškození.



*Obr. 8 Kalibrační deska CP40/MV320 umístěna v přenosném kufru*

Prvně byl přístroj umístěn nad kalibrační desku v požadované vzdálenosti 570 mm a byla upravena poloha kamer, tak aby svíraly požadovaný úhel. Toho bylo dosaženo hrubou úpravou pozice kamer, tak aby se kříž promítaný projektorem 3D skeneru kryl s elektronickým křížem na obrazovce připojeného počítače. Dále bylo nutné seřadit promítané laserové body, které určují střed měření. Správné nastavení odpovídá tomu, že se pravý i levý bod překrývají a

směřují na středový promítaný kříž. Nastavení bylo provedeno pomocí regulačních šroubů umístěných na obou stranách spodní části přístroje. Následně proběhl samotný proces kalibrace dle průvodce v softwaru, pomocí kterého byl skener ovládán. Jednalo se o zachycení několika snímků kalibrační desky v předem definovaných pozicích a v požadované vzdálenosti. Výsledkem byl kalibrační protokol viz *tab. 6*. Naměřené hodnoty nepřekračují mezní odchylku.

*Tab. 6* Výsledky kalibrace

Calibration Result	[Pixels]
Calibration deviation	0,022
Calibration deviation (optimized)	0,013
<b>Calibration deviation (limit value)</b>	<b>0,045</b>

## 4.2 PŘÍPRAVA NA SKENOVÁNÍ

S ohledem na použitý materiál strojní součásti bylo možné předpokládat problémy při skenování v podobě vytváření odlesků. Z toho důvodu byl využit antireflexní sprej MR 2000 Anti-reflex L na bázi křídového povlaku, který zajistil snížení odrazivosti světla od povrchu, čímž byly dosaženy lepší optické vlastnosti povrchu a lepší výsledek skenování. Aplikovaný povlak na hlavě válce je okem viditelný na *obr. 9*. Tloušťka vytvořeného povlaku byla s ohledem na požadavek přesnosti zanedbatelná. Po tomto kroku bylo na skenovanou součást nalepeno pět referenčních bodů o průměru 3 mm. Tyto referenční body zajistily správnou transformaci fotografií zachycujících spodní část strojní součásti.

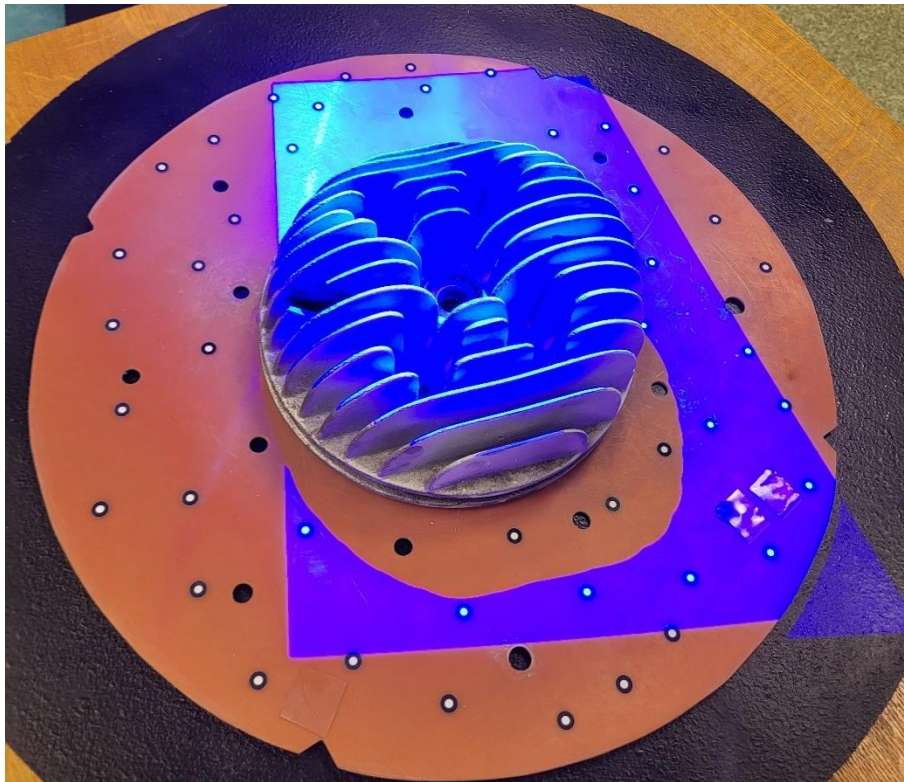


*Obr. 9* Aplikace křídového povlaku na hlavu válce

### 4.3 SKENOVÁNÍ

Při skenování bylo dbáno na to, aby byla skenovaná součást zachycena co nejvýstižněji a na nejméně snímcích, z důvodu snižující se přesnosti při pořízení velkého počtu snímků. Během skenování byla součást umístěna na otočném stole, kde podkladem byla kruhová deska s již umístěnými referenčními body. Prvně byla naskenována část povrchu s nalepenými referenčními body, které skener automaticky vyhodnotil a určil jejich polohu v projektu. Průběh skenování byl koncipován tak, že skener byl umístěn do statické pozice a následně bylo otáčeno s otočným stolem, na kterém byla umístěna skenovaná součást v určitém pravidelném intervalu. Následně byla poloha 3D skeneru měněna dle výsledků skenování, které bylo možné vidět na obrazovce připojeného počítače, tak aby byly zachyceny potřebné detaily strojní součásti. V některých případech bylo nutné změnit dobu expozice ručně, aby bylo možné naskenovat povrchy součásti, které kvůli nevhodně nastavené době expozice nebyly řádně naskenovány.

