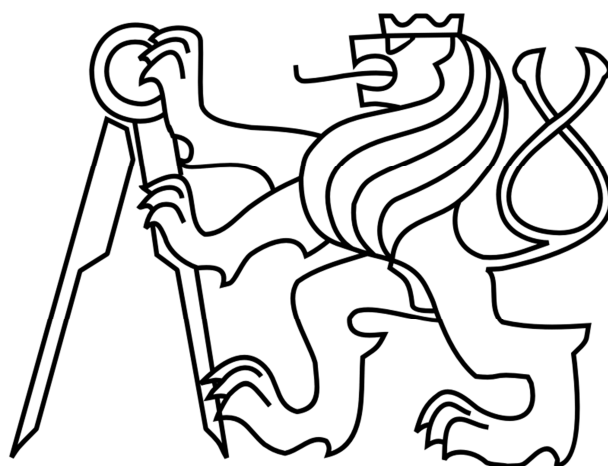


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MECHANIKY, BIOMECHANIKY A MECHATRONIKY



BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ PRŮHYBU NOSNÍKU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní, Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

Technická 4, 166 07 Praha 6

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro: Tomáše Petříka

program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

obor: bez oboru

Název tématu: **Bezkontaktní měření průhybu nosníku**

Title: **Contactless Measuring Deflection of the Beam**

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor průhybu nosníku
2. Rešerše dostupných řešení bezkontaktního měření průhybu nosníků
3. Výběr optimální varianty spolu s ekonomickou rozvahou

Anotační list

Jméno autora:	Tomáš PETRÍK
Název BP:	Bezkontaktní měření průhybu nosníku
Anglický název:	Contactless Measuring Deflection of the Beam
Rok:	2015
Odbor studia:	Teoretický základ strojního inženýrství
Ústav/odbor:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky / Odbor pružnosti a pevnosti
Vedoucí:	Ing. Karel Doubrava, Ph.D.
Konzultant:	
Bibliografické údaje:	počet stran: 42 počet obrázků: 19 počet tabulek: 6 počet příloh: 6
Klíčová slova:	průhyb, bezkontaktní měření, nosník, laser
Keywords:	deflection, contactless measuring, beam, laser

Anotace:

Tato bakalářská práce se zaměřuje na problematiku bezkontaktního měření průhybu nosníku. Největší důraz je kladen na laserové snímače, zabývá se však také kapacitními snímači, vyhodnocováním obrazu a magneticko-indukčními snímači. Celá práce je ovlivněna záměrem v budoucnosti provést realizaci a proto popisuje i možná uspořádání měření.

Abstract:

This bachelor thesis is focused on issue contactless measuring deflection of the beam. The greatest emphasis is on the laser sensors, but it also deal with the capacitive sensors, machine vision and the magnetic-induction sensors. Whole thesis has influenced by the future intent hence it describes the possible arrangement of measuring.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem

„Bezkontaktní měření průhybu nosníku“

vypracoval samostatně a veškerou použitou literaturu a podkladové materiály, uvádím v přiloženém seznamu literatury.

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

V Praze 17. 6. 2015

.....

Tomáš Petřík

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji, především svému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Karlu Doubravovi, za cenné rady, připomínky a hlavně metodické vedení práce. Můj velký dík patří také mým rodičům, kteří mě podporovali po celou dobu mého studia.

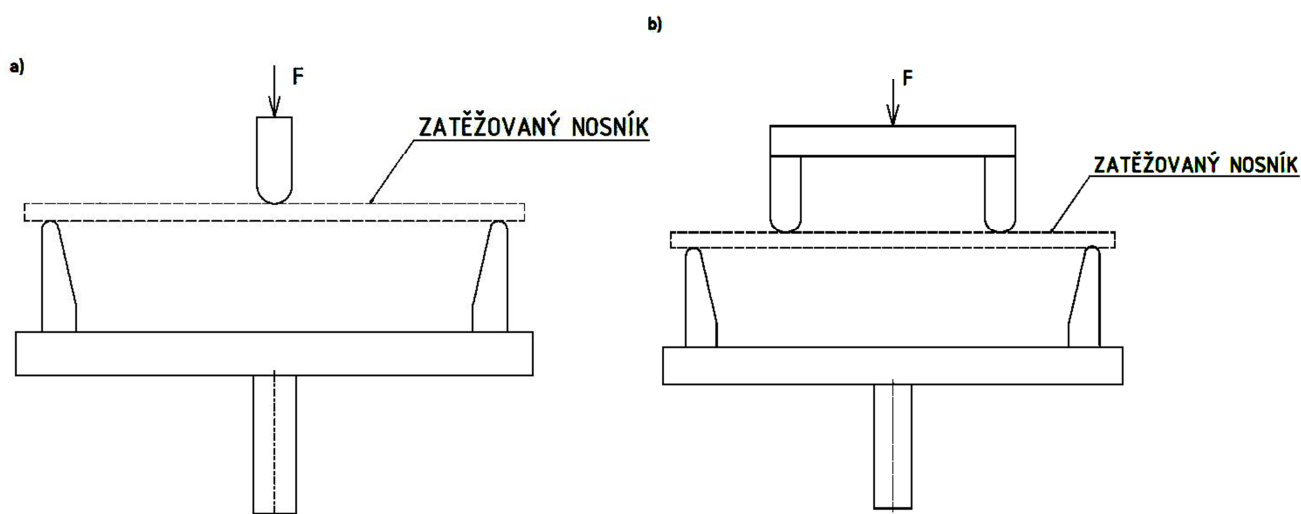
Obsah

1. Úvod.....	7
1.1. Motivace práce.....	7
2. Teoretická část	8
2.1. Deformace.....	8
2.1.1 Deformace přímého nosníku zatíženého příčnou silou.....	8
2.2. Úplná diferenciální rovnice průhybové čáry	9
2.2.1. Vztah mezi ohybovým momentem a posouvající silou (Schwedlerova věta).....	9
2.2.2. Bernouliho teorém	11
2.2.3. Bernouliho rovnice	11
2.2.4. Úplná diferenciální rovnice	13
3. Měření průhybu.....	14
3.1. Systém měření.....	14
3.2. Principiální metody měření průhybu (polohy).....	14
3.2.1. Stručný přehled popisovaných metod a snímačů.....	14
3.2.2 Laserové snímače.....	16
3.2.3 Kapacitní snímače.....	24
3.2.4. Vyhodnocování obrazu	27
3.2.5. Indukční – magnetické snímače.....	30
3.2.6. Konfokální sondy.....	30
4. Výběr vhodné alternativy.....	31
4.1. Porovnání	31
4.2. Zhodnocení	33
5. Experimentální část.....	34
5.1. Popis.....	34
5.1.1. Hlavní použité zařízení	34
5.1.2. Uspořádání měření	35
5.2. Výsledky měření	36
5.2.1. Měření 1	36
5.2.2. Měření 2	38
5.2.3. Měření 3	40
5.3. Zhodnocení	41
6. Závěr	42
7. Použitá literatura:	43

1. Úvod

U mnoha konstrukcí (kompozity, sendviče, ...) je nutné identifikovat jejich ohybovou tuhost. Jedním ze sledovaných parametrů je průhyb v závislosti na zatížení a to v jednom, více bodech či v ideálním případě celou průhybovou čáru.

Vzhledem k tomu, že tato práce má sloužit jako podklad pro možnou následnou realizaci měřicího zařízení, bude uvažován jednoduchý nosník obdélníkového, případně čtvercového průřezu, zatěžovaného ve třech (*obr. 1a*) respektive čtyřech bodech (*obr. 1b*), v přípravku zobrazeném na *obr. 1* umístěném do trhacího (zatěžovacího) stroje.



Obrázek 1 Přípravek pro tří a čtyřbodový ohyb.

1.1. Motivace práce

V současné době je průhyb měřen kontaktní metodou, kdy senzor je založen na principu vetknutého nosníku. Nosník – planžeta, je osazena tenzometry v půlmostovém zapojení. Používaný snímač umožňuje měření až do okamžiku destrukce. Klasické indukční dotykové snímače by mohly být poškozeny případným rázem při prasknutí nosníku.

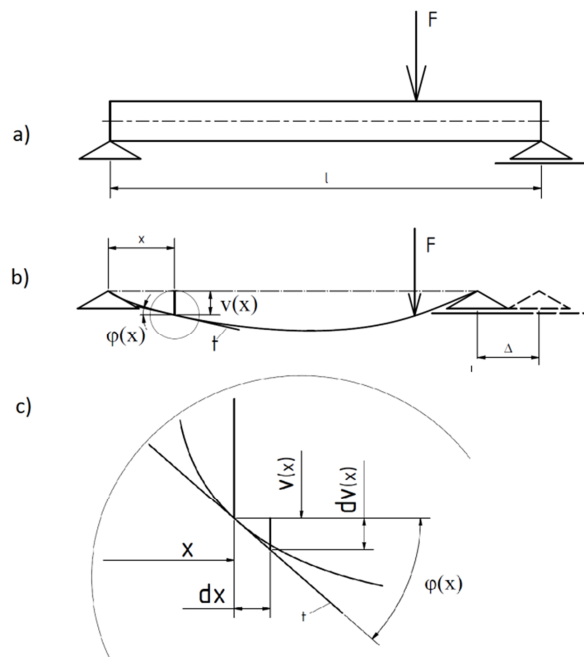
Planžetový snímač se však u malých průhybů nechová lineárně a je v plánu jej nahradit a to ideálně bezkontaktní metodou.

Výběr měřících metod a snímačů bude také přizpůsoben znalosti systému, velikosti aparátu měření a znalosti typu nejčastěji zkoumaných typů materiálu, v neposlední řadě pak také dostupné nabídce technologie.

2. Teoretická část

2.1. Deformace

Za deformaci nosníku označíme změnu tvaru jeho střednice (tj. spojnice těžišť příčných průřezů) coby důsledku působení vnějších silových účinků. Náznak deformace střednice nosníku z *obr. 2a* je zobrazen na *obr. 2b*. Deformace má v libovolném místě nosníku dvě složky a to průhyb $v(x)$ a úhel natočení $\varphi(x)$. Určení jejich velikosti je zobrazeno na detailu *2c*. Křivku vzniklou deformací střednice nazýváme průhybová čára [2].



Obrázek 2 Obecnou silou zatížený nosník.

