



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Konstrukce a automatizace provozu experimentálního laserového ablačního systému pro cenově dostupnou a konkurenceschopnou produkci nanočástic

Diplomová práce

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

Autor práce: **Bc. Lukáš Zima**

Vedoucí práce: M.Sc. Rafael Omar Torres Mendieta, Ph.D.

Konzultant: Ing. Ondřej Havelka





Zadání diplomové práce

Konstrukce a automatizace provozu experimentálního laserového ablačního systému pro cenově dostupnou a konkurenceschopnou produkci nanočástic

Jméno a příjmení: Bc. Lukáš Zima
Osobní číslo: M19000175
Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Mechatronika
Zadávající katedra: Ústav nových technologií a aplikované informatiky
Akademický rok: 2021/2022

Zásady pro vypracování:

Cíle:

1. Řízení experimentálního uspořádání laserové ablace v kapalinách na bázi Arduina k zajištění dostupné a konkurenceschopné produktivity nanočástic.
2. Snížení nákladů spojených s hardwarem vytištěním většiny konstrukčních částí zasahujících do tohoto řešení pomocí 3D tiskárny a využití převážně open-source softwaru pro jejich řízení.
3. Připravit uživatelsky přívětivé grafické rozhraní pro kontrolu experimentů laserové ablace za účelem snížení rizik spojených s provozem výkonných laserů a maximalizace reprodukovatelnosti experimentu.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Obecným cílem práce je návrh a automatizace metody syntézy nanočástic (NČ) pomocí laseru, známé jako laserová ablace v kapalinách (LAL). Na rozdíl od současných postupů přijatých u špiček v oboru (Ref. 2 a 3), budeme sledovat cenově dostupnou perspektivu založenou na využití 3D tištěných částí řízených open-source softwarem. Konkrétně budou zkonstruovány dvě peristaltické pumpy schopné dosáhnout průtoku 250 ml/min, jedna ozařovací komora a jeden lineární krokáč. Tyto čtyři prvky budou vytvořeny pomocí 3D tiskárny s vyloučením krokových motorů, křemíkových trubek, šroubů, pružin, automatizačního hardwaru obecně a křemenného okénka v ozařovací komoře, které je nezbytné k tomu, aby se laserový paprsek dostal k materiálu, který bude ablován, tj. budou vytištěny pouze konstrukční části. Motory tvořící peristaltické pumpy a lineární krokový ovladač budou řízeny pomocí open-source elektronické platformy Arduino.

Kromě toho bude použita webová kamera pro sledování ohniska laserového paprsku, což souvisí s účinností výroby NČ. Tyto informace nám pomohou pohybovat ablační komorou kolmo k dráze laserového paprsku pomocí lineárního krokového ovladače a upravit tak polohu komory tak, aby byla ablace co největší. Peristaltická čerpadla navíc budou do ablační komory vstříkovat kapalinu, takže ablováný materiál bude zachycen v kapalině. Problém řízení bude spočívat ve dvou hlavních aspektech: paralelní komunikace s jednotlivými prvky, tj. motory a webovou kamerou, jejichž ovládání musí být synchronizováno, aby byla zajištěna maximální ablace, a tedy maximální produkce NČ. A překonání problémů souvisejících se správným odečtem intenzity, zatímco světlo vycházející z plazmatu bude na své cestě potkávat proudící kapalinu. Nakonec bude vytvořeno snadno ovladatelné grafické rozhraní pro spuštění experimentu prostřednictvím grafického rozhraní Arduino + Matlab.

Souhrnně lze říci, že otevřený přístup a levná povaha této diplomové práce bude představovat krok vpřed k urychlení pokroku ve výrobě NČ pomocí LAL (alternativní technika syntézy NČ s potenciálem stát se hlavní volbou vědců) tím, že zpřístupní tuto technologii a umožní její dostupnost novým výzkumným týmům s čerstvými nápady, které mají o tuto oblast zájem.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby dokumentace
40-50 stran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] BARCIKOWSKI, S., et al. Handbook of Laser Synthesis & Processing of Colloids. 2019.
- [2] CRIVELLARO, Simone, et al. A system for the synthesis of nanoparticles by laser ablation in liquid that is remotely controlled with PC or smartphone. Review of Scientific Instruments, 2019, vol. 90, no 3, p. 033902.
- [3] STREUBEL, René; BARCIKOWSKI, Stephan; GÖKCE, Bilal. Continuous multigram nanoparticle synthesis by high-power, high-repetition-rate ultrafast laser ablation in liquids. Optics letters, 2016, vol. 41, no 7, p. 1486-1489.
- [4] ZHANG, Dongshi; GOKCE, Bilal; BARCIKOWSKI, Stephan. Laser synthesis and processing of colloids: fundamentals and applications. Chemical reviews, 2017, vol. 117, no 5, p. 3990-4103.
- [5] WILCHER, Donald. Motion Control with an Arduino: Servo and Stepper Motor Controls. En Learn Electronics with Arduino. Apress, Berkeley, CA, 2012. p. 89-117.
- [6] MATIJEVIC, Milan; CVJETKOVIC, Vladimir. Overview of architectures with Arduino boards as building blocks for data acquisition and control systems. En 2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV). IEEE, 2016. p. 56-63.
- [7] LOSCRI, Valeria; MITTON, Nathalie; COMPAGNONE, Emilio. OpenCV WebCam applications in an arduino-based rover. En International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. p. 261-274.
- [8] <https://www.arduino.cc/> , (Accessed: 23/09/20201)

Vedoucí práce:

Dr. Rafael Torres
Ústav nových technologií a aplikované informatiky

Konzultant práce:

Ing. Ondřej Havelka
Katedra chemie

Datum zadání práce:

12. října 2021

Předpokládaný termín odevzdání:

16. května 2022

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

Ing. Josef Novák, Ph.D.
vedoucí ústavu

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Konstrukce a automatizace provozu experimentálního laserového ablačního systému pro cenově dostupnou a konkurenceschopnou produkci nanočástic

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukcí automatizovaného laserového ablačního systému pro cenově dostupnou a konkurenceschopnou výrobu nanočástic. Tento navržený a sestavený systém bude sloužit ke zvýšení výroby nanočástic pomocí metody známé jako laserová ablace v kapalinách. Hlavním tématem práce je návrh jednotlivých komponent potřebných k automatizaci procesu výroby nanočástic tak, aby většinu jejich částí bylo možné vytisknout pomocí snadno dostupné 3D tiskárny. Dále bylo navrženo a naprogramováno prostředí pro řízení všech automatizačních komponent, které umožňuje snadnou kontrolu procesu a opakovatelnost jednotlivých testů. Výtěžnost výroby nanočástic nově vytvořeného systému byla následně testována a porovnána s klasickým a manuálním nastavením laserové ablace v kapalinách. Toto měření ukázalo, že tento automatický systém je krok správným směrem, což znamená, že výroba nanomateriálů pomocí laseru, často kritizovaná kvůli nízké produkci, není slepou uličkou. Celkově může tato práce představovat zásadní průlom ve výrobě nanočástic a pomoci rozšířit automatizaci laserové ablace v kapalinách.

Klíčová slova: Ablace, Automatizace, Arduino, Nanočástice, Komora, LAL, 3D tisk

Design and automation of experimental laser ablation operation system for affordable and competitive nanoparticle production

Abstract

This diploma thesis deals with the design and construction of an automated laser ablation system for affordable and competitive production of nanoparticles. This designed and assembled system will serve to increase the production of nanoparticles using the methodology known as laser ablation in liquids. The main topic of the work is the design of individual components needed to automate the nanoparticle production process so that most of their parts can be printed using an easily accessible 3D printer. Furthermore, an environment was designed and programmed to control all automation components, allowing easy control of the process and repeatability of individual tests. The nanoparticle production yield of the newly created system was subsequently tested and compared with the classical and manual laser ablation in liquids setup. This measurement has shown that this automatic system is a step in the right direction, implying that the laser-mediated production of nanomaterials, often criticized due to their low production, is not a dead end. Overall, this work can represent a drastic breakthrough in nanoparticle production and help expand the automation of laser ablation in liquids.

Keywords: Ablation, Automation, Arduino, Nanoparticle, Chamber, LAL, 3D printing

Poděkování

V první řadě bych zde rád poděkoval Dr. Rafaelu Omaru Torresovi Mendietovi za vedení mé diplomové práce. Dále bych zde chtěl poděkovat mému dobrému kamarádovi Ing. Ondřejovi Havelkovi za spoluvedení mé diplomové práce a za analýzu vzorků pomocí ICP-OES a SEM metod. V neposlední řadě bych mu také chtěl poděkovat za doprovázení celou vysokou školou. Nakonec bych chtěl poděkovat členům rodiny za podporu a pročtení diplomové práce a celému výzkumnému týmu FEMTO-NANO za umožnění stát se jeho součástí.

Tato práce byla podpořena z projektu SGS-2022-3008 LANDAU-WATER na Technické univerzitě v Liberci v roce 2022.

Obsah

Seznam obrázků	10
Seznam zkratk	12
Seznam zkratk	13
Úvod	14
1 Teoretická část	16
1.1 Automatizace	16
1.2 Průmysl 4.0	18
1.2.1 Koncepce průmyslu 4.0	20
1.2.2 Význam a shrnutí průmyslu 4.0	22
1.3 3D tisk	23
1.3.1 Technologie	26
1.3.2 Materiály pro FDM	30
1.4 Nanomateriály	33
1.4.1 Historie	35
1.5 Laserová syntéza	37
1.5.1 Laserová ablace	39
2 Experimentální část	42

2.1	System k syntéze nanočástic	42
2.1.1	Výběr 3D tiskárny	43
2.1.2	Výběr motoru	46
2.1.3	Výběr řídicí jednotky	48
2.1.4	Lineární posuv	51
2.1.5	Peristaltická pumpa	54
2.1.6	Software	56
2.1.7	Ablační komora	58
2.2	Laserově ablační syntéza nanočástic	61
2.2.1	Použité metody měření produkce LAL	64
2.2.2	Experiment 1 - Hledání ohniskové vzdálenosti	65
2.2.3	Experiment 2 - Měření produkce výroby nanočástic	66
	Použitá literatura	71
	Obsah přiloženého CD	77

Seznam obrázků

1.1	Wattův regulátor [8]	17
1.2	Diagram znázorňující průmyslové revoluce [12]	18
1.3	Mapa iniciativ evropských zemí [16]	20
1.4	Vizualizace FDM tiskárny [32]	28
1.5	Vizualizace SLA tiskárny [32]	29
1.6	Schéma dvou možností výroby nanočástic [40]	34
1.7	Vitráž barvená pomocí nanočástic [43]	36
1.8	Vizualizace jednotlivých kroků probíhajících během laserové ablace v kapalinách	40
2.1	3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S+	44
2.2	Test odolnosti materiálů za pokojové teploty	45
2.3	Tabulka testované odolnosti materiálů	46
2.4	Krokový motor NEMA 17	47
2.5	A) Řídící jednotka B) Navržený kryt řídicí jednotky	49
2.6	Navržený lineární posuv	53
2.7	Navržená peristaltická pumpa	55
2.8	Graf závislosti průtoku peristaltické pumpy na otáčkách	56

2.9	Ovládací program LASER-NANO V1.1	57
2.10	První verze ablační komory	59
2.11	Průřezy vývoje ablačních komor	60
2.12	Finální ablační komora	61
2.13	Finální podoba celého zařízení	62
2.14	Koloid nanočástic zlata připravený pomocí laserové ablace při pozorování A) v reálném měřítku, B) ve skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM) při 10 000 násobném zvětšení.	63
2.15	Graf naměřených hodnot ohniskové vzdálenosti	66
2.16	Grafy naměřených hodnot z druhého experimentu A) Odhadovaný růst produkce obou metod LAL B) Naměřený růst produkce obou metod LAL měřený metodou UV-Vis C) Srovnání měření metody UV-Vis s metodou ICP-OES u použití standartní LAL D) Srovnání měření metody UV-Vis s metodou ICP-OES u použití ablační komory pro výrobu měřených nanočástic	67

Seznam zkratek

0D	Bezrozměrný
1D	Jednorozměrný
2D	Dvourozměrný
3D	Trojrozměrný
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASA	Akrylonitril styren akryl
Au	Zlato
CAD	Počítačová podpora konstrukce
CJP	Barevný tryskový tisk
CNC	Počítačem řízený NC stroj
CT	Počítačová tomografie
DC	Stejnoseměrné napětí
demiH₂O	Demineralizovaná voda
DLP	Digitálně světelné zpracování
FDM	Modelování tavené depozice
FFF	Výroba tavených filamentů
GND	Záporný pól
ICP-OES	Optická emisní spektroskopie s indukčně vázaným plazmatem
IT	Informační Technologie
LAL	Laserová ablace v kapalinách
LASER	Zesilování světla stimulovanou emisí záření
LCD	Displej z tekutých krystalů
LDL	Laserové řízení defektů v kapalinách
LED	Elektroluminiscenční dioda
LFL	Laserová fragmentace v kapalinách
LML	Laserové tavení v kapalinách
LOM	Výroba laminovaných objektů
LPL	Laserová fotochemická reakce v kapalinách

Seznam zkratk

LSPC	Laserná syntéza a zpracování koloidů
MJP	MultiJet tisk
MSLA	Maskovaná stereolitografie
NC	Číslicově řízený stroj
NČ	Nanočástice
PC	Polykarbonát
PET-G	Polyethylenglykol polyethylentereftalátu
PLA	Polylaktidová vlákna
PLAL	Pulzní laserová ablace v kaplinách
SAXS	Malý úhel rentgenového rozptylu
SEM	Skenovací elektronová mikroskopie
SLA	Stereolitografie
SLS	Selektivní laserové spékání
TPU	Termoplastický kaučuk
UV	Ultrafialové
UV-Vis	Ultrafialovo-viditelný

Úvod

K této magisterské práci předcházel značný vývoj technologií výroby koloidních nanočástic v posledních letech. Zejména pak výroba koloidních nanočástic pomocí laserové ablační syntézy. Takto metoda v posledních letech budí u vědců velkou pozornost a je potřeba ji postupem času zdokonalovat. Toto zdokonalování metody vede zejména k automatizaci laserové ablace v kapalinách, čímž se může dosáhnout velké zvýšení produkce koloidních nanočástic, zvýšení bezpečnosti operátora laseru během výroby a zároveň zvýšení reprodukovatelnosti experimentu. [1] Automatizací laserové ablace v kapalinách se nyní věnuje řada špičkových týmů v oboru [2], avšak jejich metody jsou založené na využití velmi nákladných softwarových a hardwarových prvků. Tyto vysoké náklady na automatizaci laserové ablační metody mohou být překážkou pro nově vznikající nadějně týmy, které by této oblasti přinesli nové nápady a tím se umožnil rychlejší pokrok.

Z těchto důvodů se náš vědecký tým FEMTO-NANO rozhodl jít jinou cestou, a to vytvoření automatizace laserové ablace v kapalinách pomocí snadno dostupných a snadno replikovatelných částí tohoto systému založených na sdílené platformě open-source. Tomuto postoji k řešení problémů se snadnou dostupností automatizace laserové ablace se věnuje tato moje diplomová práce. A tím umožňuje nezbytný krok vpřed vedoucí k zrychlení pokroku této oblasti díky zpřístupnění dostupných a konkurenceschopných řešení produktivity.

V této diplomové práci se tedy věnuji návrhem a konstrukcí experimentálního laserového systému. Konkrétně se budu věnovat návrhem a konstrukcí peristaltické pumpy k přečerpání kapaliny v uzavřeném okruhu, na kterou byl dán požadavek na

rychlost průtoku alespoň 250 ml/min. Dále se budu věnovat lineárnímu posuvu a tím nejdůležitějším z celého systému, a to konkrétně ablační komoře. Všechny konstrukční části těchto komponentů budou primárně vytištěné na 3D tiskárně, kromě tedy spojovacího materiálu, motorů, řídicí jednotky, hadiček a skleněné destičky využitě u ablační komory. Řídicí jednotka bude realizována pomocí open-source platformy Arduino.

Celá tato konstrukce experimentálního zařízení by měla být snadno ovládána z počítače pomocí nově navrženého přehledného programu. Cílem řešení tohoto ovládní bylo vyřešit komunikaci mezi ovládacím programem a nově naprogramovaným firmware Arduina. Dále vyřešit ovládní jednotlivých prvků experimentálního zařízení, tím je myšleno ovládní lineárního posuvu a peristaltické pumpy.

1 Teoretická část

1.1 Automatizace

Automatizace popisuje samovolné řízení technologických zařízení s minimálním zásahem člověka. Tento minimální zásah člověka spočívá v nastavení, určení podmínek, určení procesů apod. Dále již automatizovaný proces pracuje samovolně. Nesetkáme se s místem, kde by nebyla zastoupena. Život bez automatizovaných procesů by si většina populace už dnes nedovedla představit. Setkáváme se s ní denně, usnadňuje nám práci a není snad proces, u kterého by se nedala využít. V domácnosti využíváme automatizaci při mytí nádobí v myčce, praní v pračce a vlastně ve všech spotřebičích. Dále se automatizační systémy s domácnostech využívají k vytápění a čištění odpadních vod. [3, 4]

Využití automatizace v opakujících procesech bezesporu usnadňuje lidem práci. Automatizace je rozšířená v mnoha oborech od obchodních procesů, výrobních procesů, IT až k automatizaci domácností. Automatizované výrobní procesy hrají důležitou roli v průmyslu, kde se využívají od jednoduchých automatů až po složité výrobní linky. Velmi složité automatizační procesy se vyskytují také v letadlech a lodích. [5]

Automatizace výrobních procesů může být dosažena mnoha způsoby, nejčastěji kombinací různých mechanických, elektronických, hydraulických, elektrických částí nebo pomocí počítačů. I přes velké počáteční náklady na automatizaci, její použití přináší mnoho výhod, zejména úsporu práce, úsporu nákladů na materiál a elektřinu, snížení odpadu, úsporu času a zvýšení kvality a přesnosti. Může se zdát, že

postupnou automatizací výrobních procesů povede ke snížení pracovních pozic, ale dle zprávy světové banky z roku 2019 je opak pravdou. [6]

Základním automatizačním členem je regulátor, ten porovnává aktuální hodnotu a požadovanou hodnotou a na základě odchylky upravuje vstup do akčního členu tak, aby se regulační odchylka co nejvíce snížila. Během první průmyslové revoluce vznikala potřeba řídit otáčky parních strojů, to vedlo k vzniku regulátorů. Nejznámější je Wattův odstředivý regulátor (Obrázek 1.1), který sloužil ke stabilizaci otáček parního stroje. Funguje na principu odstředivé síly, kdy zvyšující se odstředivá síla postupně omezuje přívod páry do válce a snižující se odstředivá síla naopak zvyšuje plnění válce párou. Vzniklo tak první použití záporné zpětné vazby. [7]