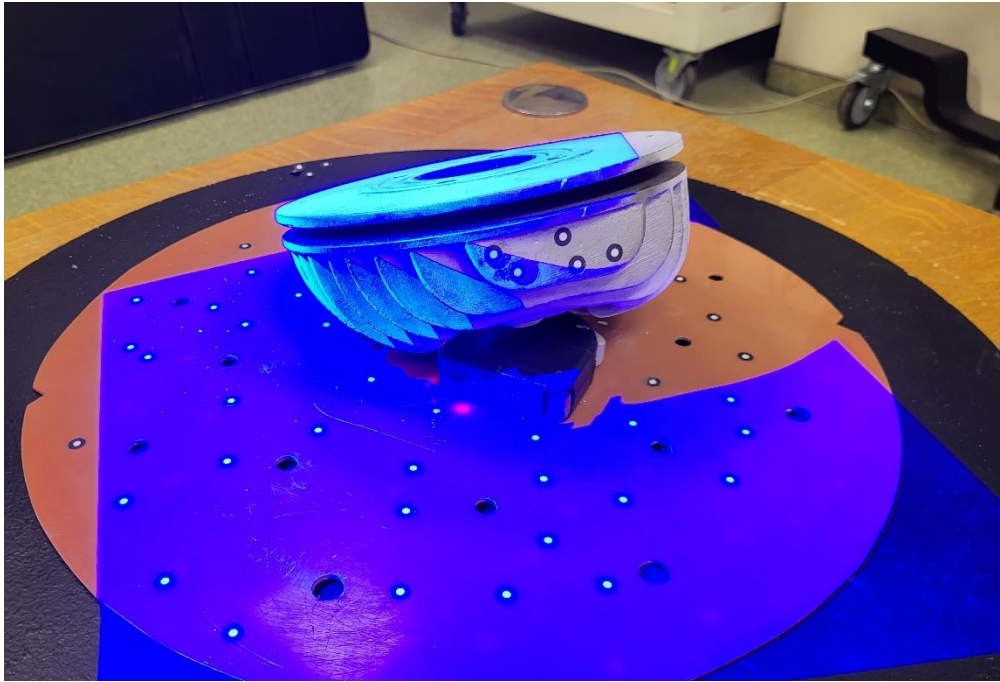
Během skenování nastal problém se zaměřením některých žebrování. Po několika dalších pokusech o doskenování tohoto prostoru, což zahrnovalo opět změnu pozic a polohy otočného stolu bylo rozhodnuto skenování ukončit a provést preciznější aplikaci křídového povlaku s důrazem na nanesení v problémových místech mezi jednotlivými žebry. Původní snímky byly z projektu odstraněny a skenování bylo zahájeno nově s totožným postupem, během kterého se již všechny potřebné části podařilo zdárně naskenovat.



Obr. 10 Skenování části hlavy válce označené jako „horní“

Po naskenování „horní“ části s žebry viz obr. 10, následovalo otočení součásti a kruhové desky na které byly referenční body nalepené i z opačné strany. Důvodem otočení kruhové desky bylo to, že by software mohl být zmaten tím, že součást byla otočena a referenční body na původně skenované straně desky by byly pořád na stejném místě a mohl by takto pořízené snímky nesprávně vyhodnotit. Skenování v této pozici, označené jako „dolní“ (viz obr. 11) bylo

zahájeno snímky, na kterých lze identifikovat referenční body kvůli napojení skenování na první část. Následovalo skenování stejným postupem jako horní část s žebry, přičemž výsledný sken byl již vyhodnocen jako dostatečný a nebylo nutné skenování opakovat. Po naskenování bylo provedeno odstranění okolních předmětů, nebo jejich části které vytvářely určitý šum na skenu a výsledný sken byl přepočítán. Závěrem byl sken exportován a uložen ve formátu STL.



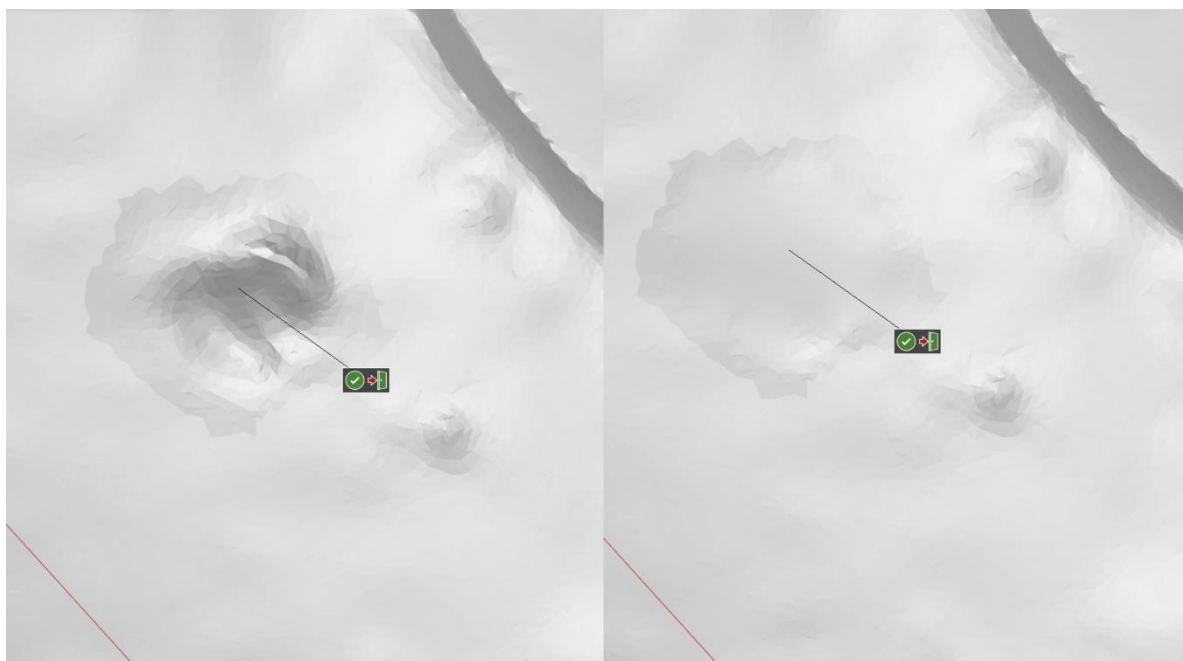
*Obr. 11 Skenování části hlavy válce označené jako „dolní“*

## 5 ZPRACOVÁNÍ SKENU

Zpracování skenu proběhlo ve třech krocích. V prvním byl sken vyhodnocen v programu GOM Inspect. Druhý krok se věnoval vytvořením CAD modelu strojní součásti v programu Autodesk Inventor a v kroku třetím byl tento CAD model porovnán s původním skenem v programu GOM Inspect.