2.1.1 Deformace přímého nosníku zatíženého příčnou silou

Působí-li síla kolmo k podélné ose prutu, v rovině s jednou z hlavních os průřezu a podélnou osou, střednice prutu leží v neutrální rovině a při prohnutí se její délka nezmění, pak pro směrnicí tečny t dle *obr. 2* platí [2]:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{dv(x)}{dx} = v'(x). \quad /1/$$

Deformace $v(x)$ a $\varphi(x)$, vůči rozměrům nosníku, uvažujeme velmi malé. Proto můžeme pro úhel natočení uvažovat:

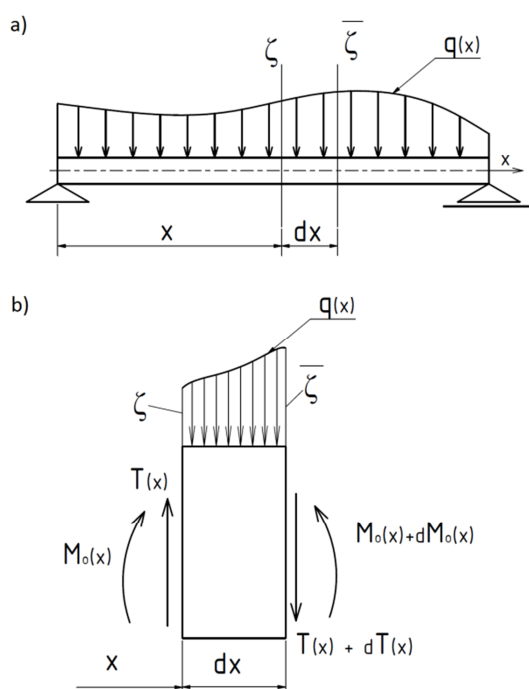
$$\operatorname{tg} \varphi \approx \varphi(x) = v'(x) \quad /2/$$

2.2. Úplná diferenciální rovnice průhybové čáry

2.2.1. Vztah mezi ohybovým momentem a posouvající silou (Schwedlerova věta)

Posouvající síly $T(x)$ a ohybové momenty $M_o(x)$ (vnitřní účinky) jsou vyvolány společnou příčinou, kterou je vnější zatížení $q(x)$ v příkladu na obr 3a. Je proto zjevné, že mezi nimi musí existovat nějaká závislost [1][1].

Dokázat ji lze pomocí diferenciální rovnice rovnováhy elementu z obr. 3b. Tento element vznikne vyjmutím libovolného elementu, vyjmutého v libovolném místě, řezy ζ a $\bar{\zeta}$ vzdálenými od sebe o vzdálenost dx [3].



Obrázek 3 Spojitě zatížený nosník.

V takto vyjmutém elementu, odříznuté části nosníku, nahradíme vnitřními silovými účinky, jejichž smysl volíme dle klasické konvence [3].

Zavádíme zde předpoklad, že funkce $q(x)$, $T(x)$ a $M_o(x)$ jsou spojité, a tedy zvedne-li se o diferenciál souřadnice x o diferenciál dx , měly by se analogicky změnit i tyto spojité funkce. Za těchto předpokladů lze psát silovou rovnováhu elementu [1][1] :

$$q(x) \cdot dx - T(x) + [T(x) + dT(x)] = 0. \quad /3/$$

Odkud po úpravách dostáváme vztah:

$$\frac{dT(x)}{dx} = -q(x). \quad /4/$$

Dále lze za těchto předpokladů psát momentovou rovnováhu elementu:

$$q(x) \cdot dx \cdot \frac{dx}{2} - T(x) \cdot dx - M_o(x) + [M_o(x) + dM_o(x)] = 0. \quad /5/$$

Odkud, po úpravách a zanedbání prvního členu, pro jeho (vzhledem k ostatním členům) de facto nulovou velikost, dostáváme vztah:

$$\frac{dM_o(x)}{dx} = T(x) \quad /6/$$

Vztahy /4/ a /6/ formulují Schwedlerovu větu (v tomto případě při postupu zleva).

Dalším derivováním vztahu /4/ dostaneme vztah:

$$\frac{d^2 M_o(x)}{dx^2} = \frac{dT(x)}{dx}. \quad /7/$$

Srovnáním takto vzniklého vztahu se vztahem /4/ dostaneme diferenciální závislost mezi ohybovým momentem, posouvající silou a spojitým zatížením:

$$\frac{d^2 M_o(x)}{dx^2} = \frac{dT(x)}{dx} = -q(x), \quad /8/$$

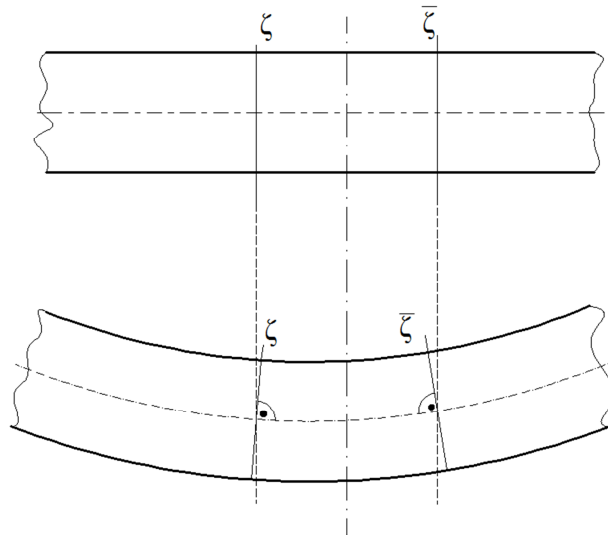
který lze zkráceně zapsat ve tvaru:

$$M_o''(x) = T'(x) = -q(x). \quad /9/$$

Na tomto zápisu je zřetelně vidět, že průběh posouvající síly $T(x)$ je integrační čarou průběhu spojitého zatížení $q(x)$ a průběh ohybového momentu $M_o(x)$ je integrační čarou posouvající síly $T(x)$.

2.2.2. Bernouliho teorém

Platí pro prostý ohyb a říká, že rovinné řezy (ζ a $\bar{\zeta}$, v obr. 4), které byly kolmé k neutrální ose, zůstávají kolmé k neutrální ose, respektive kolmé k tečně neutrální osy i po deformaci [3].

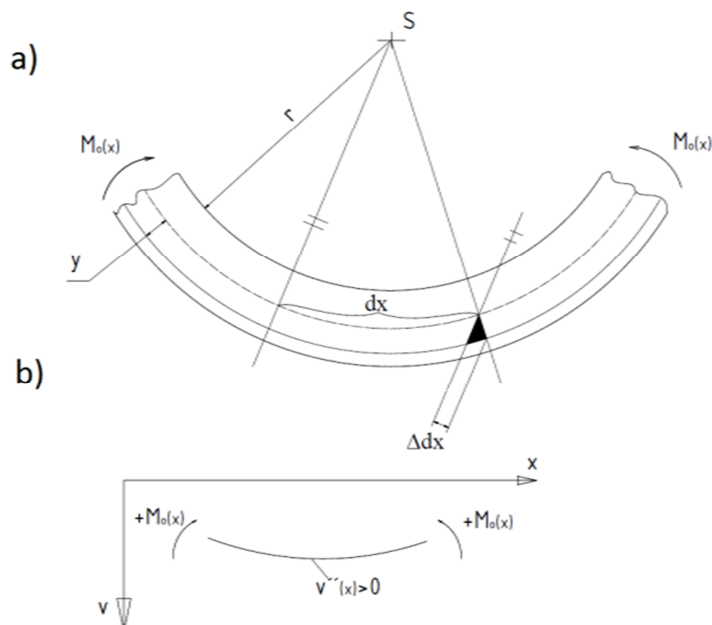


Obrázek 4 Kolmost řezů.

2.2.3. Bernouliho rovnice

Za předpokladu platnosti Hookeova zákona a Bernouliho teorému lze odvodit vztah pro poměrnou deformaci ve tvaru [1][1]:

$$\varepsilon_x = \frac{M_0}{EJ_Z} \cdot y \quad /10/$$



Obrázek 5 Poměrná deformace.

Další důležitou charakteristikou průhybové čáry je její křivost. Z *obr. 5* lze vyjádřit poměr:

$$\varepsilon_x = \frac{y}{r} = \frac{\Delta dx}{dx}, \quad /11/$$

odkud lze pomocí vztahu /10/ získat rovnici pro křivost:

$$\kappa = \frac{1}{r} = \frac{\varepsilon_x}{y} = \frac{M_o}{EJZ}. \quad /12/$$

Tyto rovnice jsou odvozeny pro konstantní ohybový moment. Nicméně odchylky vzniklé působením posouvající síly lze zanedbat, protože jsou velmi malé a ohybový moment může být tedy i funkcí polohy [1][1] .

Dosazením vztahů z analytické geometrie dostaneme diferenciální rovnici:

$$\kappa = \frac{1}{r} = \pm \frac{v''(x)}{[1+(v'(x))^2]^{3/2}}, \quad /13/$$

Prohnutí, uvedené na *obr. 2b*, říká, že průhyb bude záporný $v''(x) < 0$. Pro malé hodnoty průhybu lze člen $(v'(x))^2$, oproti jedničce, zanedbat. Použijeme – li toto zjednodušení a za průhyb dosadíme z rovnice /12/, dostaneme vztah:

$$\kappa = \frac{1}{r} = -v''(x) = \frac{M_o}{EJZ}. \quad /14/$$

Pro většinu inženýrských aplikací je tento zjednodušený tvar vyhovující. Pro nosníky s velkým poměrem délky k výšce, jako jsou listy ze svazků pružnic, planžety a podobně, je nutné použít nezjednodušený tvar /13/.

Diferenciální rovnici:

$$v''(x) = -\frac{M_o(x)}{EJZ(x)}. \quad /15/$$

poprvé předložil roku 1694 matematik James Bernoulli.

2.2.4. Úplná diferenciální rovnice

Aplikaci Bernoulliho rovnice rozšířil Leonard Euler a to spojením se Schwedlerovou větou [3]. Aplikujeme-li tedy dvakrát derivované vztahy /6/ na vztah:

$$\frac{dT(x)}{dx} = -q(x), \quad /16/$$

do vztahu 15, dostaneme diferenciální rovnici čtvrtého řádu:

$$\frac{d^2}{dx^2} [E \cdot J_Z(x) \cdot v''(x)] = -\frac{d^2 M_o(x)}{dx^2} = q(x). \quad /17/$$

Postupnou čtyřnásobnou integrací pravé a levé strany za vzniku čtyř integračních konstant lze dostat funkci průhybové čáry $v(x)$ [3].

3. Měření průhybu

3.1. Systém měření

Měřit průhyb znamená měřit polohu, respektive posun, změnu polohy. Bude-li měřen průhyb v bodě, bude měřen posun bodu. Druhou možností je měření polohy a tvaru průhybové čáry (střednice deformované působením zatížení).