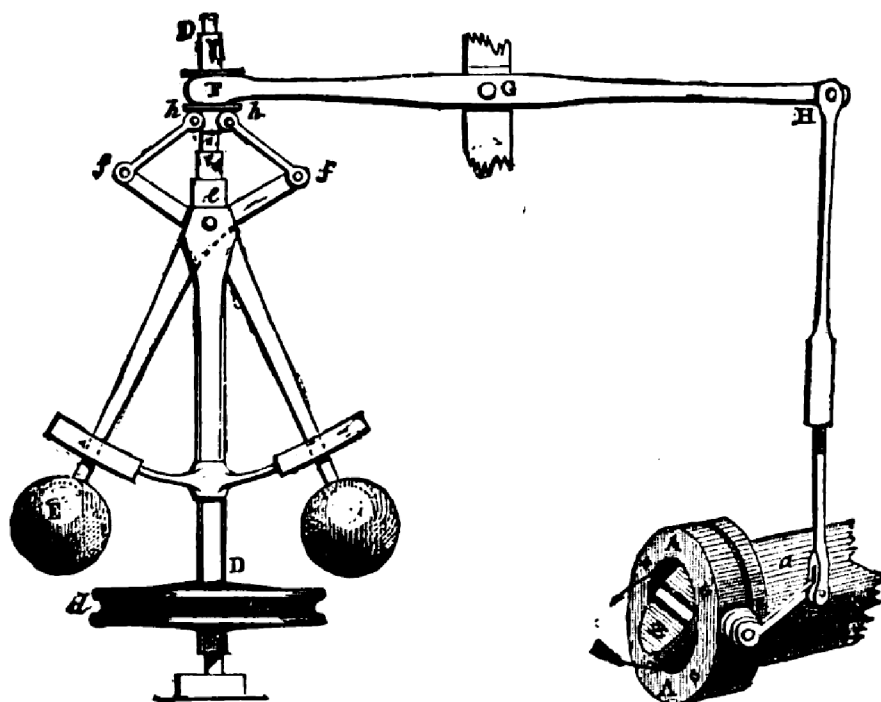
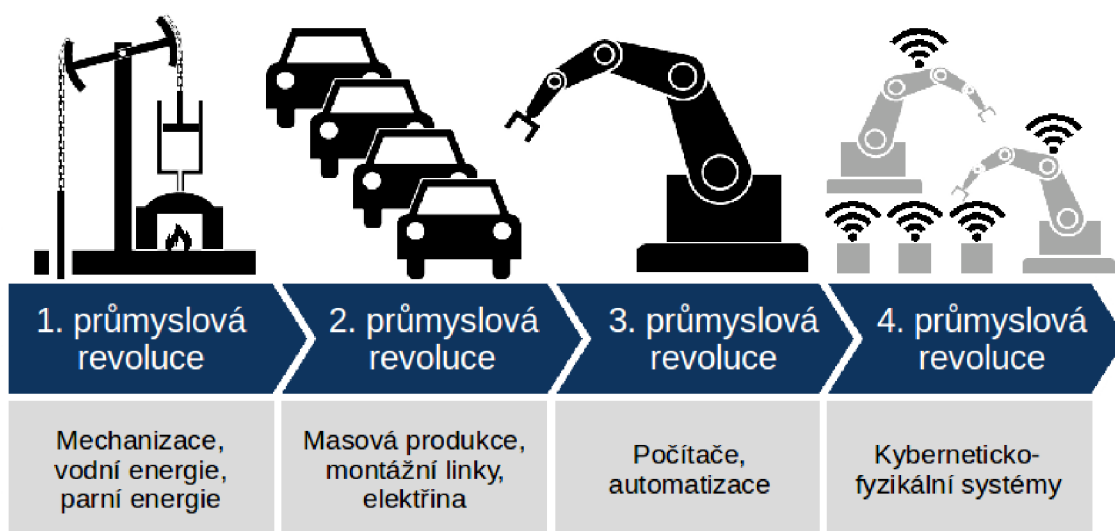


FIG. 4.--Governor and Throttle-Valve.

Obrázek 1.1: Wattův regulátor [8]

1.2 Průmysl 4.0

Čtvrtá průmyslová revoluce označuje aktuální vývoj výrobních procesů vedoucí k postupné digitalizaci a s tím spojené plné automatizaci výroby. Označení průmyslová revoluce se pojí s významnými kroky v průmyslu vedoucí ke zvýšení výroby (na obrázku 1.2). První průmyslová revoluce vznikla vynálezem parních strojů v 18. století. Použití parních strojů a mechanizace výroby vedoucí k mnohanásobnému zvýšení výroby vedlo k průmyslovému převratu. [9] Druhou průmyslovou odstartoval podnikatel Henry Ford s nápadem montážních výrobních linek. K druhé průmyslové revoluci také vedl objev elektrické energie, který umožnil nahrazení parních strojů. Nápad výrobní linky Ford okopíroval v jatkách v Chicagu, kde každý řezník prováděl jen jednu operaci při bourání zvířat. Tento nápad pan Ford aplikoval na výrobu aut, což vedlo k zrychlení a zlevnění výroby aut a umožnilo to masovou výrobu. [10] Třetí průmyslová revoluce vznikla díky značnému vývoji elektroniky, zejména polovodičů. To přineslo do průmyslu automatizaci výrobních procesů. Jako příklad se dají uvést jednoduché jednoúčelové stroje později nahrazené stroji NC a CNC.[11]

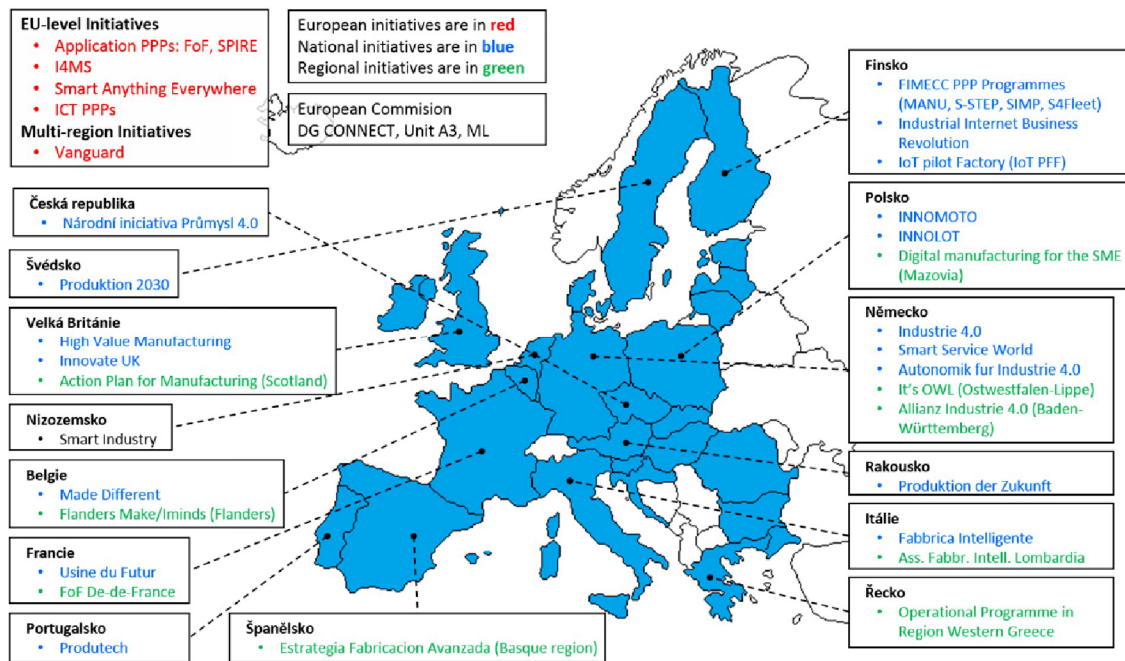


Obrázek 1.2: Diagram znázorňující průmyslové revoluce [12]

Na rozdíl od předchozích průmyslových revolucí pojem Průmysl 4.0, vznikl jako koncept budoucího vývoje průmyslu. Základy konceptu začali vznikat kolem roku 2011 a pojednávali o chytrých továrnách budoucnosti. V základu se jedná o připojení továren na internet, což umožní ovládání a kontrolu strojů na dálku. Zároveň díky pokročilým technologiím povede výroba k zvýšení efektivnosti a přesnosti. Chytré automatické stroje plně převezmou jednodušší a opakující činnosti, zavážení materiálu a skladový systém. Nahrazení těchto jednodušších pracovních operací roboty povede k zániku pracovních míst, které nevyžadovaly velkou pracovní kvalifikaci. Tento fakt povede k nutné postupné rekvalifikaci pracovníků z operátorů výroby na vyšší pozice. Příchod průmyslu 4.0 neznamena úbytek pracovních míst, trend je spíše opačný, bohužel vyžaduje po pracovnících vyšší kvalifikaci. Průmysl 4.0 nám udává směr průmyslu potřebný k pozvolnému přechodu změny kvalifikace pracovníků. [13, 14]

Světový projekt průmysl 4.0 lze z pohledu vývoje rozdělit na dva základní směry. První směr je zaměřen na vývoj aplikací a techniky potřebné pro automatizaci. Jenže tento rychlý vývoj potřebuje a nutí ke vzniku druhého směru průmyslu 4.0. Ten se zaměřuje na ekonomické, sociální a politické změny. Do této kategorie změn se řadí například: flexibilita vývoje, krátká doba vývoje, snadná individualizace produktu, decentralizace, efektivnost, zvyšování stupně automatizace a digitalizace. To vše za potřeby všechny nové a rozsáhlé systémy co nejvíce minimalizovat. [15]

Vznik průmyslu 4.0 sebou přináší spoustu příležitostí a také spoustu hrozeb. Tyto hrozby se týkají ztráty konkurenceschopnosti, způsobené zaspáním doby. To může vést k velkým ekonomickým dopadům, což se projeví na zaměstnanosti, produktivitě a rozvoji společnosti. Tento problém si již řada vyspělých zemí uvědomila a začala řešit průmysl 4.0 na státní úrovni. Jednotlivé názvy vizí jednotlivých států jsou znázorněné na obrázku 1.3. Česká republika si tento trend také uvědomila a v roce 2017 zveřejnilo Ministerstvo průmyslu a obchodu dokument: „Iniciativa Průmysl 4.0“. Motto tohoto dokumentu zní: „Průmysl 4.0 má v Česku své místo“. [16]



Obrázek 1.3: Mapa iniciativ evropských zemí [16]

1.2.1 Koncepce průmyslu 4.0

S příchodem průmyslu 4.0 vznikla celá řada nových pojmů a nových konceptů. Průmysl 4.0 se může rozdělit do 4 různých konceptů. Tyto koncepty jsou:

Internet věcí

Internetem věcí se v informatice označuje síť, kterou jsou propojeny fyzická zařízení, domácí spotřebiče, vozidla a mnoho dalších zařízení, která obsahují elektroniku, mechaniku, senzory a připojení na síť díky které mohou navzájem komunikovat a vyměňovat data, avšak budou moci pracovat plně samostatně. Název vychází z anglického „Internet of Things“. Počítačové sítě, internet, mobilní sítě apod. umožňují jednotlivým zařízením, díky koncepci internetu věcí, jejich vzdálenou kontrolu a ovládání. To vše bez velkých nároků na uživatele přináší vyšší účinnost, přesnost a ekonomičnost. Ve spojení internetu věcí a kyber-fyzických systémů vznikají systémy jako: Chytré domácnosti a města, virtuální elektrárny, řízení infrastruktury atp. [11, 17]

Internet služeb

Internet služeb je též označován anglickým výrazem „Cloud computing“. Jedná se o model systému založený na využití cloudových úložišť, na kterých jsou uloženy uživatelská data a aplikace. Internet služeb funguje na sdíleném vzdáleném přístupu na veřejné servery, na kterých jsou umístěny služby a produkty. Použitím internetu služeb odpadá ukládání dat na lokální disky, které se musí složitě přenášet a dále odpadá instalování softwaru. To značně zjednodušuje při vývoji kompatibilitu software s různými zařízeními, protože aplikace běží na propůjčených serverech. Jako příklad se dá brát třeba ovládání chytré domácnosti, která se pomocí webového rozhraní může snadno ovládat, pomocí libovolného zařízení s internetem a prohlížečem. Lze tak například z pracovního počítače bez instalace dodatečného software nastavit topení. [11, 15]

Kyber-fyzikální systémy

Jedná se o propojení fyzických komponent s počítačovým software. Kyber-fyzikální systémy, jak již název napovídá spojují teorii kybernetiky, mechatroniky, konstrukce a výroby. Jedná se o počítače se systémy s možností autonomního řízení, které funguje na základě akčních členů. Řízení fyzických vrstev je často označováno jako vestavěný systém. V těchto systémech je důležitý výpočetní výkon než na propojení s fyzickými prvky. Kyber-fyzikální systém má podobnou základní architekturu jako internet věcí, ale na rozdíl od internetu věcí se zaměřuje na propojení výpočetních systémů s fyzickými prvky. V praxi se často používá propojení těchto dvou systémů.[18, 19] Toto je přesná část Průmyslu 4.0, která bude aplikována v této diplomové práci.

Digitální ekonomika

Digitální ekonomika vděčí za vznik čtvrté průmyslové revoluci. Jedná se o přesunutí běžných každodenních aktivit do světa internetu, čímž je vize dosáhnout nižších nákladů a zvýšení pohodlí. Do digitální ekonomiky je potřeba zařadit i pojem digitální logistika, která je v případě průmyslu 4.0 velmi důležitá. [20]

1.2.2 Význam a shrnutí průmyslu 4.0

Pojem průmysl 4.0 se využívá v mnoha oborech se kterými souvisí. Jedná se o elektroniku, podnikovou administrativu, informatiku podnikové a informační systémy a strojírenství. Použití automatizace a robotizace se neustále rozšiřuje, proto řada firem, která se tomuto trendu nepřizpůsobí, může mít v budoucnu existenční problémy. Výsledkem aplikace průmyslu 4.0 je větší rychlost a flexibilita výroby, která reaguje rychleji na poptávky globálního trhu. Pomocí připojení produktů k síti lze lépe monitorovat životní cyklus produktu a na základě těchto dat produkt lépe přizpůsobit použití, plánovat servis výrobku, distribuci apod. [15, 16]

Všeobecně lze říci, že Průmysl 4.0 označuje implementaci IT technologií do výrobních systémů. Tato technologická změna průmyslu se projevuje napříč obory a dopad těchto změn je tak zásadní, že vzniklo označení 4. průmyslová revoluce. Tento technologický vývoj bude mít dopad na většinu populace. V začátcích průmyslu 4.0 ve firmách způsobí zrušení zastaralých pracovních míst, ale na druhou stranu vznikne spousta nových pracovních míst s vyšší kvalifikací. Vznikne tak potřeba lidí s kvalifikací na údržbu strojů a také vznikne řada míst v oblasti IT, vývoje a spousta ekonomických míst. Každé takto zaniklé místo bude nahrazeno 2,5násobkem. Produktivita výroby tím stoupne přibližně o 30%. Vzhledem k výše uvedeným důvodům, může vést koncepce průmyslu 4,0 aplikovaná ve výzkumných laboratořích k pokroku naší společnosti, což je hlavním cílem této diplomové práce. [15, 16]

1.3 3D tisk

V posledních letech došlo k velkému rozšíření 3D tisku ve všech oborech. Tento prudký rozvoj je zapříčiněn velkým technickým rozvojem nových technologií v oblasti elektroniky a popularitou 3D tisku v domácích podmínkách, kde je poměrně rozšířený. Za pomoci „open-source“ platformy, můžou být 3D tiskárny kopírovány a postupně vylepšovány. Z tohoto důvodu spousta firem může využít stávající vědomosti a nemusí financovat nákladný vývoj adaptivních technologií, což vede ke zlevňování 3D tisku. K vývoji 3D tisku ve světě dochází, dá se říct, neustále a tím častěji vznikají nejen drobné inovace, ale dochází i k vylepšení technologie, která vede k novým možnostem 3D tisku a k novým oblastem použití.

3D tisk nám přináší možnosti o kterých se lidem v minulosti asi ani nesnilo, nebo brali tyto myšlenky jako velké sci-fi. Technologie 3D tisku patří mezi způsoby aditivní výrobní procesy zpracování materiálu, které jsou založeny na postupném kontrolovaném přidávání materiálu. Mezi aditivní výrobní proces se kromě již zmíněné technologie 3D tisku také odlévání a spékání. Materiály vhodné pro aditivní výrobní proces jsou takové, které lze roztavit, nebo které za určitých podmínek umožňují vytvrdnout. Mezi tyto materiály nejčastěji patří kovy, sklo, plasty, pryskyřice, atp. Opakem aditivního procesu je subtraktivní výrobní proces, při kterém dochází u výroby k postupnému ubírání materiálu. [21]

Nahrazení subtraktivního výrobního procesu přineslo mnoho firmám velmi příležitosti. Při použití 3D tisku u prototypů vede k rychlejšímu vývoji a zároveň k nižším nákladům na výrobu prototypů. U malých sérií výrobků z plastů se nevyplatí nechat vyrobit formu pro vstřikovací lis a zároveň CNC obrábění je složité, proto je technologie 3D tisku ideální volbou. Zároveň se 3D tisk dá použít k výrobě náhradních dílů na místě potřeby a tím odpadá potřeba firmy vlastnit velké sklady se spoustou náhradních dílů, ze kterých se časem stává nepotřebný odpad. Možnost vyrábět náhradní díly na místě potřeby nám přináší větší ekologičnost opravy tím, že nám odpadá obalový materiál a převoz náhradního dílu. Možnosti výběru

materiálů jsou již v dnešní době velké a postupně přibývají další. Na zjednodušení výroby slévačských forem přišla firma Desktop Metal, která vyvinula tisk pískových forem. Později se firma rozhodla celý proces odlévání kovu nahradit přímo tiskem. Materiály pro tisk používají oceli, korozivzdorné oceli, hliníkové slitiny a měď. Tisk probíhá ve třech krocích. V prvním kroku se pomocí tiskárny s dvěma extrudery. Jeden extruder slouží k nanášení prášku materiálu vrstvu po vrstvě a druhý extruder je použit k nanášení keramického separátoru. Keramický separátor slouží o oddělení vrstev, například aby se nepřipekly podpěry. Vytisknutý díl se musí ve speciální myčce vymýt od polymerů, které drží materiál po hromadě a následně se celý díl vloží do pece v níž se vytiskne speče. Z důvodu smrštění materiálu se musí objekt vytisknout asi o 20% větší. Technologii tisknutí kovů se v dnešní době zabývá více firem. [22, 23]

Žijeme v době, kdy se pomocí technologie 3D tisku lze vytisknou celá budova. To nám přináší spoustu výhod. Při stavbě domů za použití 3D tisku můžeme při návrhu zvolit netradiční tvary domu a zároveň se zjednoduší výběr materiálu na stavbu obvodových stěn. Doba potřebná na stavbu a náklady na stavbu se sníží. Firmy ICON a New Story například zvládají postavit přízemní dům o rozloze zhruba 55-75m² v době menší, než uplyne 24 hodin s náklady 4000USD. Čínská firma WinSun za pomocí tiskárny o rozměrech 10 m výšku a 6,6 m na šířku vytiskla za jeden den 10 jednopatrových domků. Tato technologie tisku domů by mohla pomoci v místech zasažených válkou k rychlé obnově domů. [22, 24]

Ve zdravotnictví lékaři používají 3D tisk k výrobě různých implantátů. Například konkrétně k výrobě kranio implantátů, používajících se jako náhrada poškozené části lebky, kdy se pomocí CT snímků navrhne a vytiskne poškozená část lebky. Doktoři nevyužívají 3D tisk jen k lebečním implantátům, ale i k ostatním implantátům kostí. Tyto implantáty mají velkou výhodu, že jejich výroba probíhá danému pacientovi na míru. V některých případech rychlá a relativně levná výroba implantátů může zachránit pacientovi život. Ve zdravotnictví se 3D tisk využívá i při sériové výrobě meziobratlových obratlů a podložek do kolenního kloubu. Nejčastější využití 3D tis-

ku ve zdravotnictví využívají zubaři. Pomocí tisku mohou tisknout zubní protézy, dentální korunky, nebo modely pacientova chrupu místo odlitků. 3D tisk pokročil ve stomatologii tak moc, že už existují speciální 3D tiskárny určené zubařům. Důležitým využitím 3D tisku ve zdravotnictví bude bezesporu tisk protéz, které mohou nahradit celou končetinu. Protézy umožňuje vyrábět na míru pacientovi a zároveň se můžou navrhnout tak, aby co nejvíce připomínaly nohu. Velký potenciál má výroba protéz 3D tiskem u dětí, díky nízkým nákladům na výrobu. [25, 26]

Sice jako v seriálu Futurama nejde tisknout velmi přesné kopie cenných předmětů dle fotek, avšak k zneužití tiskárny k dalším nelegálním věcem se dá 3D tiskárna využít. Bohužel každá technologie má své negativum to, že je zneužitelná, respektive její využití je jen v rukách lidí. Na tento fakt upozornila v roce 2012 americká aktivistická skupina Defense Distributed, kdy na svých stránkách dala volně k šíření výkresy k vytištění pistole. Jelikož se nejednalo o klasickou palebnou zbraň, ale o plastovou hračku umožňující vystřelit jen jeden plastový projektil, byl tento krok aktivistů přehlížen. Proto tato aktivistická skupina v roce 2013 zveřejnila ke stažení plány k vytištění pistole. Tak vznikla první vytištěná pistole a dostala název „Liberator“ podle své předlohy americké jednoranné pistole FP-45 Liberator používané za druhé světové války. Tato pistole již nebyla pouhou hračkou, ale umožňovala výstřel 9mm náboje. Tyto plány však musela stáhnout po krátké době na naléhání Ministerstva zahraničí USA, avšak v té době už byly rozšířené na mnoha fórech. Není divu, že plány musely být staženy. 3D výroba takovýchto zbraní se nedá vystopovat a ani regulovat. Proto se nesmíme divit, že s takovými zbraněmi bylo již spácháno hodně trestných činů, například 3D tištěná zbraň byla použita v roce 2019 během útoku na synagogu v německém městě Halle. Ve stejném roce jako aktivisté z Defense Distributed zveřejnili plány na Liberatora, americká Firma Solid Concepts představila vytištěnou na 3D tiskárně kovovou verzi pistole M1911. [22, 27]

Přestože 3D tisk má své dobré i špatné stránky, je nepopiratelné, že se jedná o skvělou technologii výroby, která se dá využít v mnoha odvětvích a tím vést ke značnému pokroku. To platí zvláště když se dosažené výsledky poskytnou veřejnosti

a tím se umožní dalším vědeckým týmům je dále zlepšovat. Vzhledem k tomuto důvodu byla pro tuto práci zvolena technologie 3D tisku. I přesto, že se v této práci snažím reprezentovat neúčinnější laserový ablační systém, určitě se ve veřejnosti najde někdo, komu zde získané výsledky poslouží jako klíčové studie pro další vylepšení systému a k rozšíření této metodologie.