### 5.1 VYHODNOCENÍ SKENU V PROGRAMU GOM INSPECT 2019

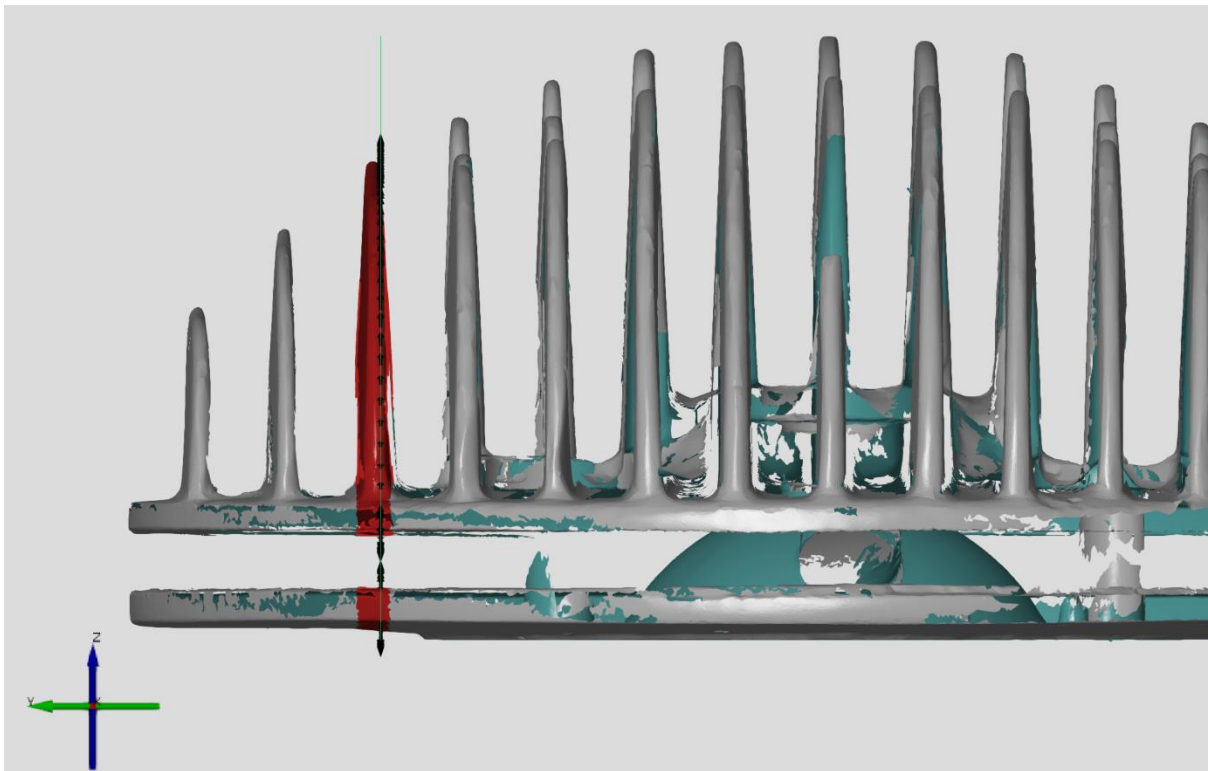
Prvním krokem po importu skenu do prostředí GOM Inspectu byla editace trojúhelníkové sítě. Byly odstraněny hrubé nerovnosti (viz *obr. 12*), které vznikly vlivem chyb při skenování, nebo se jednalo o skutečné nerovnosti (např. usazené nečistoty, poškození) na součásti a pro vytvoření CAD modelu byly nežádoucí. Následovalo vyhlazení trojúhelníkové sítě celé součásti, tak aby byly odfiltrovány jemné nerovnosti na povrchu v rozsahu 0,4 mm. Po tomto kroku již bylo možné vytvářet základní geometrie (rovina, koule, válec atd.) uchycením na trojúhelníkovou síť. Vybrané geometrie pak sloužily pro tvorbu souřadnicového systému. Vrchol souřadnicového systému prochází dosedací rovinou spodního disku. Osa Z byla zvolena, tak aby procházela středem kulového otvoru, který tvoří spalovací prostor a zároveň byla umístěna v ose středové díry, která plní účel usazení svíčky. Osa X byla zvolena rovnoběžně se středovými rovinami žeber.



*Obr. 12 Levá část zobrazuje povrch před editací, pravá po editaci*

Následně byly vytvořeny další geometrie, které jsou na souřadnicovém systému závislé. Jednalo se například o díry, které byly uvažovány tak, že mají své osy rovnoběžné s osou středové díry, tedy s osou Z. Rovina horního disku v místě vetknutí žeber byla uvažována, tak že její normála je rovnoběžná s osou Z. Další roviny disku jsou s touto rovinou rovnoběžné a usazené na trojúhelníkovou síť podle skutečného průběhu. Průběh žeber byl vyřešen tak, že do osy každého žebra byla vložena rovina, rovnoběžná s rovinou XY a profil žebra byl do této

roviny promítnut viz *obr. 13*. Pokud by byl vytvořen pouze řez v těchto rovinách, nebyl by průběh žebra zachycen zcela přesně, protože je středová rovina vytvořena jako rovnoběžná a neprochází skutečnou středovou rovinou, což by způsobilo odchylky, které by vytvářely značné chyby v geometrii profilu žebra. Závěrem byly vytvořené geometrie vyexportovány ve formátu IGES.



*Obr. 13* Vytvoření průmětu žebra (označeno červeně) do roviny (zelená úsečka). Černé šipky zobrazují normály promítnutých křivek

## 5.2 TVORBA CAD MODELU V PROGRAMU AUTODESK INVENTOR

Do programu Inventor byly naimportovány geometrie (viz *obr. 14*) vytvořené v předchozím kroku spolu s editovanou trojúhelníkovou sítí, která sloužila pro kontrolu a konstrukci dalších prvků. Při importu byl zachován souřadnicový systém importovaných prvků, což usnadnilo následné modelování. Prvky, které reprezentují strojní součást byly modelovány se zaokrouhlením naměřených hodnot na desetinu milimetru. Hodnoty rozměrů byly získány pomocí funkce měření. Výsledný model byl konstruován s ohledem na technologii nové výroby, proto nejsou některé geometrie získané ze skenu v modelu uvažovány. Jedná se například o díry, které slouží pro uchycení hlavy válce, nebo zápichy na dosedací ploše u kterých je předpoklad, že budou vytvořeny při obrábění odlitku.



Obr. 14 Importované geometrické prvky do programu Inventor

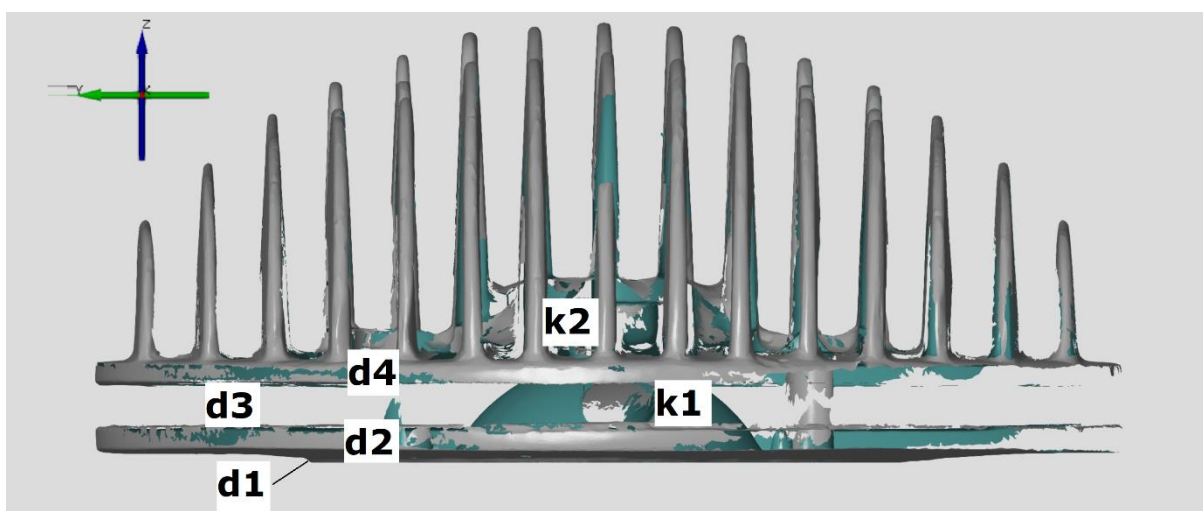
### 5.2.1 TVORBA DISKŮ

Označení disků začíná písmenem  $d$  je zobrazeno na obr. 15. Kulové plochy jsou označeny písmenem  $k$ . Rozměry disků  $d2$  a  $d4$  jsou uvažovány za shodné a byly zjištěny z rovin které tyto disky tvoří a z průměru obalového válce. Protože průměr disku  $d3$  nebylo možné určit ze skenu, byl uvažován za shodný s diskem  $d1$ .