Měření polohy a tvaru průhybové čáry je podstatně složitější, než měření polohy bodu, protože se jedná o obecnou rovinnou křivku, kterou přímo nevidíme, což situaci poněkud komplikuje. Můžeme buď uvažovat horní či spodní hranu nosníku za ekvidistantní křivku vůči průhybové čáře (střednici) nebo můžeme tuto interpolovat z horní a spodní hrany nosníku.

Samotnou křivku je nutno interpolovat z bodů, což lze provést mnoha metodami odvíjejícími se od počtu nasnímaných bodů na jednotku délky, požadovanou přesnost, předpokládaný typ křivky a podobně. Touto problematikou se podrobně zabývá počítačová grafika.

3.2. Principiální metody měření průhybu (polohy)

3.2.1. Stručný přehled popisovaných metod a snímačů

- Laserové snímače
 - Triangulační – s PSD senzorem
 - Laserové profil scannery – s CMOS maticí
 - Laserové mikrometry – „thru beam“
- Kapacitní snímače
 - Deskový – Mezerový a překrývací
 - S proměnným dielektrikem
 - S homogenizačním prstencem – guard ring
- Vyhodnocování obrazu
 - Digitální obraz
 - Senzory pro digitalizaci obrazu – CMOS a CCD
 - Měřicí zařízení – Jednotlivé části a smart kamery
 - Digitální korelace obrazu

- Indukční – magnetické snímače
 - Základní princip
- Konfokální sondy
 - Základní princip

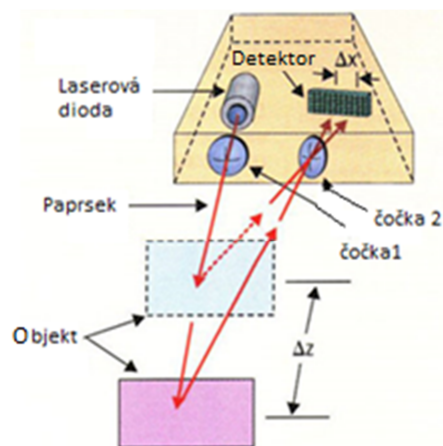
3.2.2 Laserové snímače

Z laserových technologií lze pro tuto aplikaci vybrat v zásadě dva principy:

- Odraz – laserová triangulace a laserové profil-skenery
- Snímání polohy / stínu / světla – laserové mikrometry

Laserová triangulace; snímač s PSD senzorem

Laserová dioda emituje paprsek, který je zaostřen přes čočku 1 (obr. 6). Poté paprsek dopadá na těleso, od kterého je odražen. Odražený paprsek je zachycen a zaostřen přes čočku (soustavu čoček) 2 a dopadá na snímač. Dojde-li ke změně polohy sledovaného objektu o Δz , změní se poloha dopadu paprsku na detektor o Δx . Vzhledem ke znalosti uspořádání měření, lze vyhodnotit ze změny polohy dopadu paprsku Δx , změnu polohy (v tomto případě průhybu) objektu Δz . Toto vyhodnocení zpracovává vyhodnocovací jednotka [4].



Obrázek 6 Uspořádání měření s triangulačním snímačem [15].

Na obr. 6 je zobrazen snímač s kolmo vystupujícím paprskem. Toto uspořádání je jedno z nejčastějších.

Jako senzor se používá PSD senzor (position sensitive detector – pozičně citlivý detektor). Využívá technologie fotocitlivých diod. Vyhodnocení vychází z měření proudů vznikajících na elektrodách senzoru [5].

Jako detektor je možno také použít citlivou vrstvu přijímače televizní kamery v ohniskové rovině čočky, která zaostřuje odražený paprsek. Na televizním přijímači (historicky) se následně dá určit počet televizních řádků, z něj rozdíl časů a z tohoto rozdílu změna vzdálenos-

ti [4]. Dnes se k zjištění počtu televizních řádků dá použít procesor. Avšak celý snímač v tomto provedení by měl poněkud jinou konstrukci.

Tímto typem senzorů se dá měřit pouze průhyb v bodě. Nicméně se dá provádět velmi rychle a poměrně s velkou přesností a ve velkém rozsahu.

Nevýhodou těchto senzorů je, že povrch měřeného objektu musí být alespoň trochu odrazivý, respektive neměl by mít tendenci pohlcovat světlo v červeném spektru. Právě k pohlcování červeného světla může docházet u přírodních materiálů (dřevo, kůže, ...). Tato nevýhoda se dá kompenzovat použitím modrého laseru, nicméně se promítne v ceně.

Běžné parametry tohoto typu senzorů [5]:

- Měřicí rozsah: 0,1mm – 10m
- Přesnost: 0,02% měřicího rozsahu (při nejmenších rozsazích i vyšší)
- Barva laseru: červená, modrá
- Teplota: 0 až +50°C

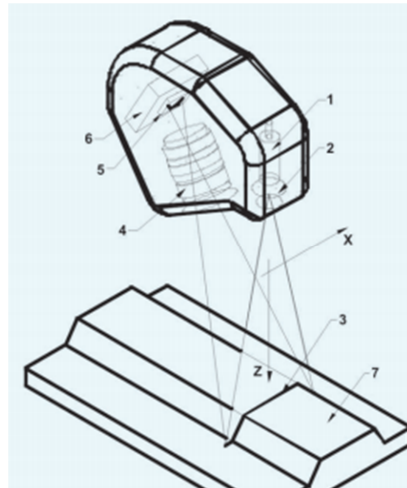
Vyhodnocení / výstup:

Zpracování hodnot z PSD detektoru provádí mikroprocesor, který bývá součástí senzoru. Výstup může být analogový (napěťový nebo proudový) i digitální.

Laserové profil scannery

System měření je velmi obdobný jako u snímače s PSD senzorem. Jedná se opět o laserovou triangulaci nicméně s jiným snímačem a poněkud odlišným systémem vyhodnocení.

Laserový paprsek emitovaný z 1 (obr. 7) prochází čočkou (soustavou čoček) 2 a v linii 3 dopadá na zkoumané těleso 7. Odtud je odražen do soustavy čoček 4, kde je usměrněn a odtud dopadá na CMOS matici (senzor).



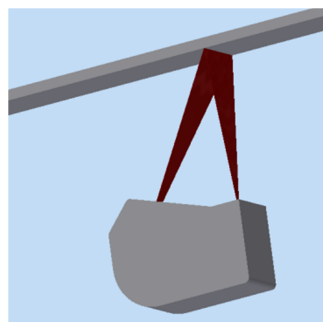
Obrázek 7 Uspořádání měření s profil scannerem [14].

CMOS matice je schopna dodat signál pro vyhodnocení dopadu odraženého paprsku ve dvou souřadnicích. V souřadnici z , která určuje vzdálenost a souřadnici x určující polohu na linii. Signál z CMOS matice je vyhodnocen v procesoru 6.

Možností jak realizovat měření průhybu s tímto typem senzoru je více:

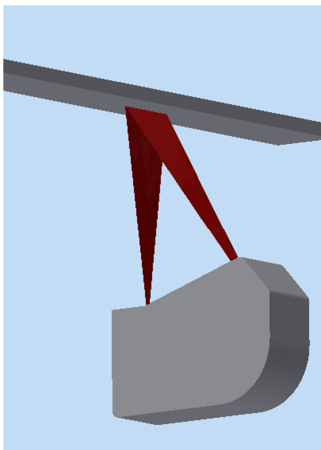
- o Měření v linii kolmo k podélné ose nosníku (obr. 8).

Toto uspořádání (pokud by měl být realizován jako jediný) lze považovat za zbytečné, protože nabídne stejné výsledky, jako měření jediným paprskem v bodě, které jde realizovat levněji a snáz.



Obrázek 8 Uspořádání měření laserovým skenerem kolmo k podélné ose nosníku.

- Měření v linii rovnoběžné s podélnou osou nosníku (obr 9).
Toto uspořádání už zjevně využívá možnosti tohoto snímače lépe než přechozí.
V uspořádání lze sledovat polohu více bodů, respektive přímo snímat průhybovou čáru (nebo alespoň její část).



Obrázek 9 Uspořádání měření laserovým skenerem rovnoběžně k ose nosníku.

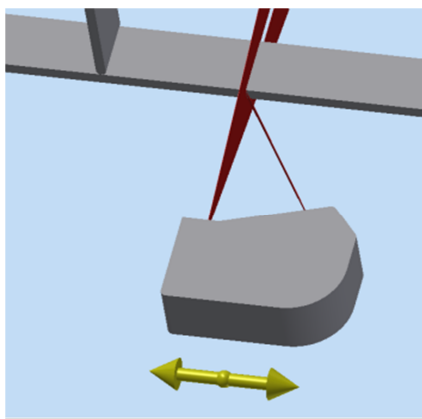
- Snímání z boku pohybujícím se senzorem (obr 10)
Toto je nejkomplikovanější možné uspořádání mající jisté výhody ale velkou řadu nevýhod (vůči zbylým dvěma).

Výhody:

- Možnost detekovat celou průhybovou čáru
- Postačuje snímat pouze úzkou oblast (menší levnější snímač)

Nevýhody:

- Nutnost dalšího zařízení pro pohyb
- Podstatně komplikovanější vyhodnocení
- Nutnost přesněji vyrobených vzorků (otřep na hraně)



Obrázek 10 Uspořádání měření laserovým skenerem pro snímání celé průhybové čáry z boku.

Běžné parametry tohoto typu senzorů:

- Měřicí rozsah:
 - Osa x: 1 mm – 600 mm
 - Osa z: 7 mm – 1400 mm
- Přesnost:
 - Osa x: 0,2% měřicího rozsahu
 - Osa z: 0,1% měřicího rozsahu
- Barva laseru: červená, modrá
- Teplota: 0 až +50°C

(přibližné hodnoty podle katalogů různých výrobců)

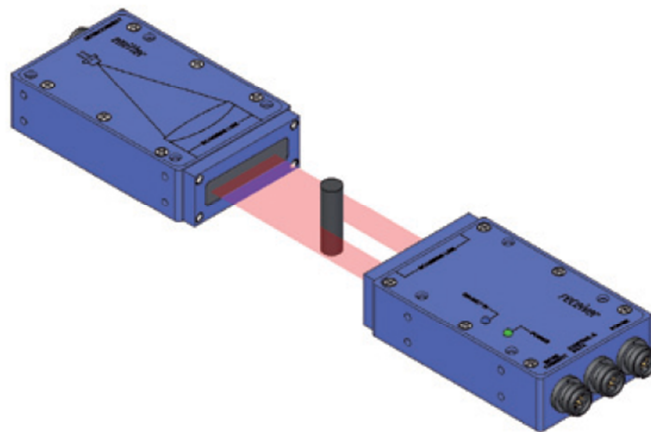
Vyhodnocení / výstup:

Zpracování hodnot z CMOS matice provádí mikroprocesor, který bývá součástí senzoru. Výstup může být analogový (napěťový nebo proudový) i digitální. Analogový výstup je tvořen dvěma kanály, pro každou osu jeden.