1.3.1 Technologie

Základem každého 3D tisku je v počítači vytvořený 3D model. Programy pro 3D modelování bývaly v počátcích modelování v počítačích velmi drahé a složité, avšak to už v dnešních dobách neplatí. Na trhu se vyskytuje velké množství CAD programů, které jsou zdarma nebo placené. Některé lepší programy mají dokonce možnost využívání programu pro osobní použití zdarma. Mezi jedny z nejlepších CAD programů například patří: Fusion 360, AutoCAD, Blender, Adobe Dimension, Invertor, SketchUp nebo SolidWorks. Když máme připravený model pro 3D tisk ve formátu STL. Musíme ho upravit pomocí programu známého jako slicer. Tento program nám model rozdělí na jednotlivé tištěné vrstvy a sepíše příkazy v programovacím jazyce pro CNC stroje zvaném g-kód, který tiskárně zprostředkuje jednotlivé kroky. Těchto programů pro přepis modelu existuje velké množství, mezi nejpoužívanější můžeme řadit: PrusaSlicer, Slic3r, Cura, Simply3D, atp. [28]

V dnešní době můžeme narazit na nespočet technologií a zkratk technologií 3D tisku. Bohužel protože některé z těchto zkratk a technologie podléhají autorským právům a patentům začaly vznikat jednotlivým technologiím alternativní názvy. Například nejrozšířenější technologie 3D tisku, která funguje na principu tavení struny, společnost Stratasys pojmenovala FDM. Kvůli právům na tento název museli ostatní výrobci tuto technologii pojmenovat jinak a vznikl název FFF. S podobnými duplicitními názvy se můžeme setkat i v jiných principech 3D tisku.[29]

Rozdělení technologií

Technologie 3D tisku můžeme podle principu zpracování rozdělit celkem na 4 kategorie: [30]

V první kategorii se používá vytvrzování kapalných materiálu v určité vrstvě pomocí laseru, UV záření, apod. U tohoto typu tisku je použit jako materiál tekutý polymer, též zvaný jako resin. Tisk funguje postupným mořením tiskové plochy nebo osvitky do nádoby s polymerem a postupným ozařováním v potřebné vrstvě dochází k vytvrzování materiálu. Mezi velké výhody patří, že na rychlosti tisku není ovlivněna rozlohou modelu, ale pouze výškou. Proto se tato tiskárna hodí k výrobě většímu počtu malých dílů. Mezi velkou nevýhodou patří úprava tištěného dílu po vytištění. Vytištěný díl se musí umýt v izopropylalkoholu a UV zářením vytvrdit. Zástupci této technologie jsou: SLA, DLP, LCD a MSLA.

Druhá kategorie využívá vrstvení materiálu pomocí tiskové hlavy. U této technologie se pomocí posuvů ve 3 osách postupně nanáší materiál na tiskovou plochu. Velkou výhodou této kategorie je nízká pořizovací cena, nízké náklady na tiskový materiál a velké množství materiálů. Mezi nevýhody patří časová náročnost tisku, nesjednocenost povrchu, náročné odstranění podpěr a další. Mezi zástupce této kategorie se řadí FFF, FDM a MJP.

Třetí kategorie funguje za principu propojení práškových materiálu pomocí lepidla, laseru apod. Sypký tiskový materiál je postupně nanášen v jednotlivých vrstvách po celé ploše a tisknutý tvar je vytvrzován pomocí laseru či lepidla. U použití tohoto principu se může použít pro tisk spoustu materiálů. Například různé typy plastů, kovů a prášků na bázi sádry. Tisk z plastu má výhodu, že nevytvrzený materiál slouží jako podpěra, zatímco u kovů se musí tisknout i podpěry. V této kategorii jsou zástupci SLS a CJP.

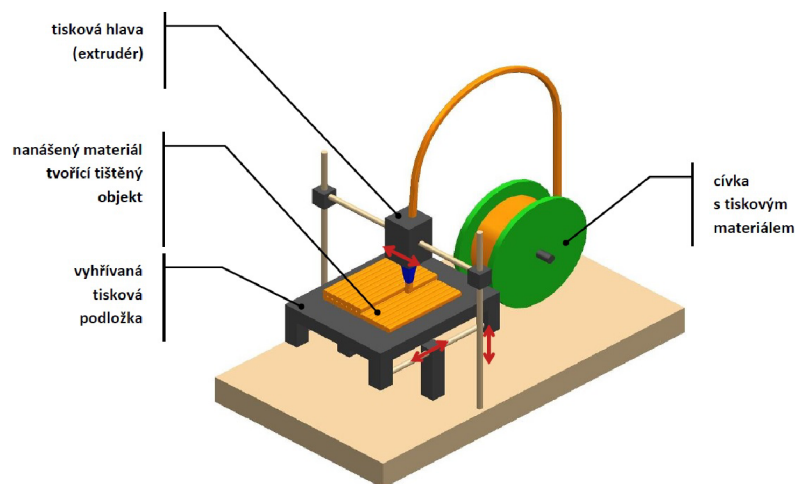
Poslední kategorie využívá oddělování materiálu v každé vrstvě. Jedná se o postupné lepení plotrem vyříznutých vrstev nejčastěji z papíru nebo fólie. Vzhledem k vyřezávání jednotlivých vrstev je tato kategorie na hraně mezi aditivním a sub-

traktivním výrobním procesem. Tato metoda tisku se téměř nepoužívá. Její zástupce je technologie zvaná LOM.

Technologie pro "domácí" použití

FDM

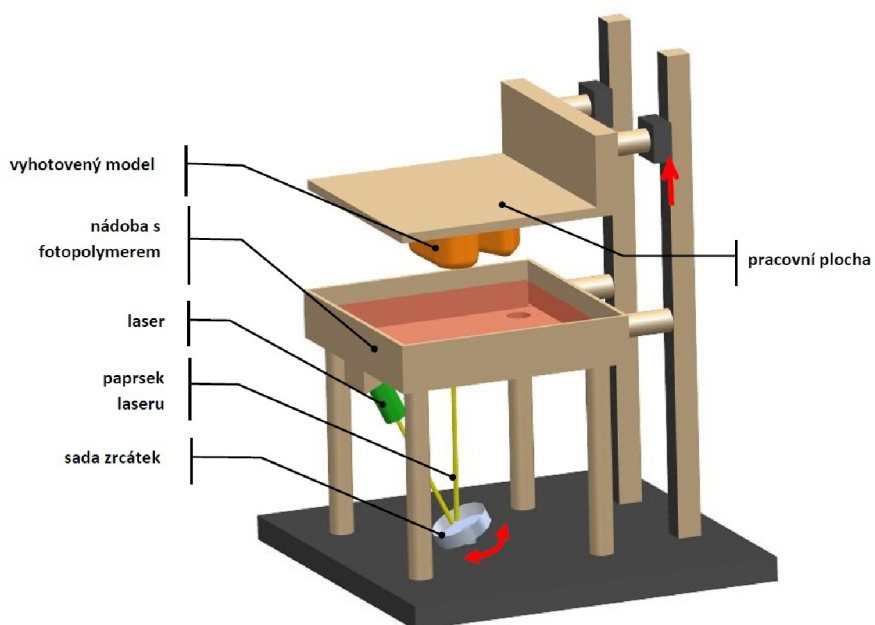
Technologie FDM nebo též FFF je nyní nejrozšířenější technologií tisku. Byla vyvinutá v roce 1988 Scottem Crumpem ve firmě Stratalis. K největšímu rozšíření této technologie došlo v roce 2009, kdy skončila ochrana patentu a veřejnost mohla technologii zdarma využívat. Vznikl tak open-source projekt RepRap. Již zmíněný princip funguje na postupném nanášení roztaveného materiálu na tiskovou podložku po vrstvách ve 3 osách. Konstrukce tiskárny je ukázána na obrázku 1.4. Při potřebě tisku složitějších dílů je potřeba během tištěného dílu tisknout i podpěry. Pro tisk se používají tyto materiály: PLA, ABS, PET-G, PC, ASA, FDM Nylon, TPU a další. Velká výhoda FDM tisku je minimální odpad a dobrá pevnost výrobku. Mezi nevýhody patří hrubá struktura povrchu a doba tisku. Ceny těchto tiskáren začínají na 5000 Kč. [31]



Obrázek 1.4: Vizualizace FDM tiskárny [32]

SLA

Jedná se o jednu z nejstarších metod 3D tisku. Na principu SLA byla založená první průmyslově vyráběná 3D tiskárna, a to v roce 1986. Princip SLA tiskárny spočívá v postupném vytvrzování polymeru pomocí světelného záření, nejčastěji laseru. Toto vytvrzování probíhá na pracovní ploše, výška tisknuté vrstvy závisí na vzdálenosti pracovní plochy od dna nádoby s polymerem, pod kterým je umístěna vytvrzovací laser. Tisk probíhá tak, že v místech výtisku laser vytvrdí fotopolymer. Následně se pracovní plocha stoupne o tloušťku požadované vrstvy a opět se vrstva vytvrdí. Tento proces probíhá až do finálního vytištění celého modelu. Existují dvě možnosti SLA tiskárny. První je výše zmíněná a ozařování pracovní plochy probíhá zespoda. Druhá možnost je, že pracovní plocha je ozařována shora. Po vytištění je potřeba díl umýt v izopropylalkoholu a následně ho UV zářením vytvrdit. Na tyto dva procesy se vyrábí speciální myčka s integrovaným vytvrzováním. Konstrukce tiskárny je pro lepší představu znázorněna na obrázku 1.5. [31]



Obrázek 1.5: Vizualizace SLA tiskárny [32]

Stereolitografie teoreticky může dosahovat rozlišení o velikosti molekuly polymeru, avšak praktická přesnost je závislá na hustotě polymeru, šířce paprsku a délce a intenzitě ozařování. Z tohoto důvodu se stereolitografie využívá v elektronice při výrobě integrovaných obvodů. Dále se využívá k tištění finálních prototypů před sériovou výrobou. Již zmíněná nutnost vytvrzování po tisku se bere jako nevýhoda této technologie. Další nevýhoda spočívá v omezení materiálů pouze na fotopolymery. Z technologie SLA vychází technologie DLP u které je jediný rozdíl v nahrazení laseru speciálním projektorem, který je schopný vytvrdit celou plochu naráz, čímž je zvýšena rychlost tisku. V dnešní době se laser a osvitový projektor nahrazuje monochromatickým UV LCD displejem nebo UV LED panelem s vysokým rozlišením. Cena těchto tiskáren na českém trhu začíná na hodnotě 5000 Kč za tiskárnu a 3000 Kč za myčku s vytvrzováním. [33]

1.3.2 Materiály pro FDM

Tiskový materiál pro FDM tiskárnu se často nazývá filament, což v překladu z angličtiny znamená vlákno. Toto vychází z podoby tiskového materiálu. Filament se prodává ve formě struny navinuté na cívce a je složen z různých druhů termoplastů ať už čistých, nebo s příměsí. Filamenty se mohou rozdělit podle určení nebo podle vlastností. V prvním případě je rozdělení podle typu tiskárny, a to strunu s průměrem 1,75 mm nebo 3 mm. Základní vlastnosti u filamentu jsou: Maximální teplota trysky, teplota podložky, pružnost a teplotní odolnost. Dále vlastnosti filamentu určuje samotný typ materiálu a jsou to: zápach, recyklovatelnost, ekologická odbouratelnost, toxicita. Vzhledem k různým aditivům výrobců jednotlivých materiálů kvůli přidaným aditivům nejde jednoznačně určit nezávadnost jednotlivých materiálů. [34]

ABS

Jedná se o historicky o první filament. ABS je zkratka akrylonitrilbutadienstyren, což je amorfní termoplastický průmyslový kopolymer. Jeho vlastnosti jsou: velká

odolnost vůči mechanickému poškození, tuhý, houževnatý, odolný u velkého rozptylu teplot, zdravotně nezávadný a odolává: kyselinám, hydroxidům, uhlovodíkům a olejům. Protože ABS obsahuje syntetický kaučuk je rozpustné v Acetonu a není ekologicky odbouratelné. Při tisku ABS vyžaduje poměrně vysoké teploty tiskové hlavy a podložky, zároveň je potřeba dodržet stálou teplotu ideálně uzavřenou tiskovou komorou. Při nedodržení tiskových podmínek se výtisk často kroučí a praská. [34]

PLA

Nejrozšířenější materiál pro FDM tisk, vyznačující se snadným tiskem bez nebezpečných výparů. Jedná se o materiál vyrobený z kukuřičného nebo bramborového škrobu. Zkratka PLA označuje polylaktidová vlákna, což jsou výrobky z polylaktidových polymerů kyseliny mléčné. Vzhledem k výrobě z rostlin je PLA ekologicky odbouratelný bioplast, avšak v běžný kompost nebo degradace na slunci je extrémně pomalé. Byl objeven v roce 1932 a první využití se začalo aplikovat ve 50. letech 20. století. Snadno se tiskne, a to díky nízké teplotě tavení, pro tisk nutně ani nevyžaduje vyhřívanou podložku. Velká nevýhoda je v nízké teplotní odolnosti, kde teplota 60 °C může povrch deformovat. Dále PLA není flexibilní, takže se nedá využít v místech, kde hrozí mechanické namáhání. [34]

PETG

Lze říci, že PETG kombinuje vlastnosti již zmíněných materiálů, stejně jako ABS je odolný, odolný vůči vysokým teplotám, lehce flexibilní a pevný a tiskne se poměrně snadno jako PLA. Jedná se o známý materiál PET, využívaný pro PET lahve, obohacený o glykol. Tato látka upravuje vlastnosti PET tak, aby se snadněji tiskl a byl méně křehký. Odolává teplotám až do 80 °C. Vzhledem k velkému pohlcování vzdušné vlhkosti je potřeba materiál skladovat v suchu ideálně v parotěsném obalu. Stejně jako v případě PET lahví, lze materiál PETG snadno recyklovat.[35]

TPU

Jedná se o termoplastický polyuretan se řadí mezi termoplastické kaučuky. Kombinací složení TPU lze dosáhnout různé tepelné odolnosti, chemické odolnosti, pružnosti a flexibility. Tisk z těchto materiálů je náročný, vyžaduje tiskárnu pouze s přímým extruderem. Vytisknuté díly jsou flexibilní a elastické. TPU je materiál například vhodný pro tisk těsnění, manžet, krytů apod. Označuje se jako TPXXX, kde XX je nahrazeno dvojčíslím, které udává flexibilitu materiálu. Nižší číslo znamená tužší materiál. TPU je recyklovatelný a ekologicky odbouratelný materiál.