Prvně byla vymodelována dosedací plocha hlavy válce s označením  $d1$ . Její průměr byl zjištěn vytvořením kružnice v rovině této plochy a umístěním podle skutečného průběhu na trojúhelníkovou síť. Tloušťka a hodnota úkosu na okraji byla zjištěna vektorizací řezu skenu vedeného rovinou XZ. Protože je dosedací plocha uvažována jako funkční, byl k tloušťce disku  $d1$  připočten přírůstek, jehož hodnota byla určena z níže uvedeného vztahu (1).

$$p = 0,05 D_{max} + 2 \text{ [mm]} \quad (1)$$

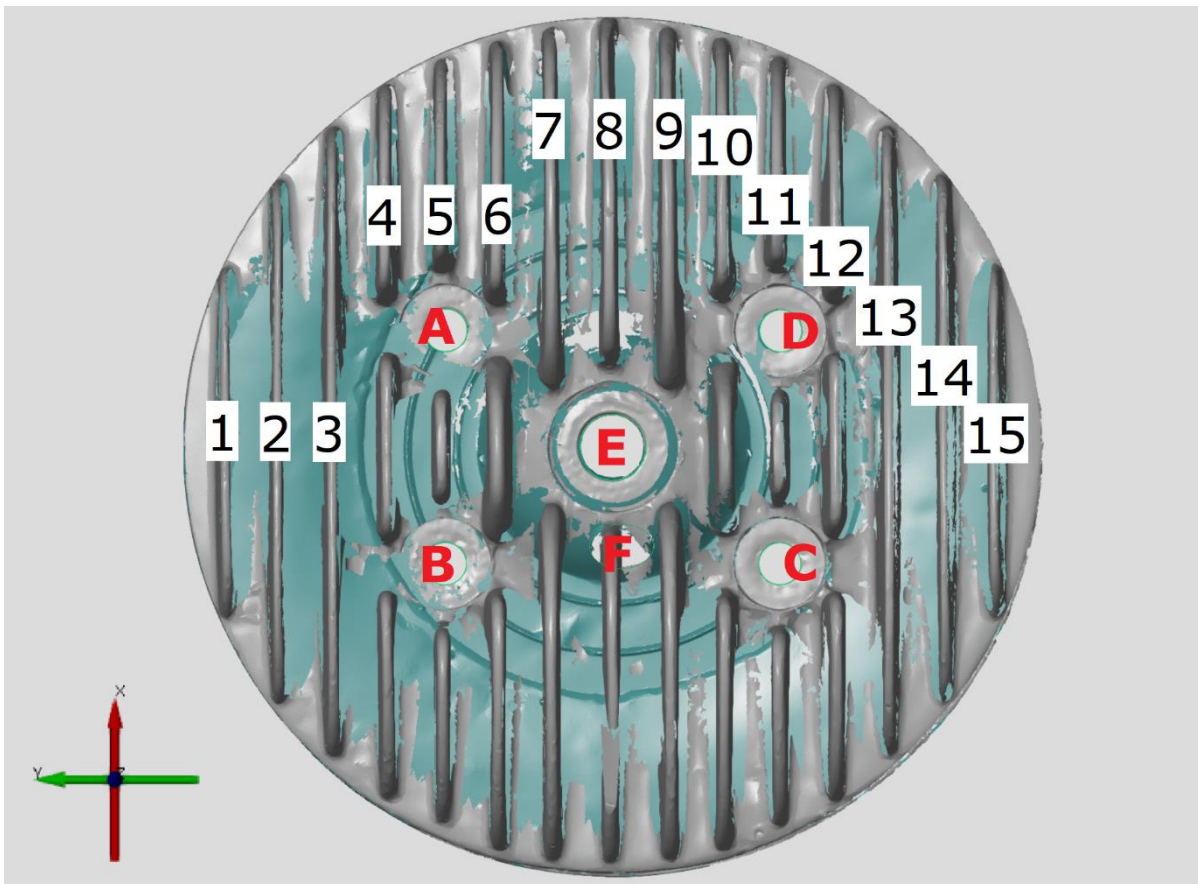
kde  $p$  je hodnota přírůstku a  $D_{max}$  značí průměr nebo tloušťku součásti. Po zaokrouhlení byl připočten přírůstek materiálu v hodnotě 2 mm.



Obr. 15 Naskenovaná hlava válce s označením některých geometrických prvků

### 5.2.2 TVORBA ŽEBER

Nejsložitějším úkolem při modelování byla tvorba žebor. Na součásti se nachází celkem 15 žebor sloužících pro odvod tepla a zamezení přehřátí hlavy válce. Žebra nesou pracovní označení 1 až 15 viz. obr. 16. Dírky jsou na obrázku označeny červenými písmeny. Žebro s označením 8 obsahuje výřez pro umístění dekompresoru, který byl pravděpodobně vytvořen frézováním, proto není v modelu uvažován.