Laserové mikrometry

Laserové mikrometry se jako jediné z popsaných laserových snímačů skládají ze dvou částí. A to z vysílače (zdroje kolimovaného laserového paprsku) a přijímače.

Laserových mikrometrů je mnoho druhů a konstrukcí, nicméně základní princip měření je u všech stejný. Kolimovaný paprsek je částečně zastíněn objektem a přijímač rozlišuje světlo a stín, respektive jejich polohu vůči sobě. V této části práce se budou popisovány takzvané „thru-beam“ optické mikrometry [6].



Obrázek 11 Uspořádání obecného měření laserovým mikrometrem [6].

Nejjednodušším hlediskem, podle kterého lze laserové mikrometry rozdělit, je konstrukce vysílače a přijímače.

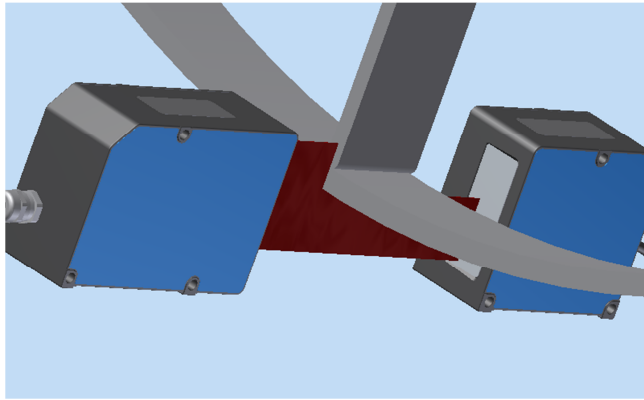
Konstrukce vysílačů není v zásadě, tak důležitá a určující, nicméně dají se provést buď s laserovými diodami, nebo s obyčejnými světelnými (LED) diodami.

Konstrukce s laserovou diodou jsou jednodušší na vytvoření kolimovaného svazku, ovšem je potřeba dbát zvýšené opatrnosti z důvodu ohrožení zraku.

Konstrukce s LED diodami jsou komplikovanější a dražší, avšak bezpečnější pro uživatele a přesnější [6].

Konstrukce přijímačů je mnohem důležitější. Určuje systém vyhodnocení měření, způsoby měření, možnosti použití.

První možností je přijímač s fotodiodou, nejčastěji používaný v kombinaci s vysílačem s laserovou diodou [6]. Fotodioda je schopna rozlišit velikost zastíněné a osvětlené části, nikoliv však jejich vzájemnou polohu. V zásadě lze tímto sledovat průhyb v bodě, pokud bude přívarek uzpůsoben tak, aby zastínil paprsek (jeho horní část) i při markantnějším průhybu.



Obrázek 12 Uspořádání měření průhybu laserovým mikrometrem.

Což není nevýhodou u zatěžování ve třech bodech, zastínění provede sám přípravek *obr. 12*. Komplikovanější na realizaci je to v uspořádání při zatížení ve čtyřech bodech - uspořádání na *obr. 5b*.

Druhou možností je přijímač s řádkovým snímačem. Tato konstrukce umožní mnohem širší spektrum využití, alespoň pro měření rozměrů. Stejně jako snímač s foto diodou rozlišuje světlo a stín, nicméně proti fotodiodě dokáže rozeznat více osvětlených / zastíněných oblastí a to včetně jejich polohy vůči sobě.

Při měření průhybu zatížením ve třech bodech, bude výsledek v zásadě totožný, jako při použití snímače s foto diodou. Snímat se bude pouze dolní bod (hranu) vzorku a přípravek zbytek paprsku zastíní *obr. 12*. Budeme-li ovšem měřit průhyb v přípravku pro čtyřbodový ohyb, respektive průhyb v nestíněném místě, můžeme snímat horní a dolní hranu vzorku a extrapolovat polohu průhybové čáry (bod na průhybové čáře).

Nutno zmínit možnost provádět měření pohybující se měřicí soustavou obdobně jako u profilu scanneru. Nicméně tento systém nese v zásadě stejné nevýhody a stejnou provozní a konstrukční zátěž jako zmiňovaná konstrukce s profil scannerem.

Běžné parametry laserových mikrometrů:

- Měřicí rozsah: 0,5 mm – 100 mm
 - Přesnost: 0,01 % rozsahu
 - Barva laseru: červená
- (přibližné hodnoty podle katalogů různých výrobců)

Za zmínku stojí také zvláštní kategorie takzvaných skenovacích mikrometrů. Tyto používají pro dosažení lepšího osvětlení paprsek rozmítaný rotujícím polygonem se zrcátky [6].

Vyhodnocení / výstup:

Zařízení většinou mívá složitější vyhodnocovací jednotku, protože vyhodnocení samotného měření je velmi komplikované a každý výrobce používá poněkud jiné metody. Do měření zasahuje mnoho faktorů (např. ohyb světla na hraně, vlastnosti snímačů, ...), které je potřeba nějak kompenzovat.

Výstup se dá realizovat analogově (napětově i proudově) i digitálně.

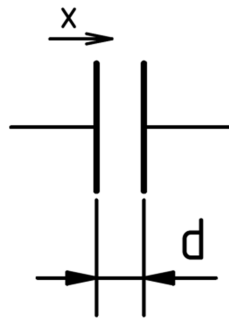
3.2.3 Kapacitní snímače

Působením neelektrických veličin můžeme u kapacitního snímače měnit [7]:

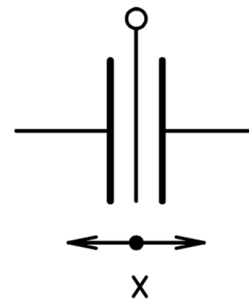
- Mezeru mezi deskami
- Plochu elektrod (desek)
- Dielektrikum

Mezerový snímač

Pracuje se změnou velikosti mezery mezi deskami kondenzátoru *obr. 13*, respektive se změnou dvou mezer v diferenčním provedení *obr 14*, které dovoluje lépe linearizovat měření [7].



Obrázek 13 Deskový kapacitní snímač 1.



Obrázek 34 Deskový kapacitní snímač 2.

Celé vyhodnocení měření pak vychází ze vztahu pro výpočet kapacity [7]:

$$C = \frac{1}{d} \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S$$

/18/

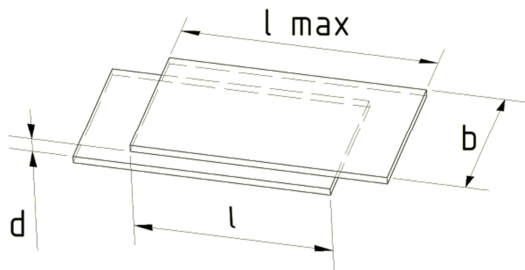
Realizace tohoto snímače může být různá:

- Jedna externí elektroda a vzorek jako elektroda druhá
- Elektroda uchycená na vzorku
- Ect.

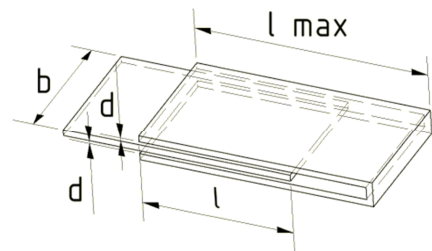
Je zřejmé, že bezkontaktnost tohoto typu snímače je poněkud sporná. Spolu s faktem, že se hodí spíše pro kovové vzorky a pouze velmi omezený rozsah měření (kolem 1 mm [7]) lze označit za poměrně nevhodný.

Překrývací snímač

Pracuje se změnou velikosti plochy snímače respektive se změnou délky l překrytí elektrod kondenzátoru *obr. 15*. Lze jej také provést diferenčně *obr. 16*, což potlačí nepřesnost vzniklou nerovnoběžností desek [7].



Obrázek 15 Překrývací kapacitní snímač 1.



Obrázek 16 Překrývací kapacitní snímač 2.

Celé vyhodnocení opět vyjde z rovnice pro výpočet kapacity kondenzátoru, upravené pro daný případ (pro *obr. 15*) [7]:

$$C = \frac{b \cdot l}{d} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad /19/$$

Je zřejmé, že tento typ snímače je pro dané měření nevhodný a alespoň blízko bezkontaktnosti neproveditelný. Proto nebude podrobněji rozebírán.

Snímač s proměnným dielektrikem

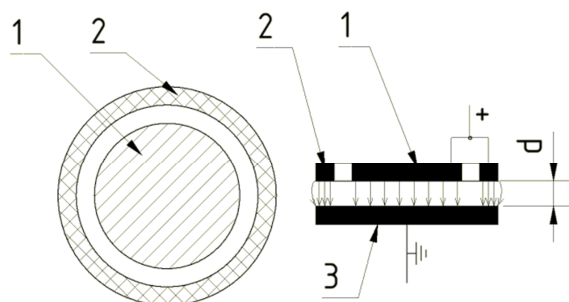
Změna dielektrika může nastat těmito způsoby [7]:

- Změna plochy dielektrika
- Změna tloušťky dielektrika
- Změna permitivity

Tyto typy snímačů pracují s velmi malými rozměry a opět prakticky nejsou realizovatelné pro bezkontaktní měření. Proto nebudou podrobněji rozebírány.

Kapacitní snímač s homogenizačním prstencem

V zásadě mezerový snímač, který je schopen díky homogenizaci elektrického pole mezi elektrodou snímače a vzorkem měřit v podstatně větším rozsahu.



Obrázek 17 Kapacitní snímač s homogenizačním prstencem.

Měřicí elektroda 1 obr. 17 je spojena s homogenizačním prstencem (guarding ring [5]), aby byly umístěny na stejný potenciál, což zajistí homogenní pole mezi měřicí elektrodou 1 a snímaným objektem 3, který bývá povětšinou uzemněn [8].

Takto je zajištěno homogenní pole a lze s vysokou přesností aplikovat vztah /18/ pro určení vzdálenosti vzorku od snímače.

Nevýhodou je, že je potřeba, aby byl vzorek vodivý, respektive aby na vzorku byla umístěna vodivá deska, čímž už se měření opět dostává na mez bezkontaktnosti.

Za další nevýhodu, či spíše komplikaci, lze považovat zakřivení vzorku, které by mohlo snížit přesnost měření. Toto se dá kompenzovat deskou umístěnou na vzorek, která se spolu s ním nebude deformovat, což ovšem opět nemusí být považováno zcela za bezkontaktní.