[36]

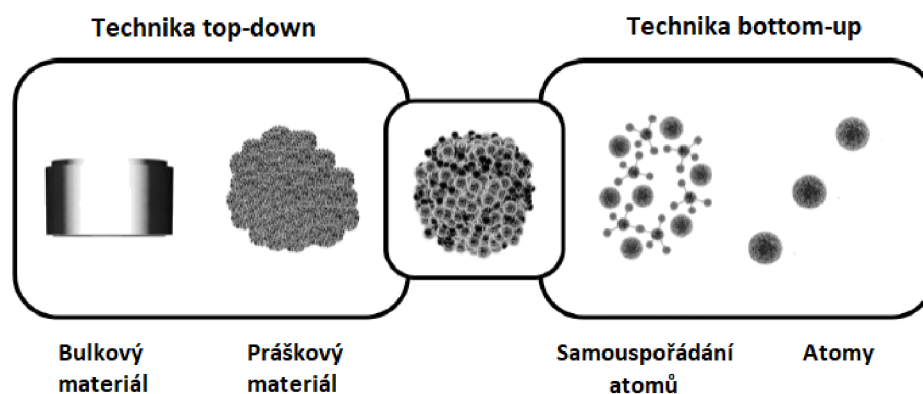
1.4 Nanomateriály

Nanomateriály nám v současné době mohou poskytnout odpovědi na aktuální i budoucí problémy naší společnosti. Z tohoto důvodu se na nanomateriály v poslední době zaměřuje čím dál více vědeckých laboratoří na celém světě. Obecně lze říci, že vývoj nanomateriálů můžeme označit za průmyslovou revoluci 21. století. Obor nanotechnologie není znám pouze v posledních několika letech, jeho začátky se dají datovat v 50. letech 20. století, kdy se nanotechnologii začal věnovat americký fyzik Philips Feynman. Tento fyzik základní myšlenky o nanovědě představil v roce 1959 na výroční schůzi Americké společnosti fyziků v Caltechu v přednášce zvané Tam dole je spousta místa (There's Plenty of Room at the Bottom). Sice tyto myšlenky museli znít v 50. letech jako sci-fi, ale postupným vývojem vědy a techniky dalo již v 70. letech vznik nového oboru s názvem „nanotechnologie“. Půjdeme-li dál do historie, zjistíme, že lidstvo je schopno využívat vlastnosti nanočástic několik stovek let a v přírodě se vyskytují a využívají nanomateriály od počátku věků. [37]

Obor nanotechnologie se zabývá výrobou, vlastnostmi a využitím materiálů na úrovni několika nanometrů. Tyto procesy probíhají na atomové a molekulární úrovni v rozměrech menších než 100 nm. Materiály v této úrovni ztrácí své konvenční vlastnosti a získávají nové fyzikálně-chemické vlastnosti, které si najdou využití v mnoha průmyslových odvětvích, například: v materiálovém inženýrství, v textilním průmyslu, v biotechnologiích, elektrotechnice apod. Zmíněné nové vlastnosti nanomateriálů mohou být: dobrá elektrická a tepelná vodivost, rozptyl světla, absorpce světla, přilnavost, smáčivost a další. [38]

Nanomateriály můžeme klasifikovat jako materiály, které mají jeden nebo více rozměrů menších než 100 nm. Pomocí této klasifikace můžeme nanomateriály rozdělit podle počtu dimenzí, které tyto materiály obsahují, celkem se tedy nanomateriály rozdělují do 4 skupin, a to na 0D, 1D, 2D, 3D. Typickým představitelem kategorie 0D nanomateriálu jsou nanočástice, u tohoto nanomateriálu jsou všechny rozměry měřitelné pouze v nanometrech. Jako zástupce této kategorie můžeme brát kvanto-

vé tečky nebo fullereny. Další kategorie, a to 1D, obsahuje nanovlákná, které mají v jedné dimenzi rozměr v řádech mikrometrů. Ve třetí skupině 2D máme obsažené tenké filmy, nano povrchy, nebo planární útvary. V poslední skupině 3D máme objekty, které dohromady tvoří mikrometrové útvary, ale jednotlivé části mají rozměry v nanometrech a jedná se o polykrystaly. [39]



Obrázek 1.6: Schéma dvou možností výroby nanočástic [40]

V dnešní době máme mnoho možných technik výroby nanomateriálů. Výrobu nanočástic můžeme rozdělit podle techniky výroby například na: chemické vs. fyzikální nebo ekologické vs. nebezpečné. [40] Další kategorie rozdělení výroby nanočástic je založena na změně velikosti prekursorů nanočástic. Konkrétně se jedná o dvě základní metody „bottom-up“ a „top-down“, které jsou znázorněné na obrázku 1.6. Techniky výroby nanočástic „top-bottom“ připravují nanočástice redukováním velikosti prekursorů až do samotného vzniku nanočástic. Zatímco metoda „bottom-up“ využívá samo seskupení hmoty, tudíž nanočástice se musí vytvořit z atomů prekursoru. Tato metoda je typicky známá pro mokré chemické metody. [37]

1.4.1 Historie

Jak již bylo zmíněno nanomateriály se v přírodě vyskytují po tisíce let a nejsou tudíž jen senzací posledních desítek let. Rostliny například využívají vlastnosti nanomateriálů k ochraně před nepříznivými vlivy okolí, například před UV zářením, dehydratací, tvorbou vodního filmu apod. O tuto ochranu rostlin se starají částice vosků, které jsou dokonce v některých případech viditelné okem. V živé přírodě se nanočástice vyskytují například na motýlích křídlech, kde povrch křídel díky rozptylu světla získává nádherné barvy. [39]

Zatímco příroda využívá nanotechnologie celou dobu její existence. Můžeme datovat, že lidstvo začalo nanomateriály, díky jejím vlastnostem, využívat na začátku našeho letopočtu, avšak v těch dobách nevěděli, že se jedná o tak malé částice. I když už v té době znali pojem atom. Pojem atom poprvé použil řecký filozof Démokritos kolem roku 400př.n.l., vycházel ze slova „atomos“, což lze přeložit jako „nedělitelný“. Ve svých myšlenkách došel k názoru, že každá hmota se skládá z neviditelných a nedělitelných částic, které jsou stále v pohybu a tyto částice nazval atom. [41]

První známky využití nanomateriálů se objevily již dobách starého Egypta ve 4. století n.l. staří Egypťané využívali nanočástice různých látek, zejména Au v různých odvětvích. Například v lékařství používali prášky kovů k léčení epilepsie, úplavice, nádorů, nebo u diagnózy syfilis. Dále se nanomateriály využívaly při výrobě keramiky, nebo při výrobě skla. V těchto případech našly nanočástice využití díky jejich nenahraditelným vlastnostem u lomu světla a tím vzniku výjimečných barev. Neznámějším zástupcem této doby jsou tzv. Lykurgovy poháry, které umožňují při změně průchodu světla změnit svou barvu. Tyto poháry při nasvícení, tedy když odráží paprsky světla vypadají jako zelené, avšak při průchodu světla z vnitřku poháru se tváří jako červené. Podrobným výzkumem pohárů bylo zjištěno, že obsahují malé množství zlatých a stříbrných nanočástic. [42]

Někdy v 6.století na území dnešní Indie začala vznikat ocel, která svými vlast-

nosti, hravě překonávala ostatní oceli z té doby. S touto ocelí se nejvíce obchodovalo v Damašku, odkud také dostala svůj název: Damašková ocel. Byla velmi tvrdá, houževnatá, pružná a na povrchu měla nezaměnitelnou kresbu. Díky těmto vlastnostem byla velmi ceněná a výroba utajovaná, což při vývoji střelných zbraní vedlo k zapomnění výrobního procesu. Při testech damaškové ocele v laboratořích se prokázalo, že tyto vlastnosti ocel získala díky struktuře z centimetrových nanovláken a uhlíkových nanotrubiček. [39]

Ve středověku se prášky různých kovů, nejčastěji zlata, stříbra a síry, používaly v glazurách na barvení keramiky a skla. Takto obarvené předměty (Obrázek 1.7) pak dosahovaly zajímavých a ceněných barevných efektů.[43]



Obrázek 1.7: Vitráž barvená pomocí nanočástic [43]

V roce 1957 se anglickému fyzikovi a chemikovi povedlo získat koloidní zlato pomocí redukce vodného roztoku tetrachlorozlatitanu. Dále v roce 1861 popsal jako první na světě suspenzi obsahující nanočástice o rozměrech 1-100 nm Thomas Graham a nazval ji koloidním systémem. [42] V roce německý fyzik Ernst Ruska ve spolupráci s německým elektro inženýrem Maxem Knollem vytvořil elektronový mikroskop, čímž umožnil lidstvu pozorovat nanočástice o velikosti menší než 1 nm. [44]

1.5 Laserová syntéza

Jedna z nových zajímavých metod výroby nanomateriálů, zvláště nanočástic, je laserová syntéza a zpracování koloidů (LSPC). Metoda LSPC je také známá pod názvem laserová syntéza. Obecně lze říct, že metoda laserové syntézy je představitelem metody zelené syntézy umožňující výroby nanočástic pomocí fyzikálně-chemických jevů. K přípravě nanočástic se využívá laser s vysokým výkonem, který ozařuje materiál standardně ponořený do kapaliny, přičemž dochází k interakci mezi laserovým paprskem a odstřelovaným materiálem. Tento proces vede ke vzniku roztoku nanočástic v kapalině. [45, 46]

Metodologie LSPC byla objevena na přelomu 80. a 90. let během výzkumných studií ve Spojených státech amerických. V průběhu hlavních studií byla i metoda LSPC dovedena k dokonalosti. Metodika laserové syntézy má v současné době ohromný potenciál překonat ostatní metody ve všech směrech. LSPC je výkonnější, jednodušší a dosahuje větších účinností. Přínosy laserové syntézy jsou: nízké náklady, bezpečnost během použití, automatizace, opakovatelnost, chemická udržitelnost, hodně možností využití a bez ligandů. U této metody nezáleží na tlaku a teplotě v místnosti během výrobního procesu. Kromě těchto výhod má LSPC nespornou výhodu v nepoužití nebezpečných látek a během výrobního procesu ani nebezpečné látky nevznikají. Laserová syntéza nám umožňuje vyhnout se škodlivým účinkům na životní prostředí, na což se nejvíce zaměřuje moderní věda. Díky tomu se na laserovou syntézu v poslední době zaměřuje čím dál více lidí. [40]

Bohužel i přes bezesporné množství výhod přináší laserová syntéza i některé nevýhody. Například nemůžeme přímo syntetizovat organické nanočástice, protože během LSPC vzniká vysoká teplota uvnitř procesu, která vede ke spálení organické hmoty. Mezi hlavní nevýhody patří v současné době nízká produktivita výrobního procesu, která se dá řešit různými úhly pohledu. Hmotnostní produktivita se lze zvýšit při použití výkonného laseru s velkou opakovací frekvencí paprsku. Kruhovou polarizací, tvorbou laserem indukované periodické povrchové struktury (LIPSS)

a volbou vhodné kapaliny. Nyní má laserová syntéza nevýhodu ve velkých počátečních nákladech na pořízení laseru. V blízké době jsou předpoklady takové, že bude metodika levnější, a to díky pokroku ve výrobní technologii laserů a také díky jejich vylepšování k větším výkonům a větší opakovací frekvenci. Na laserovou syntézu můžeme využít dva typy přístrojů, a to kontinuální laser a pulzní laser.[45]

U použití kontinuálního laseru se využívá k výrobě nanočástic u LSPC tepelných efektů. Jednoduše řečeno, laserový paprsek s nízkým výkonem nám ozařuje vzorek fotony. Fotony se na vzorku přemění na energii v podobě tepelných vibrací, které pohybují materiálem. Nahromaděná energie laseru způsobuje tavení, vypařování nebo explozi materiálu. Proto vede kontinuální ozařování materiálu ke spoustě nežádoucím efektům: uvolnění energie do okolního média, stínění kavitačních bublin apod. Všechny tyto jevy snižují efektivitu výroby. Z těchto důvodů není kontinuální laser moc vhodný pro LSPC. [2]

Při použití pulzního laseru se výše zmíněným nevýhodám vyhnout a tím zvýšit účinnost syntézy. Během laserové syntézy za použití pulzního laseru se využívá vysoká energie pulzů, tj. vysoká hustota fotonů, přenesena do vzorku v ultrakrátkém čase, to činí pulzní laser jako ideální volbu pro LSPC. Extrémní špičkový výkon pulzního laseru v krátkém čase dosáhne prahu tvorby nanočástic bez nežádoucích účinků, které se vyskytují u kontinuálního laseru. Ultrakrátké trvání laserového paprsku nedává dostatek času materiálu přeměnit energii na vibrace posilující nežádoucí účinky. [2]

V případě použití pulzní laserové syntézy jsou efekty LSPC závislé na době trvání pulzu. Tyto změny pulzů laserových paprsků mají hlavní roli v účincích LSPC. V této souvislosti nejvíce používáme pulsní lasery s dobou trvání paprsku v nanosekundách, pikosekundách a femtosekundách. Attosekundové lasery s dobou trvání pulzu na úrovni 10^{18} s zatím pro tuto metodiku nebyly použity. Tvrzení, že vyšší špičkový výkon a kratší doba pulzu musí vést k nejlepšímu výsledku LSPC je platný pouze v případě mikrosekundových a nanosekundových laserů. I v případě pulzních laserů se setkáváme s uvolněním energie, jako tomu je u kontinuálních laserů. Vzhledem ke krátké době trvání pulzu laserového paprsku bude čas na uvolnění nežádoucí energie

krátký dost na to, aby uvolněná energie do okolní kapaliny byla zanedbatelně malá před uvolněním nanočástic. [2]

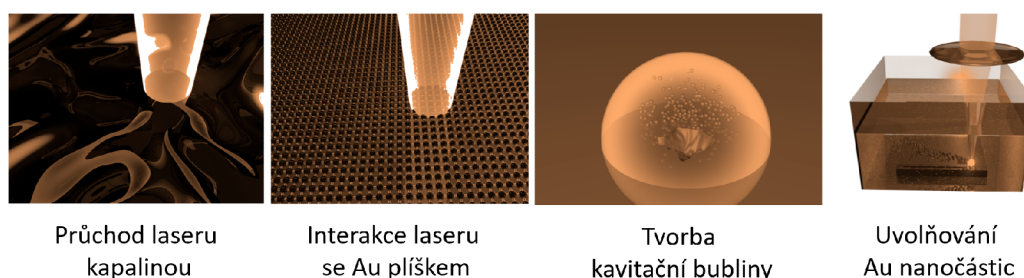
Tvorba nanočástic se stává komplikovanější u kratších trvání pulzu, konkrétně na čase menším než 100 ps. Extrémně vysoký pulzní výkon spojený s těmito extrémně krátkými dobami pulzů by totiž mohl vést k nelineárním optickým jevům jako je optické zhroucení, samoostření, filamentační efekty, kaskáda ionizace apod. Jedním z nejdůležitějších efektů je elektro-fotonový relaxační čas, který se objevuje v oblasti pikosekund umožňující pikosekundovým a femtosekundovým laserům úplnému zabránění uvolnění energie ve formě tepla. Jev zodpovědný za vznik nanočástice se nazývá multifotonový ionizační jev. Kromě něho ještě dochází k nelineárním optickým jevům v kapalině, to může vést ke změně ohniska laseru, což v konečném důsledku způsobí ztrátu energie ještě předtím, než se paprsek dostane ke kontaktu se vzorkem. LSPC zahrnuje celkem pět základních metod. Tyto metody jsou známé jako: Laserová ablace v kapalinách (LAL) [47], tavení laserem v kapalinách (LML) [45], laserová fragmentace v kapalinách (LFL) [48], inženýrství laserových efektů v kapalinách (LDL) [49] a laserová fotoreakce v kapalinách (LPL) [50, 51], reaktivní laserová ablace v kapalinách (RLAL) [40, 52]. Každá z těchto metod vyžaduje jiné jevy a z tohoto důvodu je potřeba pro každou metodu zvolit vhodný laser.

1.5.1 Laserová ablace

Laserová ablace v kapalinách představuje hlavní techniku v oblasti laserové syntézy. Laserová ablace využívá ozařování materiálu, kterým je obvykle tenká fólie tvořená kovem s vysokou čistotou, ponořeného do kapaliny s vysoce výkonným laserem. Kapalina, ve které je ponořen ozařovaný materiál musí být průhledná nebo málo absorbující použitou vlnovou délkou laseru. Použití vhodné kapaliny a výkonný laser zaručuje účinnou laserovou ablaci. Protože laserová ablace vzniká v průhledné kapalině, dochází k interakci laser-materiál. Na materiálu laserový paprsek vede k vytvoření plazmy během několika stovek pikosekund. V případě použití femtosekundové

ho laseru je mechanismus zodpovědný za tvorbu plazmy multifotonionizace. Spolu s vytvořením plazmy se uvolní malé kousky z ozařovaného materiálu. Po ochlazení plazmatu je uvolněná hmota uzavřena v kavitační bublině vzniklé z objemové expanze kolem oblasti střetu laseru s materiálem. Expanze způsobí společně s fázovým přechodem okolí kapaliny lokální destabilizované podmínky. Tlak se v místě ohniska laseru zvýší na řád gigapascalů. V okamžiku vytvoření kavitační bubliny, se bublina v okolí ozařované části postará o přenos energie z ozařovaného místa do okolní kapaliny. Doba existence kavitačních bublin je přímo závislá na době trvání laserového paprsku a jeho energii. Po zániku kavitační bubliny se částice uvolní do okolí v podobě kapaliny, čímž vzniká konečný koloid. Který byl potvrzen metodou maloúhlového rozptylu rentgenového záření (SAXS), oblast zániku kavitační bubliny zahrnuje spoustu energie, která může podpořit vznik druhotnou kavitační bublinou, kterou může následovat ještě další. Tvorba dalších bublin je závislá na vlastnostech laseru, vlastnostech prostředí a primárních kavitačních bublinách. V důsledku dynamika kavitačních bublin hraje významnou roli v konečné produkci laserové ablace, dále ovlivňuje jevy vyskytující se uvnitř ablace například nelineární optické efekty, které snižují výtěžnost ablace. I když na výtěžnosti laserové ablace nehrají roli jen kavitační bubliny [40, 45, 49].

Laserová ablace v kapalinách



Obrázek 1.8: Vizualizace jednotlivých kroků probíhajících během laserové ablace v kapalinách

Parametry laseru, zejména jeho výkon, vlnová délka a délka trvání pulzu přináší mnoho výhod a nevýhod. Za prvé zvýšení výkonu laseru vede k vyšší produktivitě nanočástic. Nicméně překročení prahové hranice vede k nelineárním optickým efek-

tům. Dále byl při vysoké intenzitě laseru pozorován efekt filamentace a samoostření. Tyto nežádoucí efekty ve vysoké míře snižují efektivitu výroby nanočástic. Za druhé lasery s kratší vlnovou délkou jako ultrafialové umožňují vyšší produkci na pulz ve srovnání s viditelnou vlnovou délkou nebo ve srovnání s infračervenou složkou spektra. Nicméně při použití ultrafialového laserového paprsku může být ovlivněno pohlcením laserového paprsku již vyrobenými nanočásticemi. Tento zmíněný jev vede k postupnému snižování produkce nanočástic a sekundárním nežádoucím účinkům LML a LFL v koloidu. Toto spojení činí ablaci více komplexní a kombinací dalších nekontrolovatelných efektů s laserovou ablací může vést k většímu rozptylu velikostí a různorodosti vyprodukovaných nanočástic. V neposlední řadě trvání pulzu přímo působí na laserovou ablaci. Speciálně u LAL se mluví o dvou efektech, které nepříznivě působí na laserovou ablaci a to jsou: tepelné ztráty a plazmové stínění. Tepelná ztráta je negativní efekt nejvíce snižuje účinnost ablace při použití delšího pulzu. Na druhou stranu pulzy s časem kratším než 10 ps se vyhnou ztrátě energie v důsledku zanedbatelnému efektu elektron-fotonové vazby. U nanosekundových nebo subnanosekundových paprsků laseru je tepelná ztráta energie doplněna o další negativní efekt, a to plazmové stínění. Laserem vybuzená plazma vytvořená díky laserové ablací, která v případě pikosekundových a femtosekundových laserů zmizí, změní podmínky materiálu a zabraňuje tak účinné ablací. [40]

Jednoduše řečeno, tak laserová ablace vyžaduje laser s vysokým výkonem, krátkou dobu pulzu a vysokou opakovací frekvencí v řádech kHz a MHz. Nicméně laser musí mít pohybující paprsek skenovací hlavy, aby se zabránilo stínění kavitační bubliny. Tento druh laserů umožňuje nejvyšší produkční rychlost, ale nízký výnos je jednou z největších nevýhod této metodiky.

Laserová ablace se postupným vývojem stala konkurenci schopnou technikou přípravy nanočástic. Tato metoda může být srovnatelná s nepoužívanějšími mokkými chemickými technikami. Laserová syntéza představuje metodologii s velkou výhodou řízení konečného vzhledu a složení vyprodukovaných nanočástic a téměř neomezená všestrannost výroby.

2 Experimentální část

2.1 Systém k syntéze nanočástic

Tato část práce se zabývá samotným návrhem a konstrukcí experimentálního laserového ablačního systému. Tento systém bude sloužit k automatizaci výroby nanočástic pomocí laserové ablace v kapalinách. Tento nový automatizovaný systém by měl nahradit stávající výrobu nanočástic, u které se vyskytuje velký pokles produkce nanočástic v čase, který je způsoben nedostatečným odplavováním stínících nanočástic z ozařovaného materiálu a kavitačních bublin. Dále stávající systém má nevýhodu v potřebě stálé přítomnosti operátora laseru. Nový automatizovaný systém by měl všechny tyto nevýhody eliminovat. Cílem návrhu automatizovaného ablačního systému je využít co nejvíce dostupných metod a komponentů na výrobu tak, aby se tento systém dal snadno replikovat v různých laboratořích na celém světě a zároveň byl cenově dostupný pro každého.