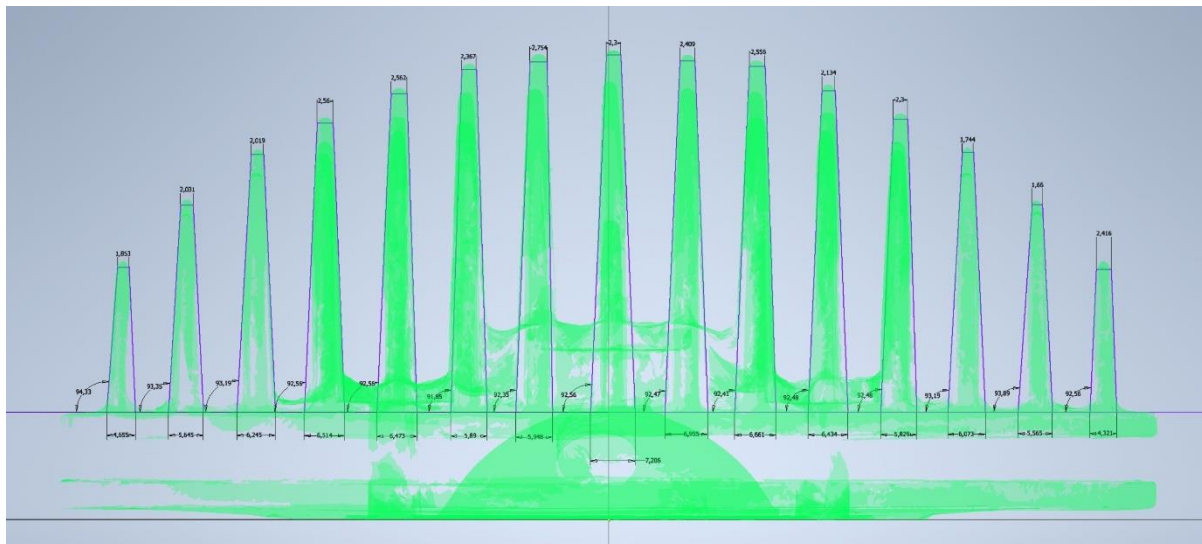
Obr. 16 Označení žebor a děr na hlavě válce

Žebra jsou symetrická vůči rovině XZ, čehož bylo využito při jejich konstrukci. Prvně byla vytvořena žebra 1 až 8 a z nich symetricky překopírována druhá část žebor.

Vzdálenosti mezi středovými rovinami žebor byly uvažovány jednotně s hodnotou 11,35 mm. Tato hodnota byla získána jako podíl vzdálenosti mezi středovými rovinami žebra 1 a 15 počtem mezer, kterých je na součásti 14. Samotná žebra byla vytvořena za pomoci řezů vytvořených v GOM Inspectu, u kterých bylo nutné opravit geometrii, protože obsahovala chyby (křivky nebyly spojitě, geometrie neodpovídala hladkému průběhu žebra atd.). Geometrie křivek řezů byly nejprve promítnuty do rovinného náčrtu, v kterém byly následně opraveny tak, aby vystihovaly skutečný průběh co nejvěrněji. Z těchto náčrtů vznikla nástrojem vysunutí prvotní tělesa žebor.

Na žebrech se nachází technologický úkos, jehož průměrná hodnota  $2,5^\circ$  byla určena pomocí vektorizace trojúhelníkové sítě vytvořením náčrtu v rovině YZ viz obr. 17. Tloušťka žebor byla určena průměrem z naměřených hodnot ve vrcholné části žebor, v místě vytvořeného rádiusu.

Hodnoty naměřených tloušťek měly poměrně velké rozmezí od 1,7 mm po 2,7 mm. Výsledná průměrná tloušťka byla stanovena jednotně na jmenovitý rozměr 2,2 mm. Úkos byl u každého žebra konstruován z jeho vrcholové části směrem k vetknutí. Rádus na vrcholové křivce žebra byl uvažován a ohledem na měnící se tloušťku a je proměnlivý se změnou souřadnice Z.



Obr. 17 Vektorizace žeber (fialové linie) s pozadím trojúhelníkové sítě (zeleně)

Protože bylo přistoupeno ke zjednodušení v podobě stejné jmenovité tloušťky všech žeber stanovených v jejich vrcholu na 2,2 mm a ke stejným vzdálenostem mezi středovými rovinami, vznikla nedokonalost modelu v podobě přechívání některých žeber mimo oblast vetknutí na horním disku  $d4$ . Jako řešení bylo zvoleno posunutí těchto žeber, tak aby byly umístěny na ploše disku s tím, že byl zachován stejný rozstup mezi všemi žebry a byla překontrolována geometrie v řezu žeber. Chybná geometrie se v jednom případě potvrdila, a byla provedena náprava. Největší rozdíl dosahoval 0,36 mm.

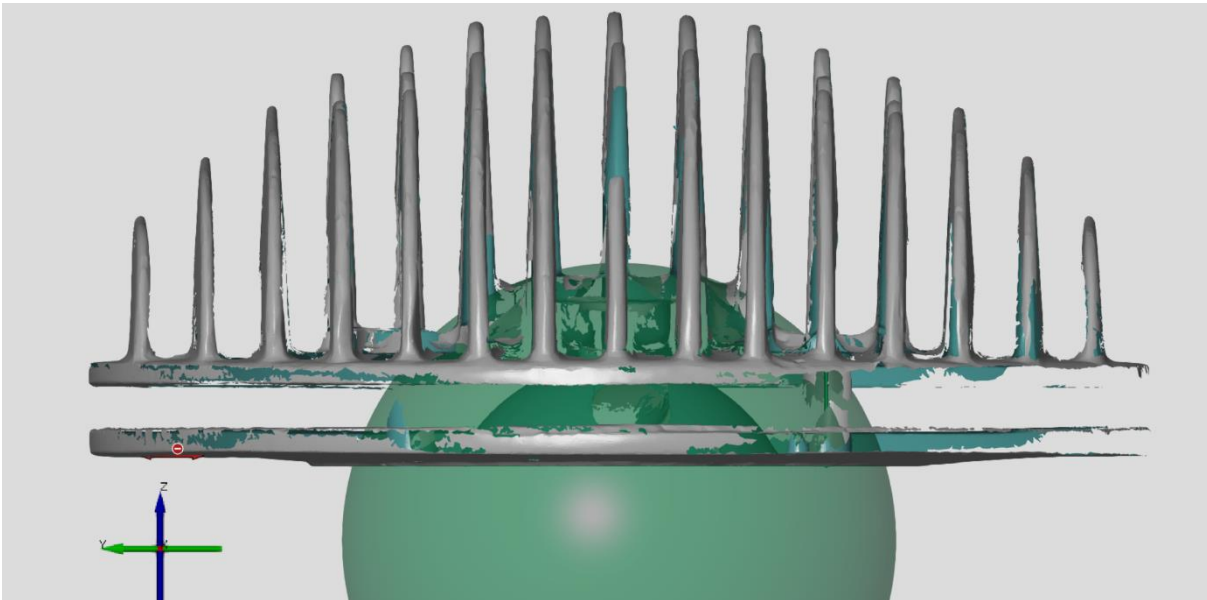
Aby bylo možné zhodnotit, zda je postup uvažování jednotných rozměrů opodstatněný bylo nutné zamyslet se nad tolerancemi pro použitou technologii. Přesný technologický postup výroby hlavy válce nebyl znám. Výroba pravděpodobně probíhala metodou lití lehké slitiny do pístu s využitím ručního formování. Pro přibližnou představu dovolených tolerancí u obdobné technologie byl využit podpůrný materiál k normě ISO 8062-3 [26]. Pro jmenovitý rozměr do 10 mm je udávána tolerance 1,5 – 4,2 mm podle použitého stupně. Jmenovitý rozměr 10 – 16 mm odpovídá toleranci 1,6 – 4,4 mm podle použitého stupně. Z uvedeného vyplývá odůvodnění pro využití jednotných rozstupů a tloušťek žeber, které svými rozdíly spadají do těchto tolerancí.