Měřicí parametry tohoto typu senzorů od firmy MICRO-EPSILON:

- Měřicí rozsah: 0,05 mm – 10 mm
- Přesnost: 0,04 nm – 15 μ m
- Teplota: -50 °C až +200 °C

Výstup je analogový, napěťový či proudový.

3.2.4. Vyhodnocování obrazu

Vyhodnocování obrazu či také strojové / počítačové vidění je označení pro moderní systém, který kombinuje hardware a software do funkčního celku. Tento je pak schopen zachytit obraz a následně jej analyzovat / vidět a dále s ním pracovat.

Vyhodnocovat lze velmi mnoho parametrů, od přítomnosti objektu, až po jeho přesnou polohu, strukturu jeho povrchu a rozměry [10].

Digitální obraz

Je to v zásadě dvojrozměrná síť hodnot reprezentující světelnou intenzitu jeho jednotlivých bodů. Digitální obraz lze vyjádřit jako tzv. obrazovou funkci dvou proměnných tvořenou maticí hodnot [9]. Lze tedy psát:

$$z = f(x, y). \quad /20/$$

Hodnoty $f(x, y)$ obrazové funkce odpovídají jasu bodu (x, y) , kde hodnoty (x, y) určují souřadnici daného obrazového elementu neboli pixelu.

Senzory získaný obraz převádějí na diskrétní počet pixelů a každému je přiřazena hodnota v šedé nebo barevné stupnici a souřadnice.

Takovýto digitalizovaný obraz se dá popsat třemi základními vlastnostmi [9]:

- Rozlišení
 - Udává počet sloupců a řádků pixelů.
- Bitová hloubka
 - Vyjadřuje počet bitů použitých pro dekodování hodnoty pixelu.
- Počet barevných rovin
 - Popisuje, kolik sítí pixelů společně tvoří celý obraz.

Senzory pro digitalizaci obrazu

Výše je popsáno, jaký obraz je potřeba získat. Toto získání obrazu se provádí, použijeme-li velmi jednoduchou definici, přeměnou světelného záření na elektrickou energii. Toho lze dosáhnout „osvětlením“ senzoru / čipu, světlem z objektivu [9].

Vybrat lze v zásadě ze dvou senzorů CMOS a CCD:

CMOS:

Využívá technologii výroby integrovaných obvodů s vysoce nahuštěnými tranzistory (v tomto případě světlo-citlivými). Ty lze adresovat jako jednotlivé buňky matice (jednotlivé pixely) [9]. Osvětlením je získán analogový signál, který je dále zpracován.

Vzhledem ke své konstrukci mají poměrně malou spotřebu energie. Energeticky nejnáročnější je přechod mezi stavy „zapnuto“ a „vypnuto“ [11]. Díky sériové výrobě jsou poměrně levné a malé.

CCD:

U tohoto typu senzorů je naakumulovaný náboj ve formě analogového signálu přesouván přes matici tvořenou Schottkyho fotodiodami. Elektrony prezentující jednotlivé pixely jsou přesouvány do výstupního zesilovače a v něm je náboj převeden na napětí.

Tyto senzory jsou rychlé a signál vykazuje nízké hodnoty šumu. Vyrábějí se však poměrně nestandardním procesem a proto jsou dražší a hůře se zabudovávají do systému [9].

Měřící zařízení

Celé měření může být provedeno jediným zařízením, tzv. „smart kamerou“. Která je schopna pracovat zcela autonomně, tedy obraz nasnímat, zpracovat a následně i vyhodnotit a poté výsledky poslat do počítače, kde se s nimi dá dále pracovat v dalším softwaru.

Měření se taky může provádět kombinací různého zařízení. Základem měřicího systému je snímací jednotka, kterou lze opatřit různými objektivy, které určují oblast měření.

Dále měřicí aparatura čítá různá osvětlovací zařízení, která mohou silně ovlivnit kvalitu snímku.

V neposlední řadě je nutná vyhodnocovací jednotka a hlavně vyhodnocovací software, který se silně různí podle toho co je měřeno, výrobce apod.

Všechny tyto části samozřejmě musí obsahovat i smart kamera, nicméně tam zařízení není dalece tak variabilní, většinou je konfigurace pevná, daná konstrukcí.

Vzhledem k tomu, že i nejběžnější kamery jsou dnes schopny snímat s rychlostí 25 snímků za vteřinu a rychleji, je zjevné, že vyhodnocení obrazu je jedinou možnou metodou, jak dynamicky snímat celou průhybovou čáru.

Běžné parametry smart kamer:

- Rozlišení: 752 x 480 až 2560 x 1920
 - Rychlost snímkování: 14 – 100 fps
- (přibližné hodnoty získané z katalogů různých výrobců)

Vyhodnocení / výstup:

Jak je zmíněno výše, vyhodnocení provádí komplikovaný software v počítači respektive mikropočítači.

Výstup je realizován digitálně a to nejčastěji přes konektor ethernet či RS232.

Digitální korelace obrazu

Je založena na vyhodnocování změny polohy kontrastního skvrnitého vzoru na povrchu měřeného tělesa. Změna polohy je vyhodnocována pomocí matematické operace zvané korelace. Hledání posuvu je převedeno na hledání maxima korelační funkce. Korelační funkce je počítána na základě obrazu před a po deformaci. Skvrnitý vzor může být na povrchu přirozeně nebo může být uměle vytvořen [12].

3.2.5. Indukční – magnetické snímače

Jedná se o snímače tvořené buď cívkou a magnetickým obvodem, u kterého je vytvořen pomocí stálého magnetu, nebo budícího obvodu magnetický tok Φ . V zásadě pak lze měřenou veličinu, v tomto případě průhyb / polohu, vyhodnocovat ze změn magnetického toku nebo měnit počet (ovlivněných) závitů cívky.

Tento typ snímačů (budeme-li uvažovat snímače schopné pracovat bezkontaktně) se spíše hodí ke snímání kmitajících objektů [7] nebo k určení zdali je objekt přítomen. Jeho polohu je však schopen určit pouze s přesností jednotek milimetrů, což je nedostačující.

S větší přesností se tyto snímače dají realizovat v případě, že na objektu je umístěn permanentní magnet, což opět měření dostává na hranu bezkontaktnosti. Je tedy zjevné, že tento typ snímačů se pro tuto aplikaci příliš nehodí a proto nebude více rozebírán.

3.2.6. Konfokální sondy

Sonda je tvořena zdrojem polychromatického světla a soustavou čoček, které světlo rozptýlí na monochromatické řízenou chromatickou aberací. Sonda je ve výrobě kalibrována tak, že každá vlnová délka odpovídá určité vzdálenosti. Odražené světlo dopadá na spektrometr a ten detekuje a zpracovává spektrální změny [13].

Sonda je určena pro pasivní měření. Neobsahuje žádné aktivní elektronické součásti. Umožňuje měření ve velmi náročných podmínkách a to i v provozech s nebezpečím výbuchu.

Tento typ sondy se však příliš nehodí pro připojení na stávající měřicí aparaturu a nebude podrobněji rozebírána.

4. Výběr vhodné alternativy

Po zvážení základních vlastností a možností jednotlivých metod, zvláště vzhledem ke stávající měřicí aparatuře, byly vybrány jako nejvhodnější laserové snímače.

Zvoleny byly tři produkty od dvou výrobců – Micro – Epsilon a RTM, s.r.o.. Triangulační laserový senzor, profil scanner a laserový mikrometr. Od každého výrobce vždy jeden s přibližně srovnatelnými parametry.

Je potřeba vzít v úvahu, že ke všem snímačům je zapotřebí další kabeláže a k některým pravděpodobně také další vyhodnocovací zařízení. Řádově v ceně několika tisíc korun. Neohledě na možnost rozšířit měřicí zařízení o lineární pohon pro snímání celé průhybové čáry pohybujícím se snímačem, které by se také pohybovalo v řádu tisíců až desetitisíců korun.

4.1. Porovnání

Tabulka 1 - Porovnání triangulačních laserových snímačů.

Výrobce		Micro – Epsilon		RTM, s.r.o.	
Druh		Triangulační laser			
Název		LD 1610 - 50		1000T 150	
Měřicí rozsah		50 mm		50 mm	
Frekvence měření		10 kHz		100 Hz nebo 2 kHz	
Přesnost		2,5 μ m		< 50 μ m	
Výstup	Analog	0 – 10 V	4 – 20 mA	1 – 9 V	4 – 20 mA
	Digital	RS 232 / RS 422		Ethernet	
Rozměry		102 x 74 x 27,5 mm		136 x 146 x 50 mm	
Cena		cca 75 000 Kč		Cca 3550 € (cca 100 000 Kč)	

Z těchto dvou snímačů je zjevně výhodnější LD 1610 – 50. Vyniká zejména vyšší přesností a v neposlední řadě také nižší cenou. Podrobnější informace o obou snímačích lze nalézt v katalogu (jeho části), který se nachází v přílohách na konci této práce.

Tabulka 2 Porovnání profil scannerů.

Výrobce		Micro – Epsilon	RTM, s.r.o.	
Druh		Profil scanner		
Název		scanCONTROL 2610 – 100	RF 620 HS/DHS 200	
Měřicí rozsah	osa x	83,1 – 120,8 mm	65 – 135 mm	
	osa z	190 – 290 mm	125 – 325 mm	
Frekvence měření		200 Hz	250 nebo 500 Hz	
Výstup	Analog	0 – 10 V	4 – 20 mA	0 – 10 V
	Digital	Ethernet	Ethernet / RS 486	
Rozměry		96 x 85 x 33 mm	89 x 83 x 47,5 mm	
Cena		cca 200 000 Kč	cca 6 095€ (cca 170 000 Kč)	

Z těchto dvou snímačů je viditelně vhodnější volbou RF 620 HS / DHS 200 a to zejména díky nižší ceně. Podrobnější informace o snímačích lze nalézt v přílohách práce.

Tabulka 3 Porovnání laserových micrometrů.

Výrobce		Micro – Epsilon	RTM, s.r.o.	
Druh		Laserový mikrometr		
Název		ODC 2520-46	RF 656	
Měřicí rozsah		46 mm	50 mm	
Frekvence měření		2,5 kHz	800 Hz	
Přesnost		1 μ m	2 μ m	
Výstup	Analog	0 – 10 V	0 – 10 V	4 – 20 mA
	Digital	Ethernet / RS 422	RS232 / RS485	
Rozměry	vysílač	133 x 78 x 30 mm	72 x 48 x 30 mm	
	přijímač	130 x 78 x 30 mm	138 x 48x 30 mm	
Cena		cca 100 000 Kč	cca 2900€ (cca 80 000 Kč)	

Z těchto dvou mikrometrů je poměrně složité určit, který je lepší. Bude-li ovšem hlavním měřítkem cena, pak je mikrometr RF 656 patrně nejvhodnější volbou. Podrobnější informace lze nalézt v přílohách této práce.