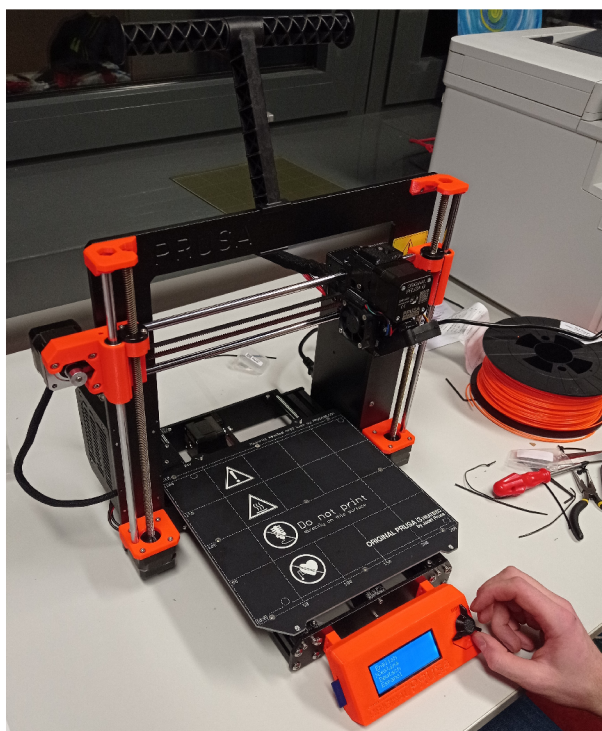
Automatizovaný systém pro výrobu nanočástic by se měl skládat z peristaltické pumpy, jednoosého lineárního posuvu k lokalizaci pevného cíle v ohniskové poloze laserového paprsku a řídicí jednotky. Ovládací řídicí jednotku by měla zastávat snadno dostupná a pro laiky snadno ovladatelná open-source platforma Arduino. Mechanické komponenty by měly být navrženy v moderním CAD programu Fusion 360 a vyrobené pomocí technologie 3D tisku. Všechny komponenty by měly být snadno ovladatelné pomocí vlastního ovládacího programu, který by u experimentů zaručil snadnou opakovatelnost.

2.1.1 Výběr 3D tiskárny

Vzhledem k potřebě realizace laserového ablačního systému pomocí technologie 3D tisku, bylo potřeba vybrat vhodnou 3D tiskárnu. V dnešní době se na trhu vyskytuje mnoho 3D tiskáren, což dává uživateli mnoho variant při výběru, ale na druhou stranu to výběr vhodné 3D tiskárny moc neulehčuje. Vybraná 3D tiskárna by měla být vhodná jak pro tištění prototypových částí, tak i pro tištění finálních komponent. Při výběru jsem se musel zaměřit na klíčové vlastnosti, které mi pomohly ve výběru tiskárny. V první řadě byl kladen důraz na kvalitu tisku. Tuto vlastnost si v specifikaci tiskárny nenajdeme. Kvalita tisku závisí na tuhosti konstrukce tiskárny, použitých komponentech a kalibraci. Proto bylo vhodné vybrat tiskárnu s automatickou kalibrací, která je přesnější. Ve specifikaci každé FDM tiskárny jsou obsaženy údaje o průměru trysky, minimální tloušťce vrstvy a maximální rychlosti tisku. Tyto tři hodnoty jsou pro výběr tiskárny podstatné. Výška vrstvy a tloušťka vrstvy nám určují viditelnost jednotlivých vrstev, platí že čím jsou tyto hodnoty menší, tak výsledný výtisk bude přesnější, ale na druhou stranu doba tisku se výrazně prodlužuje. Dále je potřeba se zaměřit na velikost tiskové plochy, ale vzhledem k předpokládaným velikostem jednotlivých částí laserového ablačního systému na velikost tiskové plochy nebyl brán zřetel. Při výběru 3D tiskárny je potřeba se také zaměřit nad licenci, respektive jestli se jedná o tiskárnu pod open-source platformou, nebo uzavřený design. S tím souvisí dostupnost náhradních dílů, možnost použití alternativních slicerů a firmware. V neposlední řadě je potřeba se zaměřit na materiál pro tisk. Technologie tisku FDM má výhodu v možnosti výběru z mnoha materiálů s různými vlastnostmi. Některé tiskárny mohou tisknout pouze ze svých cartridge, a to značně zvyšuje cenu tisku. Ve výběru je potřeba se také zaměřit na zvolení vhodné technologie tisku. Mezi tiskárnami pro domácí využití se vyskytují dva typy technologií FDM a SLA. Obě tyto technologie jsou zmíněné v kapitole „1.3.1 Technologie“.

Po promyšlení všech těchto kritérií jsem se rozhodl vybrat 3D tiskárnu od české firmy Prusa Research, u které jsem se rozhodoval ve výběru konkrétně mezi tiskár-

nami Original Prusa i3 MK3S+ a Original Prusa SL1S SPEED. Nakonec kvůli větší variabilitě materiálů, lepší dostupnosti dílů, uživatelsky přívětivějšímu tisku, nižším pořizovacím nákladům a nižším nákladům na tisk rozhodl pro prvně zmíněnou tiskárnu Original Prusa i3 MK3S+ (Obrázek 2.1).



Obrázek 2.1: 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S+

Original Prusa i3 MK3S+

Jedná se o nejnovější verzi léty osvědčené tiskárny od firmy Prusa Research, jejíž první typ byl na trh uveden v roce 2012. Tato tiskárna je uživateli velmi oblíbená, a proto je rozšířená po celém světě. Jelikož se jedná o tiskárnu s open-source licencí, je často kopírovaná a existuje tím pádem na trhu mnoho neoficiálních variant. Vzhledem k rozšíření této tiskárny mezi nadšenci i profesionály má tato tiskárna velkou uživatelskou základnu, podporu a snadno dostupné náhradní díly. Nejnovější verze tiskárny dostala spoustu vylepšení například novou sondu SuperPinda, kvalitnější ložiska, senzor filamentu a mnoho dalších vylepšení. Tiskárna se dodává ve dvou verzích, a to buď stavebnice nebo složená tiskárna připravená k tisku.

Pro účely této diplomové práce byla tiskárna pořízena ve verzi stovebnice a v rámci práce byla tiskárna složena, zkalibrována a tím připravena k tisku. Stavba tiskárny byla nenáročná a podle návodu byla rozdělena na 9 částí, respektive na 9 kapitol. Ke každé kapitole patří označený sáček s díly potřebnými k montáži každé části, to značně usnadnilo hledání dílů. Celou stavbu tiskárny doprovází Haribo medvídci dodávané s tiskárnou, které na konci každé kapitoly nahrazují pokrok v procentech a balení vyjde přesně na celou stavbu. Při prvním spuštění tiskárny se spustí sebekontrola, která zjistí, jestli je tiskárna správně složena. V mém případě narazila na prohození dvou chladících větráčků. Po snadné opravě a kalibraci první vrstvy byla tiskárna připravená k tisku.

Výběr materiálu

Pro tisk jednotlivých komponent systému k syntéze nanočástic, bylo potřeba vybrat vhodný materiál, který bude odolný vůči kapalinám využívajících se u laserové ablace. Mezi tyto kapaliny se řadí voda, aceton, ethanol a n-hexan.



Obrázek 2.2: Test odolnosti materiálů za pokojové teploty

Vzhledem k nejasnosti odolnosti vybraných materiálů na webech a v závislosti odolnosti vybraných materiálů na přidávaných aditivech jsem se rozhodl všechny perspektivní materiály otestovat. Mezi tyto materiály patří nejčastější materiály pro

FDM tisk, a to PLA, ABS, PETG a TPU. Základními vlastnostmi těchto materiálů se zabývám výše v kapitole: „1.3.2 Materiály pro FDM“. Metoda měření odolnosti materiálů vůči kapalinám probíhala v umístění testovaných materiálů do jednotlivých kapalin, kde se nejprve testovala odolnost při pokojové teplotě (Obrázek 2.2) a následném zahřátí.

Vyhodnocení proběhlo pozorováním a porovnáním s novým materiálem a výsledky byly sepsány do tabulky (Obrázek 2.3). Ukázalo se, že ABS a TPU neodolává acetonu ani ethanolu, a tudíž je pro naše využití nevhodné. V acetonu se z PLA začala uvolňovat barva a ethanolu po delším čase, nebo teplotách větších než 50 °C začalo chovat nestabilně. Proto jsem se z důvodu snadného tisku a ekologické odbouratelnosti rozhodl využít PLA jen pro tisk prototypů určených k testování za použití vody. Během tohoto testu se ukázalo, že materiál PETG je odolný acetonu při teplotách mezi 65-70 °C, a proto je vhodné pro tisk finálního zařízení pro automatizaci laserové ablace v kapalinách.

	ABS		PLA		PETG		TPU	
	25 °C	50 °C	25 °C	50 °C	25 °C	50 °C	25 °C	50 °C
Voda	✓	✓	✓	δ	✓	✓	✓	✓
n-hexan	✓	✓	✓	δ	✓	✓	✓	✓
Etanol	×	×	✓	δ	✓	✓	δ	δ
Aceton	×	×	×	×	✓	✓	δ	δ

"✓" = stabilní materiál ; "δ" = tržná deformace ; "x" = rozpouštění materiálu

Obrázek 2.3: Tabulka testované odolnosti materiálů

2.1.2 Výběr motoru

Při návrhu automatizace laserového ablačního systému bylo před výběrem řídicí jednotky potřeba nejprve vybrat vhodné motory pro peristaltickou pumpu a výškový lineární posuv. Vzhledem k cíli diplomové práce snadné dostupnosti dílů s nízkou

cenou bylo potřeba vybrat motorčky, které tyto požadavky splňují a zároveň se dají snadno řídit. Pro lineární posuvy se ve většině případů využívají krokové motory, protože umožňují otáčení po krocích, jak již název napovídá, a tím dosahují přesného posuvu. Další výhodou krokových motorů je velká mechanická odolnost, velká životnost a velký rozsah pracovních otáček. Při nesprávném zvolení vhodného motoru a driveru může dojít ke ztrátě kroku nebo při vyšších otáčkách k zastavení motoru. Naštěstí výhody krokových motorů přesahují všechny jejich nedostatky a nevýhoda potřeby driveru se mění spíše ve výhodu, protože díky tomu jsou drivery snadno dostupné a v mnoha provedeních. Při použití krokového motoru u peristaltické pumpy umožní uživateli snadné řízení stabilního průtoku od nízkých otáček a zároveň pomocí možnosti pootočení o pár stupňů umožní pumpě dávkovací režim.



Obrázek 2.4: Krokový motor NEMA 17

Pro lineární posuv a peristaltickou pumpu jsem se rozhodl tedy použít krokové motory. Vzhledem k podobným požadavkům u obou zařízení jsem zvolil krokový motor se stejnými parametry ze série NEMA 17 konkrétně model 17HS4401 (Obrázek 2.4). Jedná se o bipolární neboli dvoufázový krokový motor s krokem $1,8^\circ$, tedy s přesností 200 kroků na otáčku. Tento motor dosahuje dostatečného kroutícího momentu 0,4 Nm při jmenovitém proudu 1,7 A. [53]

2.1.3 Výběr řídicí jednotky

S výběrem řídicí jednotky na bázi Arduina souvisí předešlá kapitola o výběru motoru. Protože na základě technologie a parametrů vybraného motoru je potřeba vhodně zvolit drivery. V první řadě výběru řídicí jednotky bylo tedy vhodně vybrat driver, který se bez větších komplikací bude snadno ovládat Arduinem. Na trhu se těchto driverů krokového motoru celá řada, a proto jsem se rozhodl po průzkumu trhu vybrat jeden z následujících driverů: Easydriver A3967, L298N, A4988 a DRV8825.

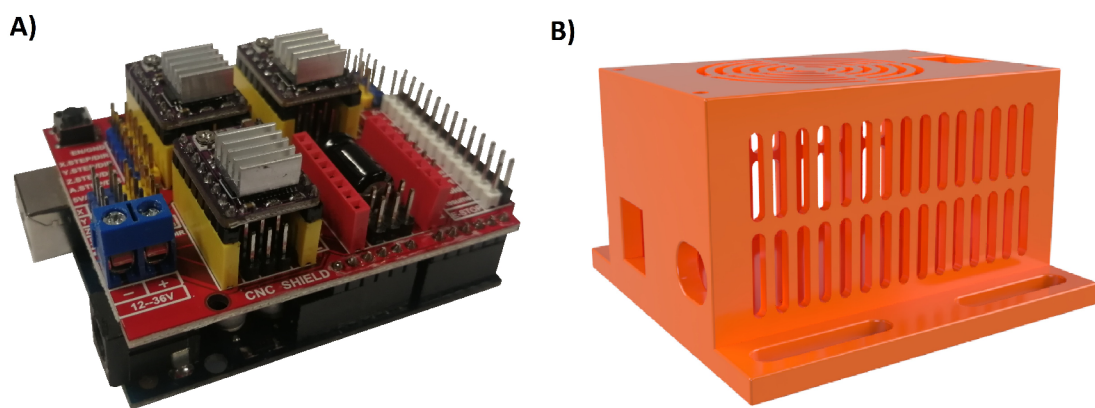
Easydriver A3967 je jednoduchý driver krokového motoru, který je díky 5 V logice kompatibilní s platformou Arduino. Umožňuje mikrokrokování až do rozlišení 1/8 kroků, což při použití u vybraných motorů znamená 1600 kroků na otočku. Bohužel maximální výstupní proud tohoto driveru je pouze 750 mA, a to je pro naše účely málo [54]. Driver L298N sice má maximální proud 2 A, umožňuje ovládní dvoufázových a čtyřfázových krokových motorů, ale je spíše určen pro řízení dvou standardních DC motorů do proudu 2 A. Tomu i napovídají jeho velké rozměry s masivním chladičem [55]. Pro řízení laserového ablačního systému bychom potřebovali 3 tyto drivery, což při tak velkých rozměrech je pro nás nevhodné.

Zbývají nám tedy dva drivery A4988 a DRV8825. Jedná se v základu o dva podobné drivery o stejných rozměrech se stejnou logikou řízení, jsou tedy do jisté míry zaměnitelné. Oba drivery zvládají maximální výstupní proud kolem 2 A. Přesněji driver A4988 má maximální výstupní proud 2 A [56] a driver DRV8825 zvládá 1,5 A bez chlazení a až 2,5 A s použitím aktivního chlazení a při změně referenčních rezistorů [57]. Oba drivery umožňují mikrokrokování, konkrétně driver A4988 umí až rozlišení 1/16 a DRV8825 umí 1/32. Porovnáme-li oba drivery, zjistíme, že v případě driveru DRV8825 se jedná o vylepšenou verzi staršího driveru A4988. Pomineme-li vyšší pořizovací cenu DRV8825 je tento driver ve všech ohledech lepší, a proto jsem vybral ten.

Hlavní výhoda, zatím nikde nezmíněná, vybraného driveru je možnost umístění driveru do rozšiřujícího modulu vyráběného pro Arduino a tím ulehčit jeho připojení

k Arduinu. Těchto rozšiřujících karet se na trhu vyskytuje několik a rozdělují se podle typu Arduina, pro které jsou určeny. Pro Arduino Mega vznikl zejména modul RAMPS 1.4, který je převážně určen pro amatérské 3D tiskárny RepRap. Tento modul má místo pro celkem 5 driverů DRV8825 a dále má 2 silové výstupy primárně určené pro Extruder a vyhřívanou tiskovou plochu. Vzhledem k tomu, že tyto funkce nepotřebujeme rozhodl jsem se použít jednodušší modul. Pro Arduino Uno vznikla rozšiřující karta CNC Shield V3 a pro Arduino vznikl CNC Shield V4. Oba tyto moduly jsou dost podobné a jediný rozdíl kromě jiného Arduina je to, že modul ve verzi V3 umožňuje osazení čtyřmi drivery krokových motorů. Dále výhodou CNC modulu ve verzi V3 je možnost při nedostatku výpočetního výkonu, nebo potřeby dalších funkcí umístění modulu na Arduino Mega a zároveň je lépe dostupný.

Z výše zmíněných důvodů jsem se rozhodl pro řízení zařízení pro LAL využít zmíněné komponenty a vznikla tak kombinace Arduino Uno + CNC Shield V3 + 3x DRV8825 (obrázek 2.5). Pro takto vybranou řídicí jednotku jsem v programu Fusion 360 navrhl box. Tento box má na spodní straně drážky pro přišroubování na pracovní desku laserového pracoviště s roztečí závitů 2,5 mm. Díky vzdušnému provedení bude umožňovat snadnému odchodu tepla z chladičů driverů i bez aktivního chlazení, čímž se zabrání přehřívání driverů (Obrázek 2.5).



Obrázek 2.5: A) Řídicí jednotka B) Navržený kryt řídicí jednotky

Nastavení driverů

Při nastavení driverů, před přivedením napětí na driver je potřeba v první řadě zkontrolovat, jestli je na driver připojen motor, v případě že nebude připojen, hrozí nevratné poškození driveru, což se mi bohužel povedlo otestovat. U driveru DRV8825 je potřeba pro správného fungování krokového motoru nastavit dva parametry. Prvním parametrem je nastavení mikrokrokování a druhým je nastavení jmenovitého proudu. Nastavení mikrokrokování se dělá pomocí kombinace celkem třech jumperů, které piny M0, M1 a M2 na driveru propojují s GND. Tato kombinace určuje, kolik pulzů bude potřeba na otočku krokového motoru o 360° . U peristaltické pumpy jsem se rozhodl mikrokrokování nepoužít. Tím pádem na jednu otočku peristaltické pumpy je potřeba základních 200 pulzů vycházejících z konstrukce motoru. U lineárního posuvu jsem zvolil a nastavil mikrokrokování na $1/8$, to vychází na 1600 pulzů na jednu otočku posuvu, díky kterým dosáhnou přesnějšího odměřování a posuv bude mít tišší chod. Nastavení rozlišení mikrokrokování na $1/8$ se provádí připojením GND na pin M0 a M1. Toho lze snadno dosáhnout přidáním dvou jumperů pod driver na CNC Shield.

Driver DRV8825 obsahuje nastavitelné omezení proudu, tím se dosáhne velkého rozsahu vstupního napětí od 8,2 V do 45,0 V a předejde se tím zničení motoru.[57] Nastavení omezení proudu se tedy potřeba přizpůsobit každému motoru podle jeho parametrů. Nastavení omezení proudu probíhá pomocí miniaturního trimru na desce driveru. Otáčením tohoto trimru se nastavuje omezení proudu a abychom nemuseli měřit proud tekoucí do motoru, obsahuje driver snímací rezistor R_{sense} o hodnotě $0,1 \Omega$. na kterém se dá změřit úbytek napětí, podle kterého lze snadno dopočítat maximální proud. Referenční napětí se měří mezi GND a samotným trimrem. Pro napájení motoru jsem zvolil proud I_{max} 1,6 A, je to sice proud o něco nižší než jmenovitý proud motoru, ale motor se nebude tolik zatěžovat a výsledný moment motoru se o moc nezmenší. Zároveň výhoda nižšího proudu je, že se driver zvládá uchladit i za pomoci pasivního chlazení. Referenční napětí pro nastavení proudu jsem vypočítal pomocí následujícího vzorce vycházejícího z vnitřní konstrukce driveru

DRV8825: [57]

$$U_{ref}(V) = I_{max}(A) \cdot 5 \cdot R_{sense}(\Omega) = I_{max}(A) \cdot 0,5 = \frac{I_{max}(A)}{2} = \frac{1,6}{2} = 0,8V$$

Kde U_{ref} značí referenční napětí, I_{max} požadovaný maximální proud motoru a R_{sense} označuje snímací rezistor.