Tyto rozdíly jsou vzhledem k použité technologii a požadované přesnosti výstupu přijatelné. Protože u žeber došlo k vytvoření dalších odchylek v podobě zjednodušení (tj. stejná tloušťka a rozstup) je důležité na tyto žebra brát zřetel při výsledném porovnání CAD modelu a 3D skenu.

### 5.2.3 TVORBA SPALOVACÍHO PROSTORU A KULOVÉHO ZAOBLNÍ V OBLASTI ŽEBER

V místě středové díry pro svíčku se nachází vystoupení materiálu (viz obr. 18) v podobě kulového zaoblení označené jako  $k2$ , které vyčnívá do oblasti žeber a zvyšuje množství

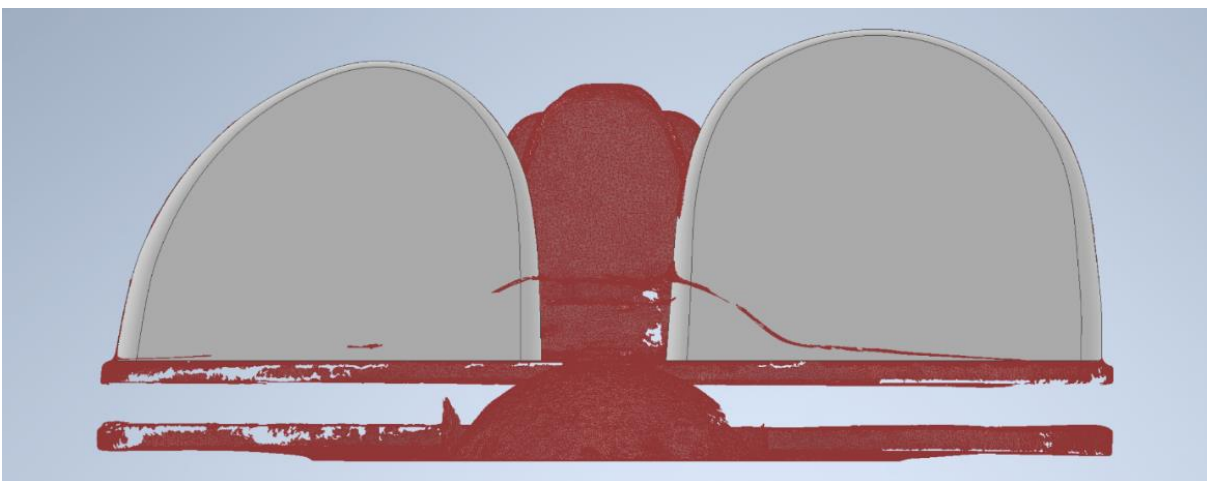
materiálu. Rozměry zaoblení byly určeny uchycením koule na povrch, který lze považovat za zaoblený. Střed koule byl považován jako totožný s koulí  $k1$ , která byla využita pro konstrukci kulového spalovacího prostoru. Výsledkem je průnik vzniklé koule s rovinou disku v místě vetknutí žeber.



Obr. 18 Sken spolu s uchycenou koulí v místě kulového zaoblení

Na horním disku  $d4$  je pozorován úkos v horizontálním směru viz obr. 19, který vychází od okrajů disku směrem do středu osy  $Z$ . Hodnota úkosu  $3^\circ$ , byla zjištěna vektorizací trojúhelníkové sítě v řezu, která byla pro lepší orientaci obarvena červeně. Konstrukce úkosu byla provedena vytvořením nového tělesa ve tvaru kužele, kdy jeho osa byla totožná s osou  $Z$  a podstava umístěna na horním disku  $d4$  v místě vetknutí žeber. Průměr podstavy kužele byl uvažován za shodný s jednotnými průměry disků  $d4$  a  $d2$ .

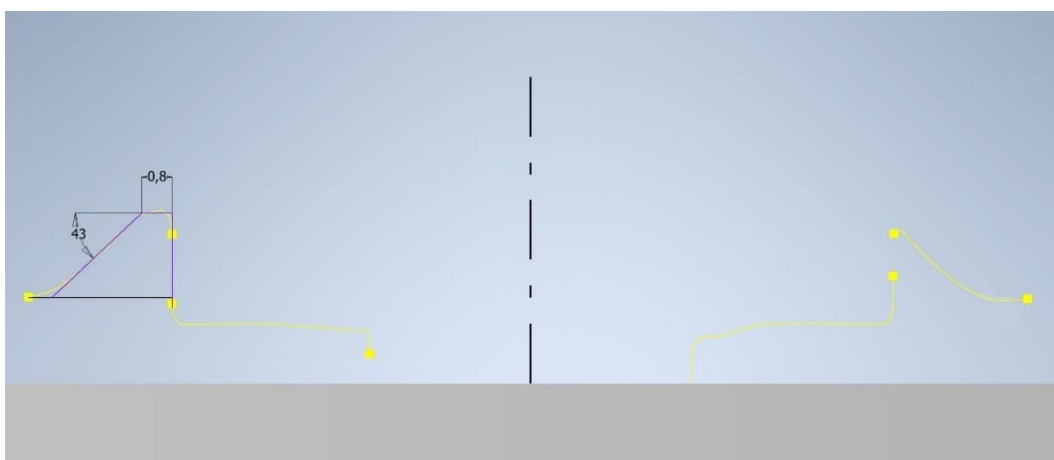
Hodnota rádiusu přechodu mezi úkosem a kulovým zaoblením byla stanovena na 12 mm. Kulová plocha spalovacího prostoru byla jednoduše vytvořena průnikem její koule s ostatními prvky modelu.



Obr. 19 Řez trojúhelníkovou sítí (červeně) spolu s již vymodelovaným žebrem (šedě)

### 5.2.4 TVORBA DĚR

Díry s označením *A – E* byly reprezentovány válci s osami rovnoběžnými s osou *Z* v programu GOM Inspect. S ohledem na výrobu nové součásti je v programu Inventor vytvořen model se zaslepením těchto děr, a jsou zde umístěny přídatky pro následné obrobení. Díra *E* není na modelu vůbec vyhodnocena. Díra s označením *F* je konstruována také jako slepá a na součásti plní funkci uchycení dekompresoru. Díry *A – D* jsou vyhodnoceny jednotným způsobem a jejich rozteč je dána zaokrouhlenou hodnotou rozteče díry *D*. Výška vystoupení lemu díry nad rovinu vetknutí žebër dosahuje 4,8 mm. Šířka a úkos okraje jsou stanoveny z řezu dírou *D*, která je zobrazena na *obr. 20*. Šířka okraje dosahuje hodnoty 0,8 mm, což bylo shledáno jako nedostatečné pro použítou technologii výroby a hodnota byla zvýšena o přídavek 1 mm po provedení výpočtu viz rovnice (1).