4.2. Zhodnocení

Bude-li posuzována pouze finanční stránka věci, je pravděpodobně nejjasnější volbou některý z triangulačních laserových senzorů (nejen některý z výše zmíněných, ale i některý z dalších, které se vyskytují na trhu).

Vhodnějším se ovšem zdá posuzovat celou volbu komplexněji a zvolit některý z laserových mikroskopů. Výsledek, který jsou schopny poskytnout, je ve všech ohledech srovnatelný s výsledky z profil scannerů a cenově jsou podstatně příznivější. Oproti triangulačním senzorům jsou sice poněkud dražší, ale ne o mnoho a dosahují vyšší přesnosti a mají podstatně větší potenciál i pro komplikovanější aplikace než jen měření průhybu v bodě.

5. Experimentální část

5.1. Popis

Experiment byl proveden pro srovnání stávajícího systému měření s měřením laserovým profilometrem.

Nosník byl zatěžován ve středu silou o velikosti 0 – 2000 N a to zhruba po 250 N a vždy byl změřen průhyb jak kontaktní sondou, tak profilometrem. Měření bylo takto provedeno 3x. Měření je vyhodnoceno až od zatížení 500 N vzhledem k nelineárnímu chování dotykové sondy při velmi malém průhybu.

5.1.1. Hlavní použité zařízení

- Laserový profilometr ScanControl LLT 2800-25

Nastavené parametry:

- Rozlišení osa x 1024 bodů
- Frekvence skenování 50 Hz

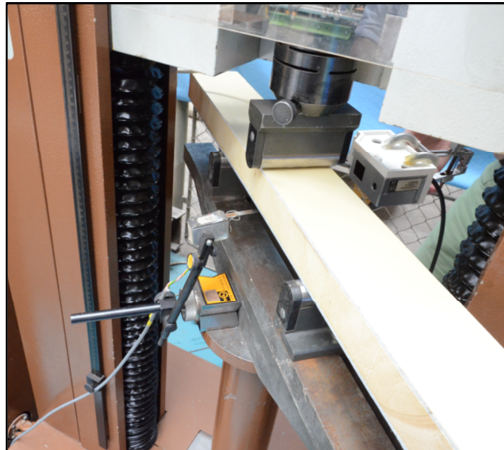
- Kontaktní planžetová sonda s tenzometry v půlmostovém zapojení
- Tenzometrická ústředna Spider8
- Univerzální zatěžovací stroj FPZ 100/1
- Přípravek pro tříbodové zatížení (*obr. 5a*)

Teplota: 22,3 °C

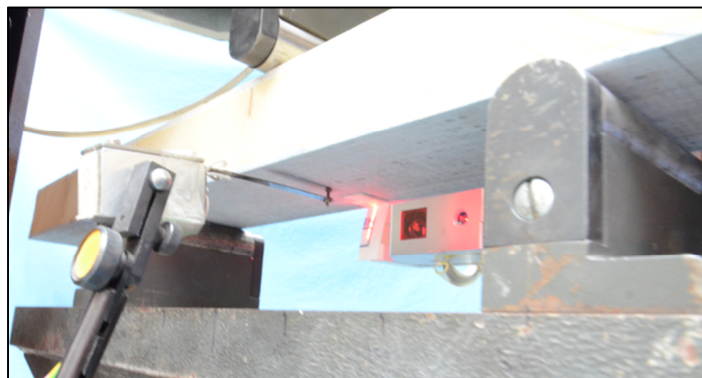
Vlhkost: 38 %

5.1.2. Uspořádání měření

Na *obr. 18 a obr. 19* jsou fotografie z měření. Po levé straně nosníku je umístěna kontaktní planžetová sonda dotýkající se středu nosníku a po pravé straně je umístěn laserový profilometr snímající hlavně spodní hranu nosníku, respektive přechod mezi nosníkem a stínítkem nalepeným na spodní ploše nosníku.



Obrázek 18 – Reálný pohled na měření 1



Obrázek 19 – Reálný pohled na měření 2

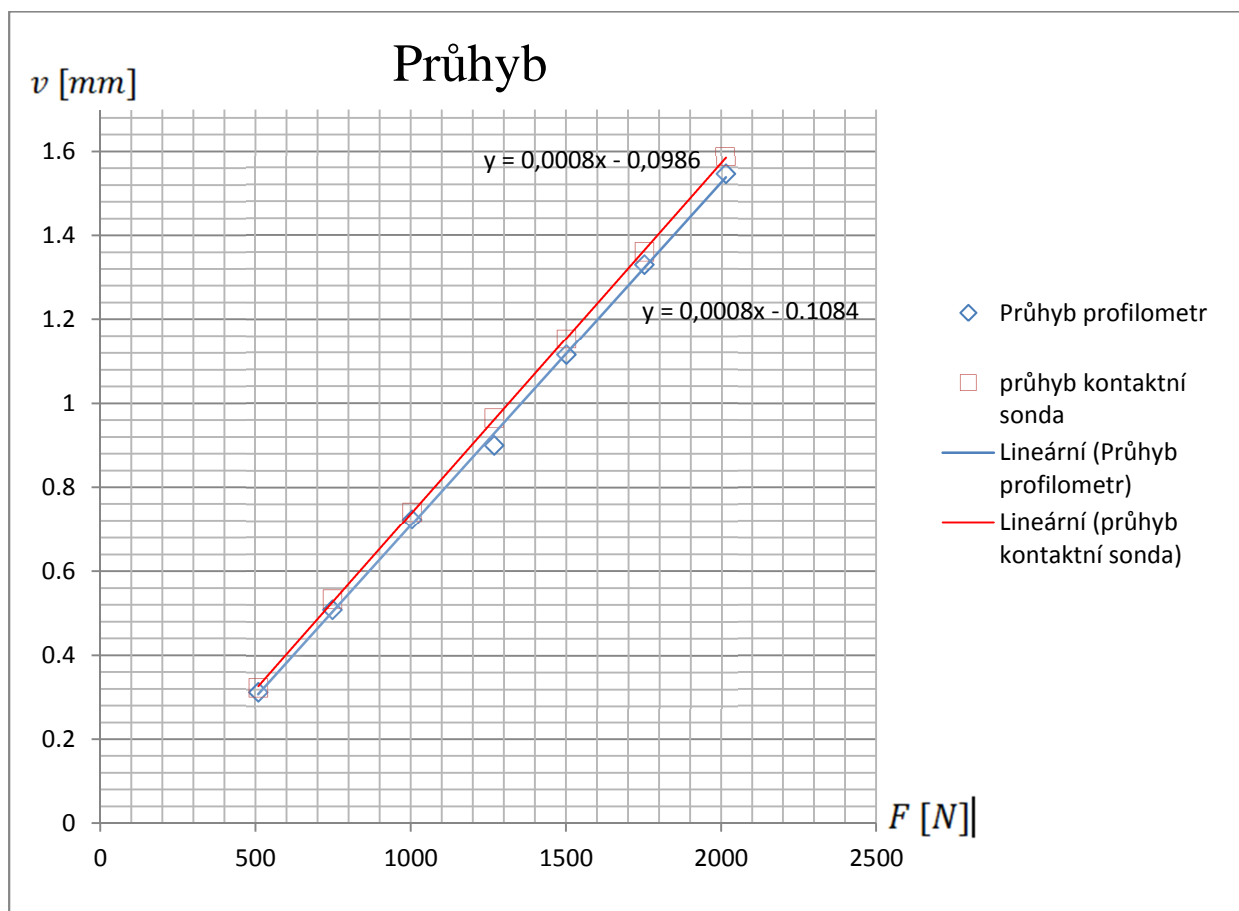
Zatěžován byl sendvičový nosník s příčnými rozměry 40 x 90 mm. Jádro sendviče bylo tvořeno PVC pěnou a potah byl tvořen sklolaminátem.

5.2. Výsledky měření

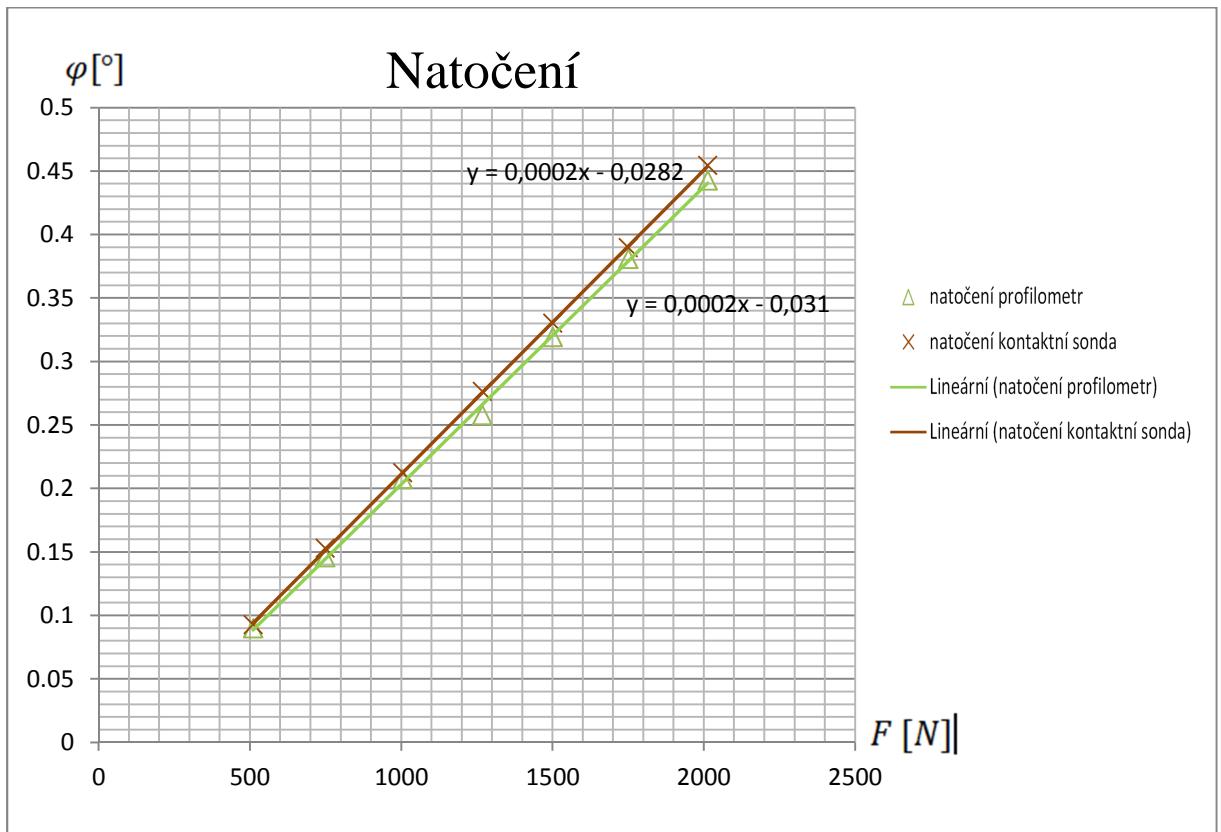
5.2.1. Měření 1

Tabulka 4 – výsledky měření 1

Síla [N]		510,7	749,5	1005	1269	1501	1751	2013	Průměr
Průhyb [mm]	Profilometr	0,313	0,5085	0,7235	0,8995	1,1145	1,3295	1,5445	-
	Sonda	0,3235	0,5336	0,741	0,9643	1,1523	1,3603	1,5863	-
Rozdíl [mm]		0,0105	0,0251	0,0175	0,0648	0,0378	0,0308	0,0418	0,0326
Odchylka [%]		3,35	4,94	2,42	7,20	3,39	2,32	2,71	3,76
φ [°]	Profilometr	0,090	0,146	0,207	0,258	0,319	0,381	0,442	-
	Sonda	0,093	0,153	0,212	0,276	0,330	0,390	0,454	-