2.1.4 Lineární posuv

V rámci diplomové práce bylo potřeba navrhnout výškový lineární posuv pro ideální zaměření ohniska laseru ozařujícího zlatý plíšek v kapalině. Tak jako na vše byl požadavek na výrobu většiny dílů na 3D tiskárně, tedy kromě krokového motoru, kabelů, koncového spínače a spojovacích materiálů. Z tohoto důvodu jsem se musel zaměřit na dva základní problémy konstrukce lineárního posuvu. Prvním problémem zastává otázka: Jak vyřešit lineární vedení bez použití lineárních ložisek a bez jakékoliv kolejnice lineárního vedení. Druhý problém zastával volbu řešení výškového posuvu bez využití kovového trapézového šroubu nebo kovové tyče.

Při konstrukci vedení lineárního posuvu se tedy muselo experimentovat s více možnostmi návrhu a zároveň se musela otestovat vyrobitelnost jednotlivých dílů na 3D tiskárně. Jako první nápad k výrobě posuvu byl, pokusit se udělat vedení jako na 3D tiskárně Průša i3, jenže jsem narazil na problém s tiskem válcových tyčí a konstrukce ložisek za použití ocelových kuliček by byla moc velká, proto jsem tento nápad zavrhl. Jako další návrh řešení bylo udělat kopii kolejnicového vedení s lineárním kuličkovým ložiskem. Vzhledem k tomu, že kuličky ložiska nešly vytisknout, musel jsem tedy použít kovové. Toto řešení se také neukázalo jako správná volba, protože vodící drážka pro kuličky nebyla moc hladká, navíc v dutině pro kuličky byly otřepy, proto se ložisko dost zadržovalo a dále zde bylo složité navrhnout mechanismus vymezení vůle ložiska. Třetí možností řešení spočívalo v použití stávající kolejnice lineárního posuvu a nahradit pouze kuličkové ložisko ložiskem třecím. U tohoto řešení se vymezení vůle ložiska dalo vyřešit vymežujícími šrouby, ale při tření kov-plast hrozilo rychlé opotřebení. Tento posuv zároveň vyžadoval mazání,

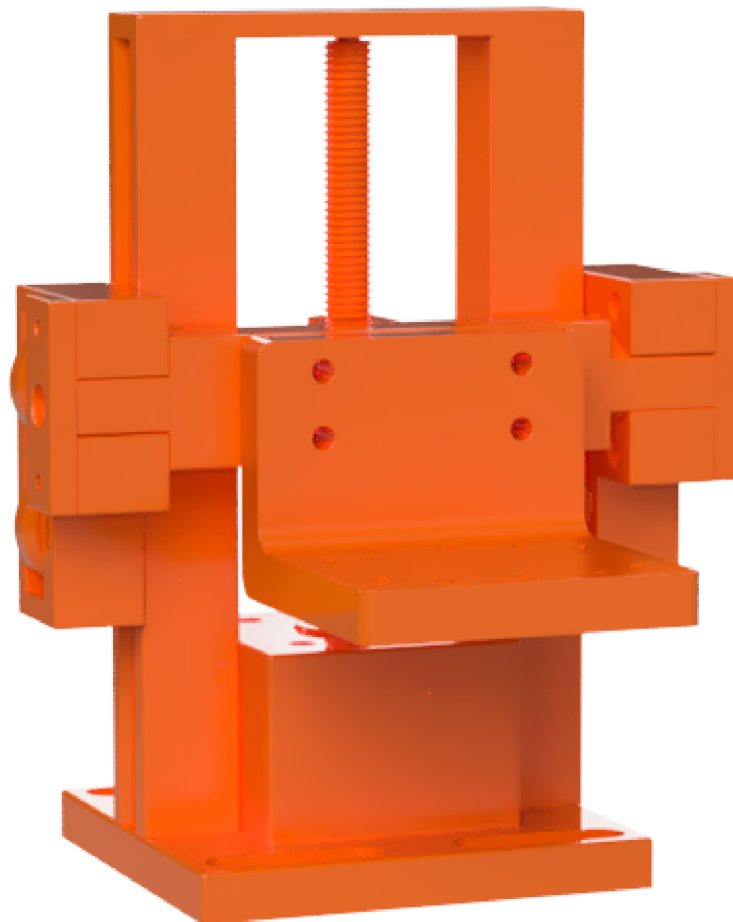
které stěžuje manipulaci a způsobuje zachytávání prachu. Průlom nastal při pohledu na řešení některých 3D tiskáren, které se pohybují pomocí koleček v kolejnicích. Toto, řešení je snadno vyrobitelné na 3D tiskárně, a proto jsem se rozhodl ho využít v mojí konstrukci.

Pro posuvy se u malých CNC strojů a 3D tiskáren nejčastěji využívá dvou řešení. V prvním řešení se využívá pro posuv ozubený řemínek, který je napnutý mezi řemenicí motoru a napínací kladkou. Jezdec je k řemínku pevně připojen a tím se může posouvat na obě strany. Toto řešení ale není vhodné pro výškovou osu Z z důvodu, že při odpojení motoru od elektřiny se odbrzdí krokový motor a působení váhy jezdců s posouvanou komorou za působení gravitace způsobí pokles posuvu. Tento možný stav je způsoben přímým převodem z hřídele motoru a dal by se vyřešit přidáním převodovky, ale to by bylo složité. Druhé řešení využívá k posuvu šroubovici, která je na posuv v ose Z vhodnější než řemen. Na toto řešení posuvu lze použít jak obyčejný šroub s matkou, tak i přesný trapézový šroub. Mým úkolem bylo vymyslet posuv za pomoci 3D tisku, proto jsem experimentoval s různými druhy závitů tištěných na 3D tiskárně. Během těchto experimentů se ukázalo, že nejlepší řešení je pro moje účely 3D vytištěný M10 šroub se stoupáním 1,5 mm. Při spojení tištěného šroubu s tištěnou matkou se musel šroub přeříznout závitovým očkem a matka proříznout závitníkem. Tomuto kroku se dalo vyhnout použitím ocelové matky.

V konečné konstrukci jsem se tedy rozhodl použít tištěné kolečka v kolejnici a pro posuv jsem využil tištěný šroub M10x1,5 mm ve spojení s ocelovou matkou. Vzhledem k váze motoru 280 g jsem se motor rozhodl umístit na spodní stranu posuvu. Kvůli možnému úniku kapalin jsem motor umístil do krytu a tím vznikla základna. Základna byla následně doplněná o drážku k uchycení ke stolu pracoviště, dva lineární posuvy a jezdec s odnímatelným držákem ablační komory. Na stranu jezdců jsem zároveň umístil 2 vymežovací šrouby k vymezení vůle posuvu.

Po sestavení posuvu (Obrázek 2.6) jsem měřil délku posuvu, odchylku kolmosti posuvu od stolu a zároveň házivost posuvu pomocí páčkového úchylkoměru. Navržený posuv dosahuje vzdálenosti posuvu 9 cm. Měření odchylky kolmosti posuvu

od stolu a házivost posuvu probíhalo na dvou místech při posuvu v ose Z v oblasti ohniskové vzdálenosti laseru. Měřil jsem tedy na ose X a ose Y. Měření ukázalo odchylku kolmosti na této oblasti za zanedbatelnou, a to v obou osách. Házivost dosahovala v ose X 0,025 mm a v ose Y 0,03 mm, vzhledem k tomu, že měření probíhalo na 3D tištěném materiálu je tato házivost způsobena nerovnou strukturou povrchu.



Obrázek 2.6: Navržený lineární posuv

2.1.5 Peristaltická pumpa

Peristaltická pumpa je objemové čerpadlo pracující na principu postupném stlačování měkké nejčastěji silikonové hadičky a postupném posouvání stlačovaného místa, tím vlastně dojde k posouvání kapaliny v hadičce. Postupným tlačáním kapaliny vzniká podtlak, který opětovně nasává kapalinu. Tento princip čerpadla se používá všude tam, kde je potřeba vyhnout se kontaminaci přečerpávané kapaliny, protože kapalina se dostane do styku pouze s hadičkou, což je například v chemických laboratořích a ve zdravotnictví.

Na navržení peristaltické pumpy kladeny požadavky na nastavitelný průtok dosahující rychlosti alespoň 250 ml/min. Tato rychlost je nezbytná k odstranění kavitačních bublin. Jak již bylo zmíněno, kavitační bubliny se tvoří po procesu laserové ablace. Pokud se však udrží ve stejném místě po celou dobu své životnosti (ms), mohou odstínit následující puls, čímž se zabrání tomu, aby laserový paprsek ozářil ablovaný materiál, a tím se sníží produkční účinnost procesu. Před navržení nové peristaltické pumpy, která lze vytisknout na 3D tiskárně, jsem musel prostudovat princip a konstrukci. K tomuto účelu posloužila stávající peristaltická pumpa v laboratoři. Peristaltická pumpa se skládá z hnací hlavy, přítlačného kola s rolnami a hnacího motoru. Motor jsem vybral již zmíněný krokový ze série NEMA 17 s dostatečným točivým momentem. Při návrhu hlavy jsem se inspiroval rozměry zmíněné stávající pumpy, ale ve finálním návrhu jsem se rozhodl pro několik změn. Hlavu peristaltické pumpy jsem se rozhodl udělat pevnou bez možnosti nastavení přítlaku, tím se omezí počet kovových dílů potřebných k sestavení. K zafixování hadičky jsem navrhl dva samosvorné kužely, které zabrání vtažení hadičky do pumpy. U přítlačného kola jsem použil celkem 4 rolny. Motor jsem podobně jako u lineárního posuvu umístil do krytu s lištou sloužící k uchycení ke stolu (Obrázek 2.7).



Obrázek 2.7: Navržená peristaltická pumpa

Test peristaltické pumpy

Nově navrženou, vytištěnou a sestavenou pumpu bylo potřeba podrobit několika testům. První test se zaměřoval na rozsah pracovních otáček při plné zátěži peristaltické pumpy. V průběhu testu se postupně zvyšovaly otáčky a pozorovalo se chování pumpy. Tímto testem se ukázalo, že plně zatížená pumpa zvládá maximální otáčky o hodnotě 450 ot/min, ale už je na mezi stability, proto bych je nedoporučoval používat. A stanovil jsem pro tento návrh maximální otáčky 400 ot/min, kdy pumpa pracovala bez problémů. Druhý test peristaltické pumpy se zaměřoval na průtok, kdy se při různých otáčkách přečerpával objem 200 ml na čas. Maximální průtok byl tímto testem naměřen 590 ml/min, tohoto průtoku dosahovala pumpa při 400 ot/min (Obrázek 2.8).



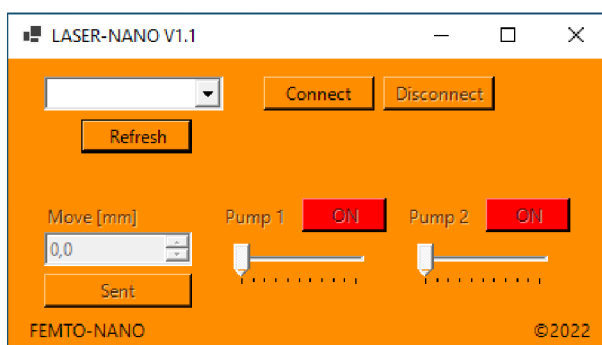
Obrázek 2.8: Graf závislosti průtoku peristaltické pumpy na otáčkách

2.1.6 Software

K navrženým komponentům systému pro automatizaci laserového ablačního systému, bylo potřeba naprogramovat vhodné grafické prostředí sloužící ke snadnému ovládání všech nově navržených komponentů. Přehledným grafickým rozhraním se dále dosáhne snadné reprodukovatelnosti jednotlivých experimentů. Naprogramování systému pro automatizaci laserového ablačního systému bylo rozděleno na dvě části. O komunikaci mezi těmito částmi je využitý sériový port nastavený na komunikační rychlost 9600 baudů.

První část byla naprogramována v programu Microsoft Visual Studio v jazyce C#. Vznikla tak přehledná aplikace LASER-NANO, sloužící pro snadné ovládání celého zařízení (Obrázek 2.9). Tato aplikace umí naskenovat sériové porty. Z dostupných portů lze vybrat potřebný port a připojit se na něj. Po úspěšném připojení na sériový port umožní ovládat lineární posuv a dvě peristaltické pumpy. Nakonec jsme použili jednu peristaltickou pumpu. Ovládání druhé pumpy bylo připraveno pro případ, že by byla potřeba další pumpa například pro nastavení přidávání kapaliny do cyklu, případně pro smíchání nanočástic s vhodnými ligandy pro jejich funkcionalizaci, a tím rozšíření jejich schopností. Ovládání lineárního posuvu probíhá pomocí

odesílání hodnoty posuvu v milimetrech a minimální krok posuvu byl stanoven na hodnotu 0,1 mm. Každá peristaltická pumpa má svoje vlastní ovládání skládající se ze zapínacího/vypínacího tlačítka a z posuvného voliče průtoku. Nastavení průtoku je možné v 11 krocích, kde 0 je nejmenší (pumpa jde vypnout dvěma způsoby buď posuvným voličem nebo tlačítkem) a největší nastavitelný průtok je 590 ml/min. Průtok lze tedy nastavovat po kroku o hodnotě 59 ml/min.



Obrázek 2.9: Ovládací program LASER-NANO V1.1

Druhá část byla naprogramování firmware pro řídicí jednotku na základě Arduina, to proběhlo v programu Arduino IDE pomocí programovacího jazyka Wiring, který vychází z jazyka C a C++. Princip tohoto firmware je, že řídicí jednotka přijímá příkazy po sériovém portu z aplikace LASER-NANO a na základě nich řídí krokové motory. Zjednodušený rozdíl mezi řízením peristaltických pump a lineárního posuvu je, že zatímco u peristaltických pump se řídí pouze rychlost otáčení časováním pulzů, tak u lineárního posuvu pochází k přesnému počtu kroků. Toto tvrzení bylo zjednodušené, protože sice pumpy jsou řízené časováním pulzů a běží v nekonečné smyčce, ale v případě vypnutých pump se tato smyčka nespustí. U lineárního posuvu byla naprogramována náběhová a sestupná rozjezdová rampa, aby nedocházelo k přeskokům kroku při prokování. Výpočet kroků posuvu probíhá v samotné řídicí jednotce. U nastavených kroků posuvu závisí na počtu kroků potřebných na otočku motoru, dále na mikrokrokování, stoupání závitu a chtěném posuvu. V našem případě máme počet kroků motoru na otočku 200, mikrokrokování nastavené na 1/8, stoupání závitu posuvu 1,5 mm/ot a chceme posun 1 mm. Výsledný počet kroků je tedy dán následujícím vzorcem:

$$Kroky = \frac{CelkoveKroky}{StoupaniZavitu} \cdot Posuv = \frac{200 \cdot 8}{1,5} \cdot 1 = 1066,6$$

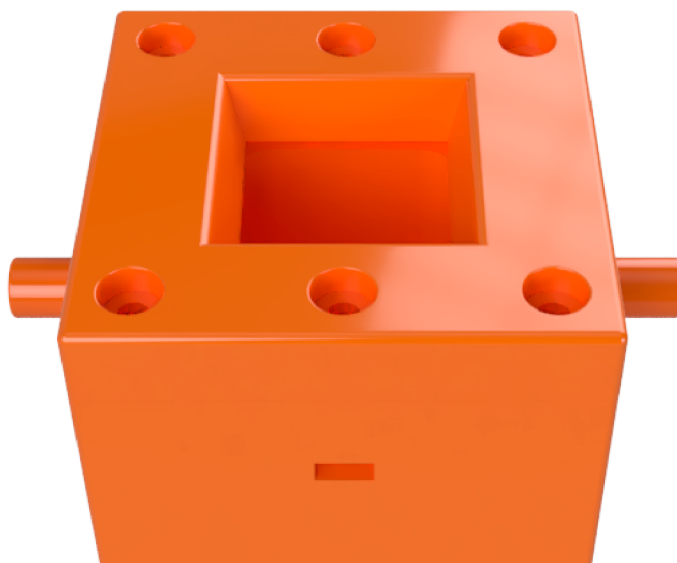
Kde Kroky značí potřebný počet kroků pro žádaný posuv, CelkoveKroky značí počet kroků na otočku motoru, StoupaniZavitu označuje vzdálenost mezi sousedními závity na šroubovici posuvu a Posuv značí žádaný posuv.

2.1.7 Abláční komora

Nejdůležitější částí diplomové práce bylo navrhnout v modelovacím CAD programu Fusion 360 ablační komoru, u které se bude moci většina částí vytisknout na 3D tiskárně. Tato ablační komora by měla zajišťovat ve spojení s peristaltickým čerpadlem a nádobou uzavřený okruh toku kapaliny. Uvnitř této komory by měla probíhat LAL za stálého průtoku kapaliny. To by mělo mít za následek zvýšení produkce metodou LAL z důvodu postupného vyplavování nanočástic a kavitačních bublin, které by mohly odstínit laserový paprsek a snížit tak produkci nanočástic. Požadavky na ablační komoru byly na již zmíněný stabilní průtok komorou a možnosti uchycení ablavovaného materiálu, který lze snadno vyměnit. Dále na vrchní části komory by se mělo nacházet skleněné okénko umožňující průchod laseru. Jako okénko byla vybrána přesná skleněná destička o rozměrech 25x25x1,1 mm (R5000828211-21235, Edmund Optics, USA).

Vzhledem k těmto požadavkům a předpokladům jsem načrtl na papír předpokládaný tvar a rozměry první verze ablační komory. Vzhledem k tomu, že jsem nevěděl, jak se bude chovat skleněná destička poblíž LAL, tak jsem zvolil vzdálenost ablavovaného materiálu a skleněné destičky na 20 mm. Přítok a odtok kapaliny z komory jsem umístil na střed komory. Celkovou konstrukci ablační komory jsem se rozhodl rozdělit na 3 části. První část byla spodní a nacházelo se na ní zahloubení pro ablavovaný materiál, v našem případě zlatá destička. Druhá část bylo tělo samotné komory. A poslední část byl krycí rámeček se zahloubením pro okénko, který sloužil k uchycení destičky. Vznikla tak komora o celkových rozměrech 50x50x35 mm (Ob-

rázek 2.10). Během testu průtoku se však ukázalo, že komoru ve vodorovné poloze nejde zaplavit, a proto potřebuje řadu vylepšení.