*Obr. 20* Řez vedený dírou *D* s kótami v milimetrech a stupních. Průběh řezu (žlutá), vymodelovaný disk *d4* (šedá), vektorizovaný průběh (fialová).

Hodnoty rozměrů děr jsou uvedeny v *tab. 7*. Vybrané díry byly kontrolně přeměřeny posuvným měřidlem. Nejvyšší rozdíl dosáhl hodnoty 0,3 mm, Tato odchylka je převážně způsobena nepřesným uchycením geometrie válce, který reprezentuje díru na trojúhelníkovou síť, protože se v dírách nenachází dostatek trojúhelníků na uchycení. Díry, u kterých je převládající délkový rozměr vzhledem k průměru je obecně složité naskenovat dostatečně.

*Tab. 7* Hodnoty vybraných rozměrů hlavy válce

Název geometrie	Průměr díry [mm]		Průměr zahloubení [mm]
	Hodnota ze skenu	Hodnota zjištěna posuvným měřidlem	
A	8,8	8,5	19,0
B	8,7		19,1
C	8,7		19,0
D	8,7		19,0
E	13,6	-	-
F	12,9	12,7	-



## ZÁVĚR

V bakalářské práci je uvedeno několik 3D skenerů pracujících na bázi strukturovaného světla spolu s jejich specifikacemi. Jejich použití je velice závislé na konkrétním účelu a podmínkách skenování, nad kterými je nutné se vždy předem zamýšlet. V praktické části je výsledkem CAD model hlavy válce motocyklu ČZ 125 Scott, který vznikl na základě pořízeného skenu. Tento CAD model byl v závěru práce porovnán s původním skenem. Dosažené rozdíly se pohybovaly převážně v okolo 1 mm, avšak v některých místech dosahovaly hodnoty větší než 3 mm. Vzhledem k použité technologii výroby součásti jsou tyto rozdíly přijatelné a důležitější bylo zachytit součást tak, aby byly jednotlivé prvky rozměrově jednotné a geometricky vystihovaly idealizovanou součást tzn. bez vzniklých deformací, nebo nepřesností z výroby.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] WANG, Wego. *Reverse engineering: technology of reinvention*. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN 978-1-4398-0630-2.
- [2] PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 10*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01863-6.
- [3] MENDŘICKÝ, Radomír a KELLER, Petr. 3D skenery pro použití v průmyslu. online. *Automa: odborný časopis pro automatizační techniku*. roč. 2015, č. 12, s. 34-37. ISSN 1210-9592. Dostupné z: [https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/54325.pdf](https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/54325.pdf). [cit. 2024-05-17].
- [4] GOM GMBH. *GOM\_Brochure\_ATOS\_CompactScan\_EN.pdf*. 2020. Dostupné také z: [https://scanare3d.com/wp-content/uploads/2020/07/GOM\\_Brochure\\_ATOS\\_CompactScan\\_EN.pdf](https://scanare3d.com/wp-content/uploads/2020/07/GOM_Brochure_ATOS_CompactScan_EN.pdf).
- [5] ŠIMONÍK, Martin. Digitalizace - její princip a rozdělení. online. *MM průmyslové spektrum*. roč. 2004, č. 6. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni>. [cit. 2024-04-17].
- [6] ČEPOVÁ, Lenka a PETŘKOVSKÁ, Lenka. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN isbn978-80-248-2514-4.
- [7] SALVI, Joaquim; PAGÈS, Jordi a BATLLE, Joan. Pattern codification strategies in structured light systems. online. *Pattern recognition*. 2004, roč. 37, č. 4, s. 827-849. ISSN 0031-3203. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2003.10.002>. [cit. 2024-05-17].
- [8] FRANKE, Jakub. *Studium možností zmatňování povrchu pro účely 3D skenování*. online. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2020. Dostupné také z: <https://dspace.vut.cz/server/api/core/bitstreams/8076d90e-3aff-46f8-ad9d-10995e76c2ab/content>.
- [9] CHEN, Bo a ZHANG, Song. High-quality 3D shape measurement using saturated fringe patterns. online. *Optics and lasers in engineering*. 2016, roč. 87, s. 83-89. ISSN 0143-8166. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.04.012>. [cit. 2024-03-18].
- [10] ZHAO, Huijie; LIANG, Xiaoyue; DIAO, Xiaochun a JIANG, Hongzhi. Rapid in-situ 3D measurement of shiny object based on fast and high dynamic range digital fringe projector. online. *Optics and lasers in engineering*. 2014, roč. 54, s. 170-174. ISSN 0143-8166. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.08.002>. [cit. 2024-03-18].



- [11] LIN, Hui; GAO, Jian; MEI, Qing; ZHANG, Guanjin; HE, Yunbo et al. Three-dimensional shape measurement technique for shiny surfaces by adaptive pixel-wise projection intensity adjustment. online. *Optics and lasers in engineering*. 2017, roč. 91, s. 206-215. ISSN 0143-8166. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.11.015>. [cit. 2024-03-18].
- [12] PALOUSEK, David; OMASTA, Milan; KOUTNY, Daniel; BEDNAR, Josef; KOUTECKY, Tomas et al. Effect of matte coating on 3D optical measurement accuracy. online. *Optical materials*. 2015, roč. 40, s. 1-9. ISSN 0925-3467. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2014.11.020>. [cit. 2024-03-19].
- [13] FRANKE, Jakub; KOUTECKÝ, Tomáš a KOUTNÝ, Daniel. Comparison of Sublimation 3D Scanning Sprays in Terms of Their Effect on the Resulting 3D Scan, Thickness, and Sublimation Time. online. *Materials*. roč. 16, č. 18, s. 1-15. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma16186165>. [cit. 2024-03-19].
- [14] KUEMPEL, Eileen a RUDER, Avima. Titanium Dioxide (TiO<sub>2</sub>). online. s. 1-10. Dostupné z: [https://publications.iarc.fr/\\_publications/media/download/3798/660d21ee6dcef1c5e69dcc5a815fcea5eb0cadd2.pdf](https://publications.iarc.fr/_publications/media/download/3798/660d21ee6dcef1c5e69dcc5a815fcea5eb0cadd2.pdf). [cit. 2024-03-19].
- [15] Bezpečnostní list. online. 2023. Dostupné z: [https://www.mr-chemie.de/?pfs-download=1&file=reflecon-tarnish-50/reflecon-tarnish-50%20\\_cz\\_sds\\_aerosol.pdf](https://www.mr-chemie.de/?pfs-download=1&file=reflecon-tarnish-50/reflecon-tarnish-50%20_cz_sds_aerosol.pdf). [cit. 2024-03-19].
- [16] Bezpečnostní list: AESUB Blue. online. 2023. Dostupné z: [https://aesub.com/?wpdf\\_download=true&wpdf\\_id=15a150f7-d451-4234-a01a-1ea3ed1cefda-11166](https://aesub.com/?wpdf_download=true&wpdf_id=15a150f7-d451-4234-a01a-1ea3ed1cefda-11166). [cit. 2024-03-19].
- [17] GOM GMBH A ZEISS COMPANY. *Quality začíná s Q. ATOS Q*. Německo. Dostupné také z: <https://www.3dees.cz/images/scans/atos-q/AtosQ-Produktflyer-A4-CZ-Download.pdf>.
- [18] *3D skener ATOS Q / 3Dees*. online. In: 3D tisk pro průmysl – kompletní řešení aditivní výroby | 3Dees. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/3d-skenery/gom-zeiss/gom-atos-q>. [cit. 2024-05-17].
- [19] *Blu-Ray Photo 3D Scanner Gom Atos Q Optical 3D Measuring System - China Optical Measuring Machine and Video Measuring Machine*. online. In: Made-in-China.com - Manufacturers, Suppliers & Products in China. Dostupné z: <https://pwtest.en.made-in-china.com/product/UfLRnIcyvQVB/China-Blu-Ray-Photo-3D-Scanner-Gom-Atos-Q-Optical-3D-Measuring-System.html>. [cit. 2024-05-24].
- [20] GOM. *OPTICAL 3D SCANNING GOM.pdf*. 2017. Dostupné také z: [https://www.precise3dm.com/assets/images/precise\\_brochure\\_pdf/OPTICAL%203D%20SCANNING%20GOM.pdf](https://www.precise3dm.com/assets/images/precise_brochure_pdf/OPTICAL%203D%20SCANNING%20GOM.pdf).