Graf 1 Průhyb - měření 1



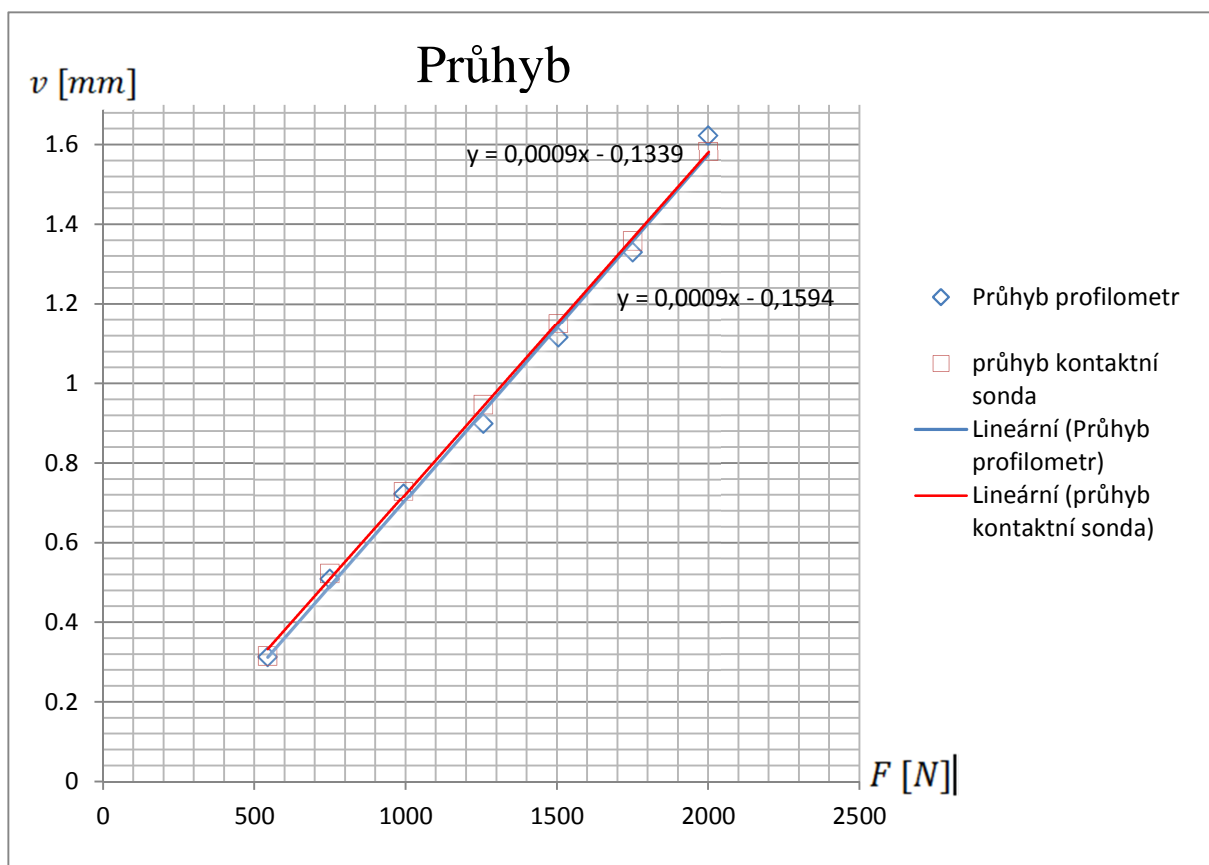
Graf 2 Natočení - měření 1

Z výsledků i grafů je patrné, že výsledky měření jsou srovnatelné a liší se velmi málo. Mezi kontaktní sondou a profilometrem je rozdíl v řádu jednotek setin milimetrů, respektive jednotek procent.

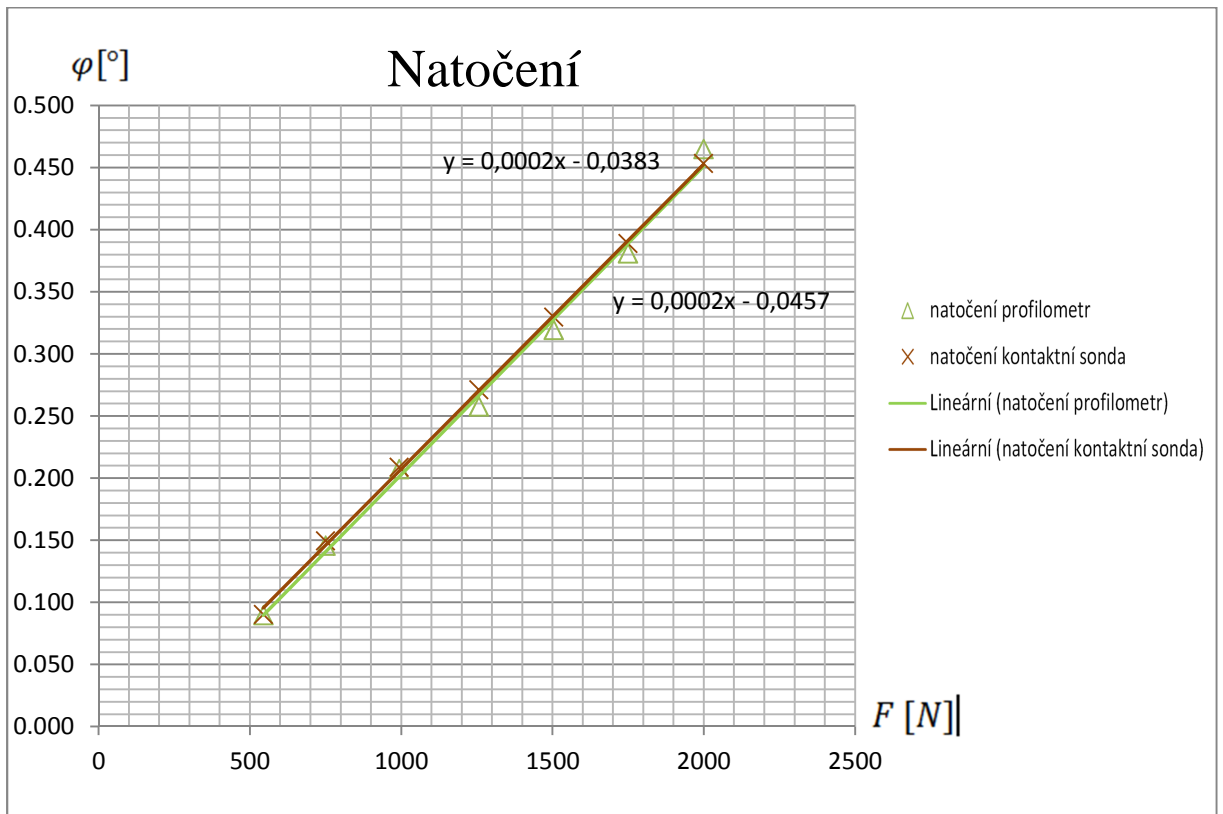
5.2.2. Měření 2

Tabulka 5 – výsledky měření 2

Síla [N]		544,8	750,3	993,2	1257	1504	1750	2000	Průměr
Průhyb [mm]	Profilometr	0,313	0,5085	0,7235	0,8995	1,1145	1,3295	1,6225	-
	Sonda	0,3152	0,5216	0,7289	0,9464	1,1504	1,3574	1,5824	-
Rozdíl [mm]		0,0022	0,0131	0,0054	0,0469	0,0359	0,0279	0,0401	0,0245
Odchylka [%]		0,70	2,58	0,75	5,21	3,22	2,10	2,47	2,72
φ [°]	Profilometr	0,090	0,146	0,207	0,258	0,319	0,381	0,465	-
	Sonda	0,090	0,149	0,209	0,271	0,330	0,389	0,453	-