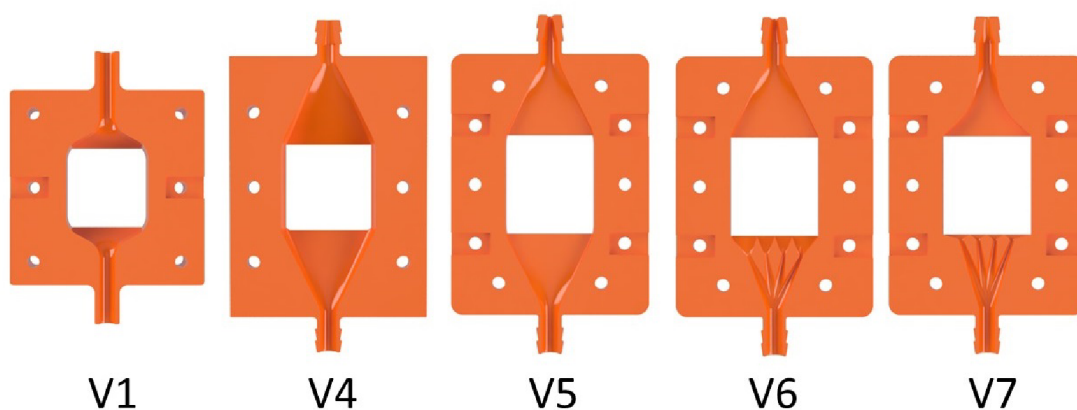


Obrázek 2.10: První verze ablační komory

Z tohoto důvodu vznikla verze komory V2, která měla tělo komory snižené na 15 mm. Přítok kapaliny do komory měla umístěný ve spodní části těla komory a odtok měla umístěný na horní části těla. Od tohoto designu jsem si sliboval, že se při zaplavování všechen vzduch odplaví, ale opak byl pravdou a v komoře se držela velká vzduchová kapsa. Avšak to odvzdušnění se komora dala na základní test LAL metody vyzkoušet. Během testu se ale ukázalo, že gumové těsnění není pro tištěnou komoru vhodné z důvodu pórovitosti povrchu, a proto bylo v dalších testech nahrazeno tmelem. Zároveň se ukázalo, že produkce nanočástic není velká, protože dochází k velkému pohlcení energie laseru sklem a vodou. Z těchto důvodů vznikla otevřená verze V3, u které bylo vynecháno skleněné okénko. Jenže se ukázalo, že v této verzi je náročné udržet přesnou výšku hladiny, a proto je tato verze slepou uličkou.

Pozorováním verze V2 bylo zjištěno, že v komoře se nachází turbulentní proudění, a to udržuje vzduchovou kapsu uvnitř komory. Proto vznikla další verze V4 (Obrázek

2.11), která byla na rozdíl od předešlých prodloužena o 16 mm, což umožnilo udělat v komoře větší náběh u přítoku a odtoku, a to mělo za následek snížení turbulencí kapaliny uvnitř komory. Komora byla dále snížena na 11 mm. Velká inovace u této verze bylo také zmenšení odtoku z komory, to mělo za následek nepatrné zvýšení tlaku uvnitř komory. Výška těla komory byla i přes snížení moc velká, a proto přišla verze V5 snižená na 6 mm. U této verze také přibyly šrouby k sestavení komory. Návrh sešroubování komory je takový, že 4 šrouby složí k přichycení horního dílu se sklem, aby se při výměně ablavovaného materiálu nemusela rozdělovat celá komora a zbylých 6 šroubů slouží pro sešroubování celé komory. U této verze se ale ukázalo, že laminární proudění není cesta, protože povrchové napětí vody bylo silnější než proud vody a drželo bublinky jak u skla, tak i u zlatého plíšku.



Obrázek 2.11: Průřezy vývoje ablačních komor

U verze V6 (Obrázek 2.11) přišlo několik zásadních změn. První zásadní změna byla ve změně koncepce uložení skleněné destičky a ablavovaného materiálu přímo do těla komory, což vedlo ke snížení jejich vzdálenosti na 4,25 mm. Tato změna vedla ke snížení pohlcení laserového paprsku vodou a zároveň umožnila lépe nasměrovat proud vody na okénko a ablavovací materiál. Další zásadní změnou bylo rozdělení přítoku uvnitř komory na čtyři proudy.

Úpravou přítoku vody z verze V6 vznikla verze V7. Tato úprava měla za následek změnu proudění způsobující drobné turbulence odplavující lépe bubliny. Dále byla potřeba u ablační komory zmenšit objem. Testy se ukázalo, že snížení výšky komory

pod 4,25 mm není cesta, tak proto byl objem komory snížen přidáním materiálu do odtokové části. Finální verze komory V7 se nachází na obrázku 2.12 .

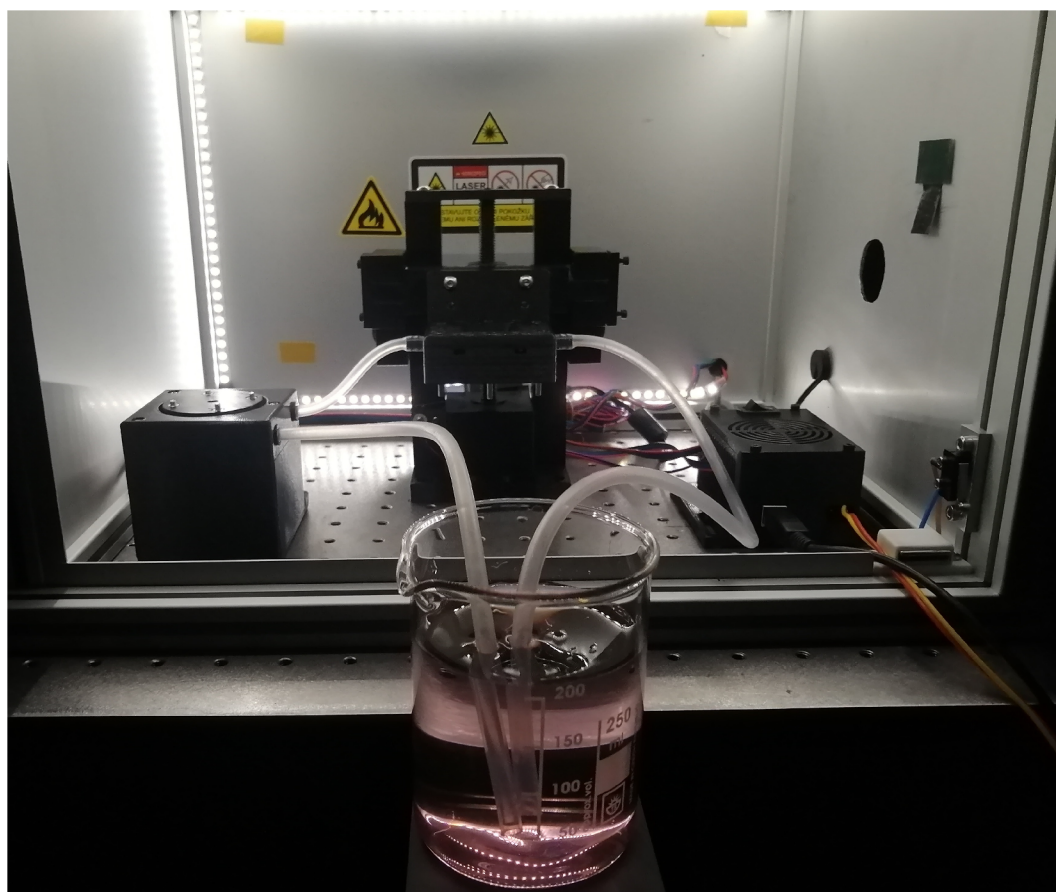


Obrázek 2.12: Finální ablační komora

2.2 Laserově ablační syntéza nanočástic

Nově navržený systém automatizace laserové ablační syntézy nanočástic bylo potřeba otestovat a porovnat se standartní laserovou ablační syntézou. Z tohoto důvodu byly navrženy dva experimenty měření. První experiment se zabýval nalezením vhodného ohniska nejprve u standartní metody a následně u nové ablační komory. Toto měření sloužilo jako příprava pro následující experiment, který probíhal v nejlepším ohnisku obou metod. Druhý experiment sloužil ke zjištění produkce obou metod. Díky tomuto experimentu jsem mohl porovnat obě metody a vyhodnotit, která má lepší produkci nanočástic. Dále jsem mohl vyhodnotit která z obou metod je stabilnější a případně zjistit, za jakých podmínek se vyplatí využít ablační komoru. V průběhu experimentů jsem pro měření produkce nanočástic využíval měření UV-Vis spektroskopem (Hach DR3900 VIS Spectral Photometer), díky kterému jsem měl výsledky téměř okamžitě. Měření koloidního zlata probíhalo při vlnové délce 400 nm [58]. Po finálním experimentu byly ještě všechny koncentrace vzorků přeměřeny metodou optické emisní spektroskopie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES).

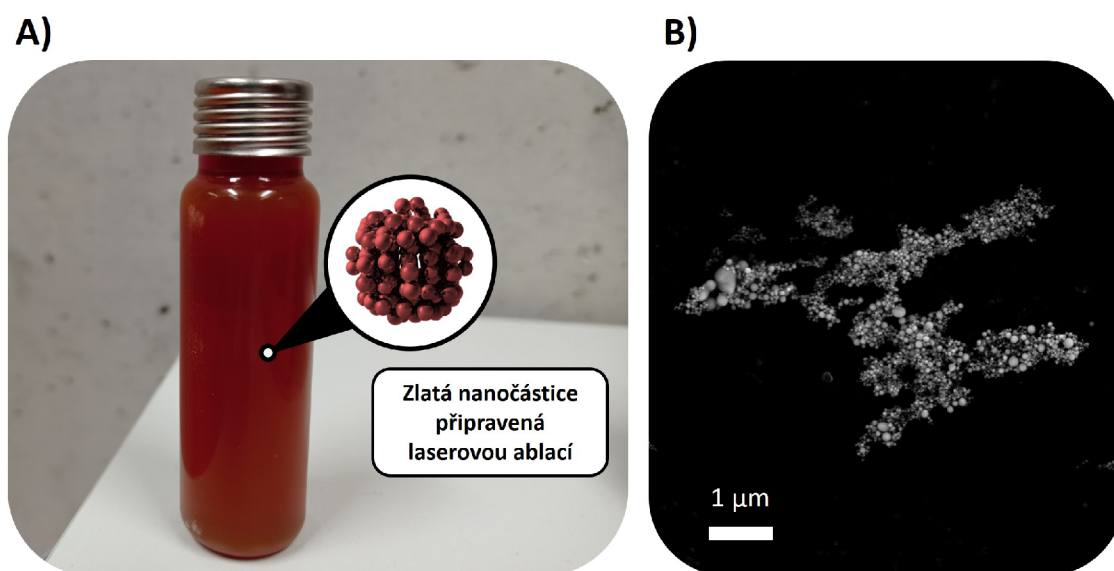
Všimněte si, že původní myšlenka diplomové práce uvažovala o začlenění kamery pro sledování in situ, což byla optimální ohnisková poloha v závislosti na intenzitě plazmy. Rozdíly v intenzitě však byly minimální při posunutí polohy komory o několik milimetrů vzhledem k poloze ohniska laserového paprsku. Bylo tedy jasné, že levná kamera nám neumožní získat přesné měření vedoucí k nejlepší poloze prohnutí směrem k maximální produktivitě nanočástic. Vzhledem k tomu, že smyslem celé práce bylo zkonstruovat cenově dostupný systém umožňující zapojení více lidí do laserem zprostředkované syntézy nanomateriálů, rozhodli jsme se odstranit nutnost kamery a pouze nastavit komoru do ohniskové polohy ručně. Konečná sestava je vidět na obrázku 2.13.



Obrázek 2.13: Finální podoba celého zařízení

U obou experimentů jsem pro generování koloidního zlata použil průmyslový femtosekundový pulzní laser Onefive Origami XP-S (maximální průměrný výstupní

výkon 5,1 W, doba trvání pulzu < 400 fs, centrální vlnová délka 1030 nm, maximální opakovací frekvence 1 MHz, spektrální šířka pásma < 5 nm a výstupní svazek 5 mm při šířce $1/e^2$). Svazek fotonů z laseru procházel přes skenovací hlavu (intelliSCAN 14, SCANLAB), kde se směr paprsku rychle měnil pomocí dvou galvanometrických zrcadel, která vedla paprsek k zaostření F-Theta čočkou $f=160$ mm na povrch Au fólie. Aby se zabránilo stínění kavitační bubliny, byla rychlost snímání laseru na fólii zajištěnou galvanometrickými zrcadly nastavena na maximální možnou úroveň rychlosti 2 m/s. Laserový paprsek sloužil k ozařování zlaté fólie ($> 99,99\%$ Au, tloušťka 0,5 mm, Sigma-Aldrich, USA) ponořené do demineralizované vody (demiH₂O, 18,2 M $\Omega \cdot$ cm). Vytvořené plazma laserové ablace na zlaté fólii vedlo k tvorbě zlatých nanočástic (Obrázek 2.14).



Obrázek 2.14: Koloid nanočástic zlata připravený pomocí laserové ablace při pozorování A) v reálném měřítku, B) ve skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM) při 10 000 násobném zvětšení.

2.2.1 Použité metody měření produkce LAL

UV-Vis spektroskopie

Jedná se o metodu pro analýzu tekutiny založenou na elektromagnetickém záření. UV-Vis spektrografie využívá pro měření konkrétně vlnovou délku od ultrafialové oblasti do oblasti blízké infračervené oblasti. Vzhledem k rozdílnému chování vzorku za různých vlnových délek, je potřeba tuto vlnovou délku přizpůsobit pozorovanému vzorku. Například u koloidní zlata je koncentrace lineárně závislá při vlnové délce 400 nm. [58] Jak již bylo nepřímo řečeno, v laboratořích se tato metoda používá ke zjištění základních informací o testovaném vzorku, například koncentrace vytvořených nanočástic. Ačkoliv má tato metoda výhodu v rychlosti měření, musí se jednotlivé parametry částic později stejně analyzovat přesnější metodou, třeba pomocí mnohem přesnější metody ICP-OES. [40, 48]

ICP-OES

Jde o metodu měření stopových i větších koncentrací jednotlivých prvků nacházejících se v periodické tabulce prvků v měřeném vzorku. Jedná se o emisní spektrografii využívající indukčně vázanou plazma k podpoře excitace elektronů přítomných atomů do vyšších energetických hladin. Po excitaci se elektrony vrátí do bazálního stavu a při tom vyzařují fotony o charakteristické vlnové délce daného chemického prvku. Intenzita vyzařované vlnové délky je přímo úměrná počtu atomů chemického prvku obsaženém v měřeném vzorku. [48]

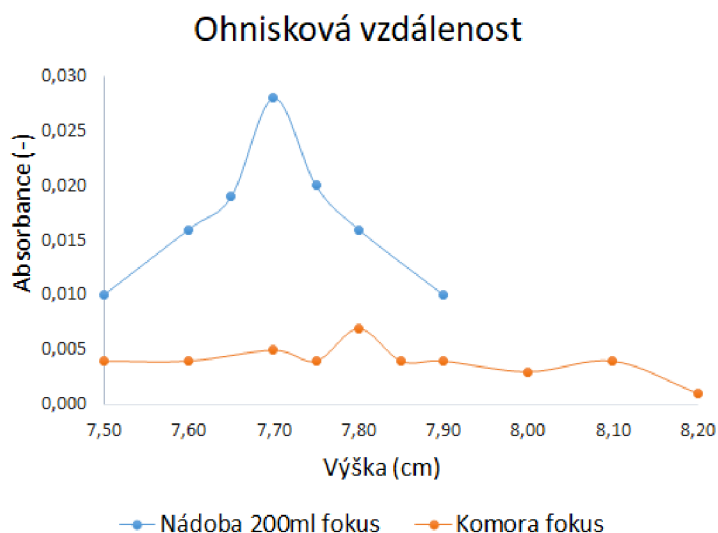
2.2.2 Experiment 1 - Hledání ohniskové vzdálenosti

První experiment byl potřebný k zaměření správného ohniska laseru jak u nové ablační komory, tak i u standardní metody výroby nanočástic pomocí LAL. Pro experiment byla stanovena metoda ozařování zlaté fólie ponořené do objemu 200 ml vody, v případě ablační komory toto množství proudilo v uzavřeném okruhu. Doba ozařování zlatého plíšku byla stanovena na 5 cyklů laseru. Krok posuvu byl stanoven pro tento experiment na 1 mm a v případě bodu blízkého ohnisku 0,5 mm, tím se zvýší přesnost zaměření ohniska. Tento experiment se skládal celkem ze dvou částí. V první části proběhlo zaměřování ohniskové vzdálenosti u standardní metody, pro kterou byla speciálně vyrobená nádoba pomocí 3D tisku dimenzovaná na objem zmíněný kapaliny 200 ml.

První část experimentu probíhala následovně: Nádobka se umístila nad místo odhadovaného ohniska, naplnila 200 ml vody a spustilo se ozařování zlatého plíšku 5 cykly laseru. Po dokončení cyklu se koloidní roztok v nádobce pečlivě promísil a odebral se vzorek 2 ml pro UV-Vis měření, kterým byl vyhodnocen. Hodnoty se poznamenaly, koloidní roztok byl z nádoby odčerpán, nádoba se vyčistila od kontaminace nanočásticemi a zlatý plíšek se také očistil. Následně proběhl posuv o 1 mm dolů a celý postup se opakoval do doby, než došlo k významnému poklesu koncentrace nanočástic. V tomto případě bylo potřeba ještě provést měření ve vzdálenosti 0,5 mm oběma směry od nejvyšší naměřené hodnoty.

Druhá část experimentu probíhala podobně s jedinou změnou, že byla nádoba nahrazena ablační komorou s peristaltickým čerpadlem a skleněnou vyrovnávací nádobou. Čistění ablační komory probíhalo proplachem čistou vodou.

Výsledky tohoto experimentu jsou zobrazeny na obrázku 2.15 a ukázaly, že ohnisko laseru leží v případě nádoby pro stávající metodu v úrovni 77 mm od desky stolu a u ablační komory leží ve vzdálenosti 78 mm od desky stolu. Tato drobná změna ohniska je způsobená průchodem laserového paprsku skleněnou destičkou umístěnou na ablační komoře.



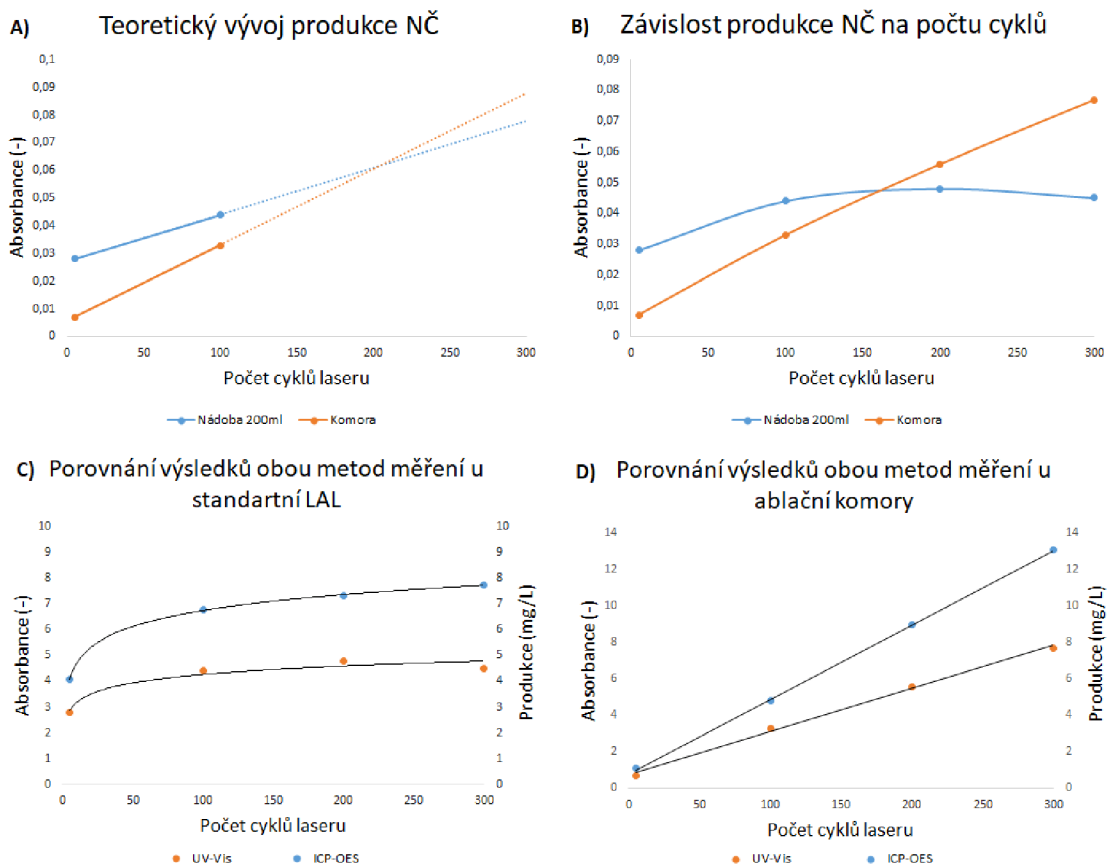
Obrázek 2.15: Graf naměřených hodnot ohniskové vzdálenosti

2.2.3 Experiment 2 - Měření produkce výroby nanočástic

Cílem tohoto experimentu bylo naměřit a porovnat standardní využití metody LAL s nově navrženou ablační komorou. Tento experiment probíhal v ohniskových vzdálenostech naměřených v prvním experimentu. Tedy při použití standardní metody byla ohnisková vzdálenost 77 mm a u ablační komory byla nastavená na 78 mm. Opět byl experiment rozdělen na dvě části, kde v první části se testovala standardní metoda LAL, tedy zlatý plíšek byl ponořený ve speciální nádobě do 200 ml demiH₂O. V druhé části se testovala ablační komora s peristaltickou pumpou a vyrovnávací nádobou. V tomto uzavřeném okruhu proudilo 200 ml demiH₂O. Rychlost proudění byla provedena testem přečerpání 200 ml vody na čas. Tento objem zvládla peristaltická pumpa přečerpat za 22 vteřin. Triviálním výpočtem jsem tedy přišel na průtok demiH₂O, který byl 545 ml/min. Počet cyklů laseru u tohoto experimentu bylo stanoveno na 100. Měření koncentrace nanočástic nejprve probíhalo metodou UV-Vis a následně byly všechny vzorky tohoto experimentu přeměřeny přesnější metodou ICP-OES.