- [21] ATOS Compact Scan - Flexible light-weight 3D scanner - AIE. online. In: AIE - Industrial 3D printing and scanning solutions. Dostupné z: <https://aie.com.vn/en/atos-compact-scan/>. [cit. 2024-05-18].
- [22] 3D WISER. *Shining 3D Transcan C: přesný 3D skener zachytí i barvy*. online. In: 3D WISER. #1 eshop pro 3D tisk - 3Dwiser. Dostupné z: <https://3dwiser.com/produkty/3d-skenery/shining-3d/shining-3d-transcan-c/>. [cit. 2024-05-22].
- [23] 3DMAKERPRO. *Seal 3D scanner with 0.01mm accuracy | 3DMakerpro*. online. In: Portable 3D Scanners | For 3D Printing & Design | 3DMakerpro. Dostupné z: <https://www.3djake.cz/3dmakerpro/seal>. [cit. 2024-05-18].
- [24] 3D WISER. *Shining 3D EinScan HX 3D skener - 3Dwiser*. online. In: #1 eshop pro 3D tisk - 3Dwiser. Dostupné z: [https://eshop.3dwiser.com/3d-skenery/shining-3d-einscan-hx/?gad\\_source=1&gclid=CjwKCAjwo6GyBhBwEiwAzQTmc0quf54\\_4Hzbo01cca\\_Tz84CqCqaGJ2KIW88AYpzrxKOi6JlbMcp\\_RoCES0QAvD\\_BwE](https://eshop.3dwiser.com/3d-skenery/shining-3d-einscan-hx/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwo6GyBhBwEiwAzQTmc0quf54_4Hzbo01cca_Tz84CqCqaGJ2KIW88AYpzrxKOi6JlbMcp_RoCES0QAvD_BwE). [cit. 2024-05-18].
- [25] GOM MBH. *ATOS compact User Manual*. PDF. Braunschweig, 2012. [cit. 2024-05-24].
- [26] SKOPAL, Jaroslav a PEŠIČKA, Ladislav. *Příručka správné praxe pro malé a střední organizace: Provozní aplikace technických norem GPS v oblasti tvarovaných součástí*. online. ČVUT v Praze Fakulta strojní, 2015. Dostupné z: <https://www.agentura-cas.cz/sites/default/files/public/download/zdarma/RU%200006%2014.pdf>. [cit. 2024-05-22].
- [27] GOM GMBH A ZEISS COMPANY. *ATOS Q / MCAE*. online. In: 3D tisk, 3D skenování a digitální technologie pro průmysl | MCAE. Dostupné z: [https://www.mcae.sk/wp-content/uploads/2020/05/OBJ\\_GRAF-0000017939-XX-001-copy.jpg](https://www.mcae.sk/wp-content/uploads/2020/05/OBJ_GRAF-0000017939-XX-001-copy.jpg). [cit. 2024-05-18].
- [28] 3D MAKERPRO. *Seal-Lite-2560x2560\_746b3086-a106-438c-bf81-4f4b5306c51a.png* (WEBP obrázek, 800 × 800 bodů). online. In: 3D MAKERPRO. Dostupné z: [https://store.3dmakerpro.com/cdn/shop/files/Seal-Lite-2560x2560\\_746b3086-a106-438c-bf81-4f4b5306c51a.png?v=1712140761&width=800](https://store.3dmakerpro.com/cdn/shop/files/Seal-Lite-2560x2560_746b3086-a106-438c-bf81-4f4b5306c51a.png?v=1712140761&width=800). [cit. 2024-05-18].
- [29] *Y2618087-01.webp* (WEBP obrázek, 1420 × 798 bodů). online. In: *Průmyslová řešení a elektrické komponenty | RS*. Dostupné z: [https://res.cloudinary.com/rsc/image/upload/bo\\_1.5px\\_solid\\_white,b\\_auto,c\\_pad,dpr\\_2,f\\_auto,h\\_399,q\\_auto,w\\_710/c\\_pad,h\\_399,w\\_710/Y2618087-01?pgw=1](https://res.cloudinary.com/rsc/image/upload/bo_1.5px_solid_white,b_auto,c_pad,dpr_2,f_auto,h_399,q_auto,w_710/c_pad,h_399,w_710/Y2618087-01?pgw=1). [cit. 2024-05-22].

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

3D		Thee dimensional – Trojrozměrný prostor
CAD		Computer aided design – Počítačem podporované navrhování.
SLA		Stereolithography – Typ 3D tiskárny využívající vytvrzování pryskyřice.
STL		Stereolithography – Formát pro ukládání dat pomocí trojúhelníkové sítě.
STEP		Standard for Exchange of product data – Formát pro výměnu CAD dat
$D_{max}$	[mm]	Tloušťka nebo průměr součásti
$p$	[mm]	Přídavek
$A, B, C, D, E, F$		Označení děr
$d$		Označení disků
$k$		Označení kulových ploch
$l - 15$		Označení žeber

## SEZNAM PŘÍLOH

1.1\_Hlava\_valce\_CZ\_125\_Scott

1.2\_Pohledy