Graf 3 Průhyb – měření 2



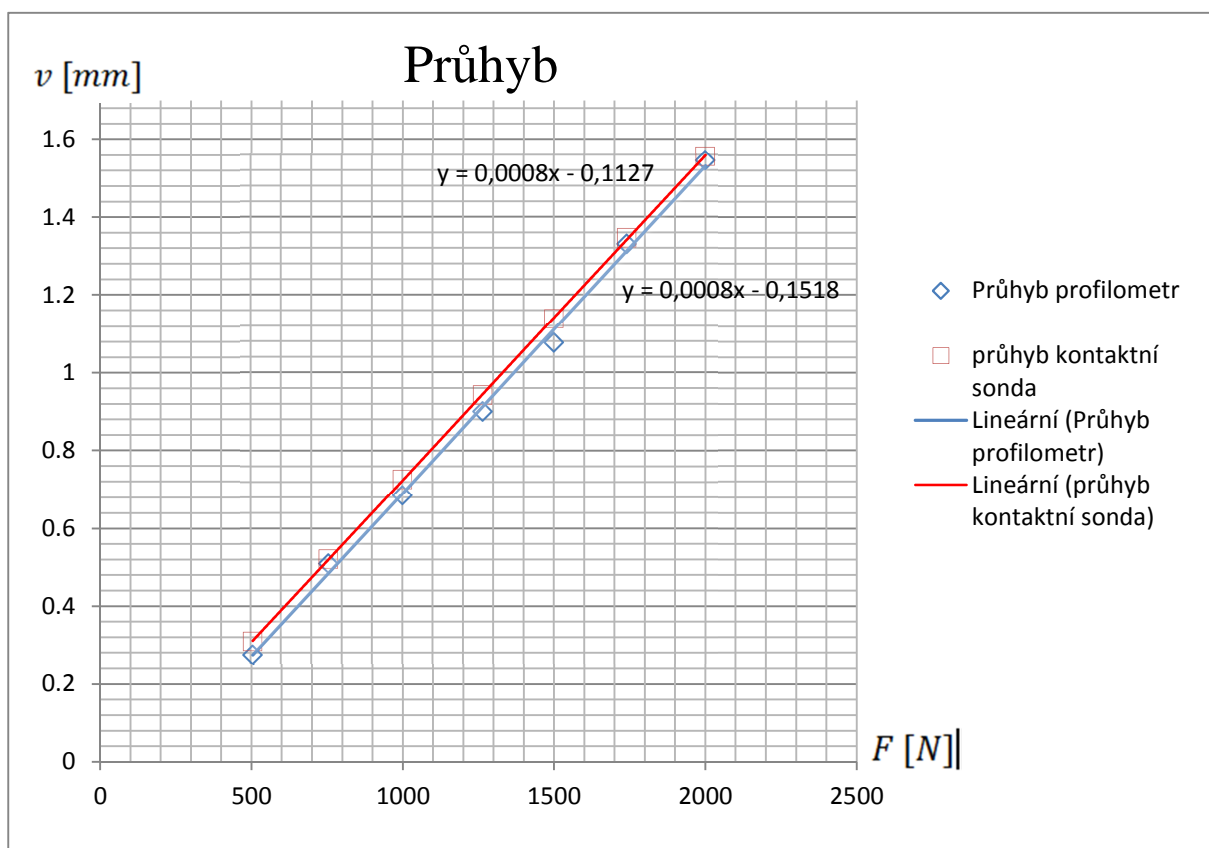
Graf 4 Natočení – měření 2

Toto měření, obdobně jako předchozí, má obdobnou vzájemnou odchylku a to v řádu setin milimetru respektive jednotek procent.

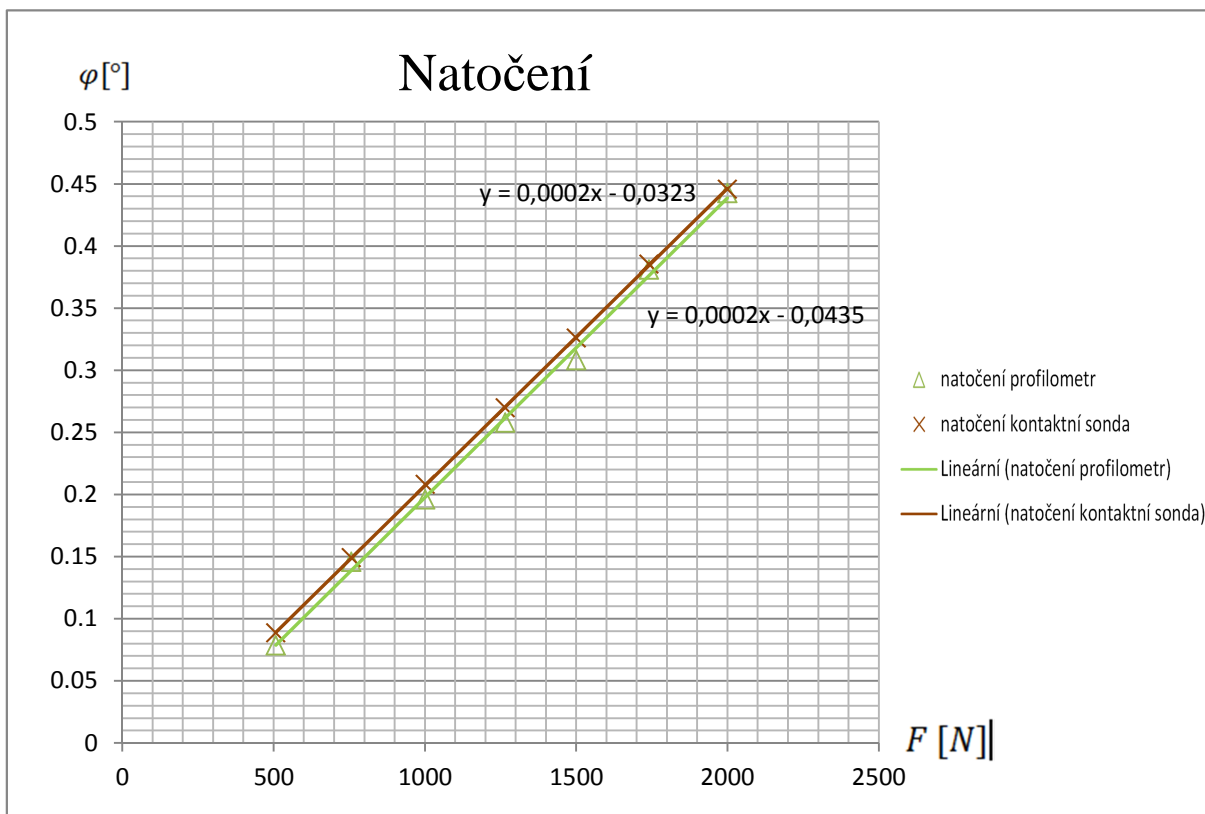
5.2.3. Měření 3

Tabulka 6 – výsledky měření 3

Síla [N]		507	756,4	1001	1265	1500	1740	2000	Průměr
Průhyb [mm]	Profilometr	0,274	0,5085	0,6845	0,8995	1,0755	1,3295	1,5445	-
	Sonda	0,3087	0,5206	0,7261	0,9414	1,1374	1,3454	1,5554	-
Rozdíl [mm]		0,0347	0,0121	0,0416	0,0419	0,0619	0,0159	0,0109	0,0313
Odchylka [%]		12,66	2,38	6,08	4,66	5,76	1,20	0,71	4,78
φ [°]	Profilometr	0,078	0,146	0,196	0,258	0,308	0,381	0,442	-
	Sonda	0,088	0,149	0,208	0,270	0,326	0,385	0,446	-



Graf 5 Průhyb – měření 3



Graf 6 Natočení – měření 3

I toto měření vykazuje rozdíl v rámci setin milimetru respektive jednotek procent. Tomuto se však v tomto měření poněkud vymyká první hodnota, kde je odchylka přes 10 %.

5.3. Zhodnocení

Z výsledků je zjevné, že oba druhy měření jsou srovnatelné. Avšak kontaktní sonda je špatně použitelná pro malé průhyby, při měření totiž kontaktní sonda vykazovala jistou hysterezi, lineární byla až po dosažení průhybu několika setin milimetru a toto komplikuje vyhodnocení měření. Profilometr však tímto netrpí a lze měřit i ve velmi malém rozsahu a s větší přesností.

Další výhodou profilometru je absence nutnosti kalibrace. Nicméně profilometr se musí správně umístit, což by ovšem odpadlo, pokud by byl vhodně zapracován do přípravku.

6. Závěr

Budou-li shrnuty všechny informace z této práce, lze říci, že nejvhodnější volbou pro provádění bezkontaktního měření průhybu, se stávajícím vybavením v těžkých laboratorích odboru Pružnosti a pevnosti FS ČVUT, je některý z laserových snímačů. Z autorova pohledu se jako nejvhodnější jeví laserový mikroskop a to jak z hlediska funkčnosti, tak z hlediska finančního.

Tento systém měření je srovnatelný se systémem stávajícím a v některých ohledech je zjevně i lepší.

Bude-li potřeba snímat celou průhybovou čáru, pak autor považuje za vhodné, aparaturu ještě rozšířit o lineární či krokový motor.

Je však nutné zmínit, že pro takovéto uspořádání bude pravděpodobně nutné vytvořit vyhodnocovací a řídicí software.

7. Použitá literatura:

- [1] HÁJEK Emanuel, Pavel REIF a František VALENTA. *Pružnost a pevnost I*. Praha: SNTL, 1988.
- [2] HÁJEK Emanuel. *Pružnost a Pevnost* 1. vyd. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1985.
- [3] MICHALEC, Jiří, Zdeněk KULIŠ, František VALENTA, Miroslav SOCHOR, Jan ŘEZNÍČEK a Ladislav ŠUBRT. *Pružnost a pevnost I*. 3. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 308 s. ISBN 978-80-01-04224-3.
- [4] JENČÍK, Josef a Ludvík KUHN. *Technická měření ve strojnictví*. 1. Praha: SNTL, 1982.
- [5] *Master books on sensors: modular courses on modern sensors Leondaro da Vinci project CZ/PP-134026*. Praha: BEN - technical literature, 2003, 1 sv. (různé stránkování). ISBN 80-730-0129-2.
- [6] ZELINKA, Ondřej. Bezkontaktní měření rozměrů: Laserové mikrometry. *AUTOMA*. 2009, **10**(4): 52. Dostupné také z: http://automa.cz/index.php?id_document=38860
- [7] Zehnula, Karel. *Snímače Neelektrických Veličin* 2. uprav. a dopln. vyd. Praha: Nakladatelství techn. lit., 1983.
- [8] Catalogue capaNCDT. *MICRO-EPSILON* [online]. 2014 [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://www.micro-epsilon.cz/download/products/cat--capaNCDT--en.pdf>
- [9] *Workswell: Průmyslová kamera* [online]. 2015 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <http://www.prumyslova-kamera.cz/>
- [10] *Smart View* [online]. 2015 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <http://www.smartview.cz/>
- [11] Strojové vidění: Slovníček pojmů. *Analýza obrazu* [online]. 2015 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <http://www.analyza-obrazu.cz/strojove-videni/slovnicek-pojmu/>
- [12] ZAJÍČEK, Vít. *POROVNÁNÍ DEFORMACÍ STANOVENÝCH METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ A OPTICKÝM MĚŘÍCÍM ZAŘÍZENÍM*. Brno, 2011. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41777. Diplomová. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Miloš Vlk.
- [13] Catalogue confocalIDT. *MICRO-EPSILON* [online]. 2014 [cit. 2015-06-10]. Dostupné z: <http://www.micro-epsilon.cz/download/products/cat--confocalDT--en.pdf>
- [14] Laserový skener: RF 620 HS/DHS. *RTM* [online]. 2015 [cit. 2015-06-11]. Dostupné z: http://www.rmt.cz/katalog/2D%20laserscanner/KL/KL-RI-P-202_1211_RF620DHS_www.pdf
- [15] Laser confocal and laser triangulation. *Cyber technologies* [online]. 2014 [cit. 2015-06-14]. Dostupné z: <http://www.cybertechnologies.com/wp/products/sensors/confocal-laser-sensor>