Bohužel se po 100 cyklech ukázalo, že stávající technologie dosahuje větší produkce zlatých nanočástic v porovnání s ablační komorou. Avšak při zpracování namě-

řených hodnot se ukázalo, že zatímco koncentrace obou technologií po 5 laserových cyklech je diametrálně odlišná, tak při použití 100 cyklů laseru už byla koncentrace podobná. Proto jsem tyto data vložil do grafu a proložil je lineární spojnici trendu (obrázek 2.16). Z grafu bylo patrné, že se při hodnotě kolem 200 cyklů laseru produkce vyrovnají a se stoupajícím počtem cyklů bude produkce ablační komory vyšší. Proto jsem se rozhodl provést další měření obou metod za použití 200 cyklů laseru a 300 cyklů laseru.



Obrázek 2.16: Grafy naměřených hodnot z druhého experimentu A) Odhadovaný růst produkce obou metod LAL B) Naměřený růst produkce obou metod LAL měřený metodou UV-Vis C) Srovnání měření metody UV-Vis s metodou ICP-OES u použití standartní LAL D) Srovnání měření metody UV-Vis s metodou ICP-OES u použití ablační komory pro výrobu měřených nanočástic

Tímto měřením se moje hypotéza potvrdila a ukázalo se, že se produkce obou metod vyrovná ještě dříve, než bylo očekáváno, a to konkrétně někdy kolem 160 cyklu. Po zpracování dat do grafů se ukázalo, že produkce nanočástic ablační komory je lineární, zatímco u stávající metody produkce stoupá logaritmicky (obrázek 2.16). Toto snížení produkce nanočástic u stávající metody bude způsobeno shlukováním nanočástic nad zlatým plíškem a zároveň vznikem kavitačních bublin na zlatém plíšku, to zapříčiní stínění laseru. Zatímco u použití ablační komory jsou zlaté nanočástice a kavitační bubliny pravidelně odplavovány a rovnoměrně rozmíchány v celém množství koloidního roztoku, takže k stínění dochází minimálně. Nízká produkce u ablační komory ze začátku výroby nanočástic lze vysvětlit úbytkem energie laseru při průchodu skleněnou destičkou, která je součástí ablační komory.

Během tohoto experimentu jsem dále testoval vliv produkce nanočástic na základě čistoty povrchu zlatého plíšku. Při experimentu se ukázalo, že zlato znečištěné působením laseru má nižší produkci výroby nanočástic, tudíž s narůstajícími cykly působení laseru u všech metod produkce nepatrně klesá, avšak při porovnání se stíněním nanočástic lze tento efekt téměř zanedbat.

Závěr

Hlavním cílem této práce bylo realizovat snadno cenově dostupné a konkurenceschopné zařízení pro automatizaci laserové ablace v kapalinách. Těchto požadavků bylo dosaženo vhodným výběrem komponentů, které umožňují využití open-source softwaru. Návrh všech potřebných komponent pro automatizaci laserové ablace proto proběhl v CAD programu Fusion 360, který je pro osobní použití a pro studenty poskytován zdarma. Jednotlivé díly potřebné pro automatizaci byly vytištěny 3D tiskárnou Prusa i3 MK3S+, která byla zároveň v rámci této práce sestavena a připravena na tisk. Materiály umožňující tisknout tato tiskárna byly podrobeny testům na odolnost vůči kapalinám využívajících se při generování nanočástic pomocí laserové syntézy. V testech nejlépe dopadl materiál PETG, a proto byl zvolen jako nejlepší možnost pro finální tisk komponentů navržených v této práci. Z důvodu snadného tisku a rozložitelnosti se všechny prototypové díly tiskly materiálem PLA. Tento materiál odolává demiH_2O , a proto nebylo potřeba pro finální test navržené ablační komory volit již zmíněný PETG materiál. Pro finální test se ukázalo použití jedné peristaltické pumpy jako dostatečné. Průtok peristaltické pumpy při jejím testu dosahoval hodnot 590 ml/min, což je více než dvojnásobek původních požadavků. Pro ovládání celého zařízení vznikla aplikace LASER-NANO, která s řídicí jednotkou na bázi Arduino Uno a CNC rozšíření komunikuje po sériovém portu. Tato aplikace umožňuje ovládání lineárního posuvu pro zaměření ohniska laseru a zároveň ovládání rychlosti průtoku dvou peristaltických pump.

Celá nově navržená sestava systému pro automatizaci laserové ablační syntézy nanočástic byla otestována pomocí dvou experimentů. První experiment sloužil ke

zjištění ohniskové vzdálenosti laseru. Z tohoto experimentu vyplynulo, že při použití ablační komory se ohnisková vzdálenost posune o 1 mm blíže k optice laseru oproti standartní metodě, to je způsobené průchodem paprsků laseru skleněným okénkem na komoře. Druhý experiment cílil na zjištění produkce výroby nanočástic s porovnáním se stávající metodou. Výsledky tohoto experimentu ukázaly, že nárůst produkce nanočástic probíhá lineárně, zatímco u stávající metody laserové ablace stoupá logaritmicky. Dále z experimentu vyplývá, že ablační komora má při krátkých dobách osvitů ablovaného materiálu laserem nižší produkci než stávající metoda, to je způsobeno úbytkem výkonu laseru ve skleněném okénku. Avšak díky stabilní produkci ablační komory se produkce obou komor po 160 cyklech laseru vyrovnaly a dále dosahovala ablační komora několikanásobně lepší produkce nanočástic. Ablací komora tak dosahuje stabilního přírůstku produkce nanočástic a podobně jako u dražších alternativ řeší největší problém současné metody, a to sníženou reprodukovatelnost způsobenou aglomerací nanočástic a kavitačními bublinami nad ablovaným materiálem stínící laserové paprsky. Na rozdíl od alternativních možností však cenově dostupným způsobem.

Z výsledků je tedy patrné, že tato automatizace výroby nanočástic je krok správným směrem a v budoucnu si určitě najde využití u mnoha vědeckých týmů. Celkově tato práce může znamenat velký průlom v dostupnosti automatizace výroby nanočástic.

Použitá literatura

- [1] CRIVELLARO, Simone et al. A system for the synthesis of nanoparticles by laser ablation in liquid that is remotely controlled with PC or smartphone. *Review of Scientific Instruments* [online]. 2019, roč. 90, č. 3, s. 033902 [cit. 2022-02-02]. ISSN 0034-6748, ISSN 1089-7623. Dostupné z DOI: [10.1063/1.5083811](https://doi.org/10.1063/1.5083811).
- [2] BARCIKOWSKI, S et al. *Handbook of laser synthesis and processing of colloids*. DuePublico, 2019.
- [3] GROOVER, Mikell P. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. John Wiley & Sons, 2020.
- [4] LYSHEVSKI, Sergey Edward. *Electromechanical systems and devices*. CRC Press, 2008.
- [5] LAMB, Frank. *Industrial automation: hands-on*. McGraw-Hill Education, 2013.
- [6] BANK, World. *World development report 2019: The changing nature of work*. The World Bank, 2018.
- [7] BENNETT, S. A history of control engineering 1800-1930, Ch 3. *Peter Peregrinus, Stevenage*. 1979.
- [8] *Wattův odstředivý regulátor*. [B.r.]. Dostupné také z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Watt%C5%AFv_odst%C5%99ediv%C3%BD_regul%C3%A1tor.
- [9] LUCAS, Robert E et al. The industrial revolution: Past and future. *Lectures on economic growth*. 2002, s. 109–188.

- [10] JEVONS, H Stanley. The second industrial revolution. *The Economic Journal*. 1931, roč. 41, č. 161, s. 1–18.
- [11] BRABEC, Adam et al. Ekonomické a sociální dopady čtvrté průmyslové revoluce. 2020.
- [12] *Průmysl 4.0.* [B.r.]. Dostupné také z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Pr%C5%AFmysl_4.0.
- [13] HOLANOVÁ, Tereza. Nová průmyslová revoluce. Nezaspěte nástup Práce 4.0. *Aktuálně. cz*. 2015.
- [14] KORBEL, Petr. Průmyslová revoluce 4.0: Za 10 let se továrny budou řídit samy a produktivita vzroste o třetinu. *Hospodářské noviny*. 2015, s. 05–17.
- [15] LASI, Heiner et al. Industry 4.0. *Business & information systems engineering*. 2014, roč. 6, č. 4, s. 239–242.
- [16] Iniciativa Průmysl 4.0. [B.r.], s. 233. Dostupné také z: <https://www.mpo.cz/cz/rozcestnik/ministerstvo/aplikace-zakona-c-106-1999-sb/informace-zverejnovane-podle-paragrafu-5-odstavec-3-zakona/-iniciativa-prumysl-4-0--230485/>.
- [17] KRAUSOVÁ, Veronika. *Internet věcí (Internet of Things) a jeho bezpečnost*. 2014. Dis. pr. Masarykova univerzita, Filozofická fakulta.
- [18] RAD, Ciprian-Radu et al. Smart monitoring of potato crop: a cyber-physical system architecture model in the field of precision agriculture. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2015, roč. 6, s. 73–79.
- [19] BAHETI, Radhakisan a Helen GILL. Cyber-physical systems. *The impact of control technology*. 2011, roč. 12, č. 1, s. 161–166.
- [20] MESENBOURG, Thomas L. Measuring the digital economy. *US Bureau of the Census*. 2001, roč. 1, s. 1–19.
- [21] WONG, Kaufui V a Aldo HERNANDEZ. A review of additive manufacturing. *International scholarly research notices*. 2012, roč. 2012.

- [22] *Rub i lic 3D tisku*. [B.r.]. Dostupné také z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/blog/rub-i-lic-3d-tisku_55793.html.
- [23] *3D tisk kovů od Desktop Metal zaujal stovky posluchačů Fóra aditivní výroby*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.konstrukter.cz/3d-tisk-kovu-od-desktop-metal-zaujal-stovky-posluchacu-fora-aditivni-vyroby/>.
- [24] *Www.yhbm.com*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://web.archive.org/web/20160526171939/http://www.yhbm.com/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=67>.
- [25] *VZP*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.vzp.cz/o-nas/tiskove-centrum/otazky-tydne/vyuziti-3d-tisku-ve-zdravotnictvi>.
- [26] HRDLIČKA, Vojtěch. *Možnosti využití 3D tisku a nových technologií ve zdravotnictví*. 2018. Dipl. pr. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.
- [27] *The Liberator – the world’s first 3D printed handgun*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.vam.ac.uk/articles/the-liberator-the-worlds-first-3d-printed-handgun>.
- [28] NOORANI, Rafiq. *3D printing: technology, applications, and selection*. CRC Press, 2017.
- [29] JONES, Rhys et al. RepRap--the replicating rapid prototyper. *Robotica*. 2011, roč. 29, č. 1, s. 177–191.
- [30] MEJTIL, Lukáš. *Využití technologie aditivní výroby v průmyslové praxi*. 2018.
- [31] HAVLAN, Tomáš. *3D prototyping mechanism*. 2016. B.S. thesis. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.
- [32] *DK metal*. 2018. Dostupné také z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>.
- [33] KNOTEK, Václav. *Technologické možnosti aditivní výroby*. 2018. B.S. thesis. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.

- [34] ŽMOLÍK, PRÁCE ONDŘEJ. *Recyklace termoplast pro potřeby FDM 3D tisku*. Brno, 2015.
- [35] *PET-G Material*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://tractus3d.com/materials/petg/>.
- [36] *TPU Material*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://tractus3d.com/materials/tpu/>.
- [37] HAVRDA, Marcel et al. Příprava nanočástic zlata laserovými technikami a jejich in situ funkcionalizace. 2018.
- [38] HAVELKA, Ondřej et al. Laser-mediated Synthesis of Iron Nanoclusters. 2018.
- [39] GROF, Jaroslav et al. Příprava cyklodextriny modifikovaných zlatých nanočástic pro senzorové aplikace. 2017.
- [40] HAVELKA, Ondřej. Laser-generated synthesis of Pd-Ni nanoalloys usable as catalysts [online]. 2021 [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/160485>.
- [41] *ATOMOS=NEDEĚLITELNÝ*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k11.htm>.
- [42] PRDEK, Dominik. *Nanočástice ve výuce chemie*. 2016. Dis. pr. Masarykova univerzita, Pedagogická fakulta.
- [43] *From Nanotech to Nanoscience*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.sciencehistory.org/distillations/from-nanotech-to-nanoscience>.
- [44] SMOLA, Bohumil. Nobelova cena za fyziku 1986: Ernest Ruska. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*. 1987, roč. 32, č. 6, s. 315–316.
- [45] ZHANG, Dongshi, Bilal GÖKCE a Stephan BARCIKOWSKI. Laser Synthesis and Processing of Colloids: Fundamentals and Applications. *Chemical Reviews* [online]. 2017, roč. 117, č. 5, s. 3990–4103 [cit. 2021-11-02]. ISSN 0009-2665, ISSN 1520-6890. Dostupné z DOI: [10.1021/acs.chemrev.6b00468](https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00468).
- [46] CVEK, Martin et al. Laser-induced fragmentation of carbonyl iron as a clean method to enhance magnetorheological effect. *Journal of Cleaner Production*. 2020, roč. 254, s. 120182. Dostupné z DOI: [10.1016/j.jclepro.2020.120182](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120182).

- [47] FOJTÍK, A. a A. HENGLEIN. Laser ablation of films and suspended particles in a solvent : formation of cluster and colloid solutions. *undefined* [online]. 1993 [cit. 2021-11-04]. Dostupné z: [https://www.semanticscholar.org/paper/Laser-ablation-of-films-and-suspended-particles-in-Fojt % C3 % ADk - Henglein / e8b0a210c80cdd87a0262671ed281d92bf73300a](https://www.semanticscholar.org/paper/Laser-ablation-of-films-and-suspended-particles-in-Fojt%20%20ADk-Henglein/e8b0a210c80cdd87a0262671ed281d92bf73300a).
- [48] HAVELKA, Ondřej et al. On the Use of Laser Fragmentation for the Synthesis of Ligand-Free Ultra-Small Iron Nanoparticles in Various Liquid Environments. *Nanomaterials*. 2021, roč. 11, č. 6, s. 1538.
- [49] AMENDOLA, Vincenzo et al. Room-Temperature Laser Synthesis in Liquid of Oxide, Metal-Oxide Core-Shells, and Doped Oxide Nanoparticles. *Chemistry – A European Journal* [online]. 2020, roč. 26, č. 42, s. 9206–9242 [cit. 2022-01-31]. ISSN 0947-6539, ISSN 1521-3765. Dostupné z DOI: [10.1002/chem.202000686](https://doi.org/10.1002/chem.202000686).
- [50] TORRES-MENDIETA, Rafael et al. Laser-assisted synthesis of Fe-Cu oxide nanocrystals. *Applied Surface Science* [online]. 2019, roč. 469, s. 1007–1015 [cit. 2021-11-04]. ISSN 0169-4332. Dostupné z DOI: [10.1016/j.apsusc.2018.11.058](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.058).
- [51] TORRES-MENDIETA, R et al. PVDF nanofibrous membranes modified via laser-synthesized Ag nanoparticles for a cleaner oily water separation. *Applied Surface Science*. 2020, roč. 526, s. 146575. Dostupné z DOI: [10.1016/j.apsusc.2020.146575](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146575).
- [52] ETTEL, David et al. Laser-synthesized Ag/TiO nanoparticles to integrate catalytic pollutant degradation and antifouling enhancement in nanofibrous membranes for oil–water separation. *Applied Surface Science* [online]. 2021, roč. 564, s. 150471 [cit. 2021-11-04]. ISSN 0169-4332. Dostupné z DOI: [10.1016/j.apsusc.2021.150471](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150471).
- [53] *17HS4401 Datasheet: 2 Phase Hybrid Stepper Motor*. MotionKing, [b.r.]. Dostupné také z: <https://www.datasheet4u.com/datasheet-pdf/MotionKing/17HS4401/pdf.php?id=928661>.
- [54] *A3967: Microstepping Driver with Translator*. Allegro, [b.r.]. Dostupné také z: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Robotics/A3967-Datasheet.pdf>.

- [55] *L298: DUAL FULL-BRIDGE DRIVER*. ST, [b.r.]. Dostupné také z: https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298_H_Bridge.pdf.
- [56] *A4988: DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection*. Allegro, [b.r.]. Dostupné také z: https://www.pololu.com/file/0J450/a4988_DMOS_microstepping_driver_with_translator.pdf.
- [57] *DRV8825 Stepper Motor Controller IC*. Texas Instrument, [b.r.]. Dostupné také z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf?ts=1652608491595&ref_url=https%20A%20F%20Fwww.ti.com%20Fproduct%20FDRV8825%20Futm_source%20Dgoogle%20utm_medium%20Dcpc%20utm_campaign%20Dasc-mdbu-null-prodfolderdynamic-cpc-pf-google-de%20utm_content%20Dprodfolddynamic%20ds_k%20DDYNAMIC%20BSEARCH%20BADS%20DCM%20Dyes%20gclid%20DCj0KCQjwyYKUBhDJARIsAMj9lkH6pLRXn9ITeP__UuULFAqVicNxBIUjWD9hug3Qi3AXz0BPy6IN__kd4aAktZEALw__wcB%20gclsrc%20Daw.ds.
- [58] HENDEL, Thomas et al. In situ determination of colloidal gold concentrations with UV–Vis spectroscopy: limitations and perspectives. *Analytical chemistry*. 2014, roč. 86, č. 22, s. 11115–11124.

Obsah přiloženého CD

Text diplomové práce:

Diplomka_Zima.pdf

Návrhy ve formátu STL:

Diplomka_STL

Ovládací program LASER-NANO:

LASER-NANO

Firmware řídicí jednotky:

Firmware