



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

NÁVRH AUTOMATICKÉHO CYKLU PRO POSUZOVÁNÍ ZPŮSOBILOSTI MĚŘENÍ OBROBKOVOU SONDOU NA OBRÁBĚCÍM CENTRU

DESIGN OF AN AUTOMATIC CYCLE FOR ASSESSING THE MEASUREMENT CAPABILITY OF A
WORKPIECE PROBE ON A MACHINING CENTER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Filip Mišún

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.

BRNO 2021

Zadaní diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Filip Mišún
Studijní program:	Výrobní systémy
Studijní obor:	Výrobní systémy
Vedoucí práce:	Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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

Návrh automatického cyklu pro posuzování způsobilosti měření obrobkovou sondou na obráběcím centru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Problematika měření obrobků na obráběcích strojích v poslední době nabývá na významu, a to s cílem zavedení vyššího stupně automatizace ve výrobě a snižování vedlejších strojních časů. Obráběcí stroje pracují zpravidla v dlouhodobě nestabilním prostředí a mění se jejich dlouhodobá geometrická přesnost. Změna geometrické přesnosti stroje může mít potom vliv na výsledném kontrolovaném rozměru obrobku, který je měřen pomocí obrobkové sondy. Cílem diplomové práce je navrhnout a ověřit automatický cyklus měření pro stanovení způsobilosti měření obrobků na CNC obráběcích strojích pomocí obrobkové sondy. Takto navržený měřicí cyklus je nutné ověřit na stroji MCV QUICK 754.

Toto téma diplomové práce je podpořeno projektem "Strojírenská výrobní technika a přesné strojírenství" CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008404 prostřednictvím Operačního programu výzkum, vývoj, vzdělávání (2014 – 2020) a spolufinancováno Evropskou unií.

Cíle diplomové práce:

- Popis současného stavu používané měřicí techniky.
- Systémový rozbor problematiky, návrh a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení zadaného úkolu.
- Pro navržený postup naplánovat a realizovat experiment.
- Statistické zpracování a vyhodnocení výsledku experimentu.
- Vlastní závěry popisující vhodnost nasazení navrženého postupu.
- Doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, J. a kol., MM Průmyslové spektrum: Konstrukce CNC obráběcích strojů IV. 2018. Speciální vydání. Dostupný z WWW: ISBN 978-80-906310-8-3.

WECK, M., Brecher, Ch. Werkzeugmaschinen: Konstruktion und Berechnung. 2006. überarb. Auflage. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2006. 701 s. ISBN 3-540-22502-1.

HOLUB, M. Geometric Accuracy of Machine Tools. In Measurement in Machining and Tribology. Springer, Cham, 2019. p. 89-112. ISBN: 978-3-030-03821-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abgabestellung der Diplomarbeit

Institut: Fakultät für Maschinenbau
Student: **Bc. Filip Mišún**
Studienprogramm: Produktionssysteme
Studienfach: Produktionssysteme
Betreuer: **Dipl.-Ing Jan Berthold**
Akademisches Jahr: 2020/21

In Übereinstimmung mit dem Gesetz Nr. 111/1998 über die Hochschulen und der Studien- und Prüfungsordnung der VUT Brno legt der Direktor des Fachbereichs das folgende Thema der Diplomarbeit fest:

Entwurf eines automatischen Zyklus zur Beurteilung der Messfähigkeit eines Werkstück-Messtasters auf einem Bearbeitungszentrum

Kurzcharakteristik des Problems:

Das Thema Messen von Werkstücken auf Bearbeitungszentren hat in letzter Zeit immer mehr an Bedeutung zugenommen, mit dem Ziel, einen höheren Automatisierungsgrad in der Produktion einzuführen und Stillstandszeiten zu reduzieren. Bearbeitungszentren arbeiten in der Regel in einer langfristig instabilen Umgebung und ihre langfristige geometrische Genauigkeit ändert sich. Eine Änderung der Geometriegenauigkeit der Maschine kann sich dann auf das resultierende Kontrollmaß des Werkstücks auswirken, das mit einem Werkstück-Messtaster gemessen wird. Ziel der Diplomarbeit ist die Konzeption und Verifizierung eines automatischen Messzyklus zur Ermittlung der Messfähigkeit von Werkstücken auf CNC-Werkzeugmaschinen mittels eines Werkstück-Messtaster. Der so ausgelegte Messzyklus muss am MCV QUICK 754 verifiziert werden.

Dieses Thema der Diplomarbeit wird durch das Projekt "Strojírenská výrobní technika a přesné strojírenství" unterstützt CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008404 durch das Operationelle Programm Forschung, Entwicklung, Bildung (2014 - 2020) und kofinanziert durch die Europäische Union.

Schwerpunkte der Diplomarbeit:

Beschreibung des aktuellen Stands der verwendeten Messtechnik.

Systemanalyse des Problems, Vorschlag und Begründung der gewählten Methode zur Lösung der gestellten Aufgabe.

Planen Sie ein Experiment für das vorgeschlagene Verfahren und führen Sie es durch.

Statistische Aufbereitung und Auswertung des Versuchsergebnisses.

Eigene Schlussfolgerungen, die die Eignung des vorgeschlagenen Verfahrens beschreiben.

Empfehlungen für die Praxis.

Liste der empfohlenen Literatur:

MAREK, J. a kol., MM Průmyslové spektrum: Konstrukce CNC obráběcích strojů IV. 2018. Speciální vydání. Dostupný z WWW: ISBN 978-80-906310-8-3.

WECK, M., Brecher, Ch. Werkzeugmaschinen: Konstruktion und Berechnung. 2006. überarb. Auflage. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2006. 701 s. ISBN 3-540-22502-1.

HOLUB, M. Geometric Accuracy of Machine Tools. In Measurement in Machining and Tribology. Springer, Cham, 2019. p. 89-112. ISBN: 978-3-030-03821-2.

Der Abgabetermin für die Diplomarbeit richtet sich nach dem Zeitplan des Studienjahres 2020/21

In Brno, am

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato diplomová práce popisuje postupy jednotlivých elektronických kompenzací pro CNC stroje sloužící ke zvýšení přesnosti zařízení. Na tuto část navazuje určování tolerancí přesnosti měření obráběcích strojů a vliv jednotlivých elektronických kompenzací na základě naměřených dat pomocí obrobkové sondy a kalibrovaných etalonů podle normy VDA 5.

Abstract

This diploma thesis describes the procedures of individual electronic compensations for CNC machines used to increase the accuracy of machines. This part is followed by the determining tolerance of the measuring and the influence of individual electronic compensations based on measured data using touch probe and calibrated gauge blocks according to VDA 5 norm.

Klíčová slova

Elektronická kompenzace, Double Ballbar, Laser Interferometer, Lasertracer, volumetrická kompenzace, kompenzace kolmosti, kompenzace polohy, obrobková sonda, geometrická přesnost stroje, tolerance měření

Keywords

Electronic compensation, Double Ballbar, Laser Interferometer, Lasertracer, volumetric compensation, perpendicularity compensation, position compensation, touch probe, geometric accuracy of the machine, measurement tolerance

Bibliografická citace

MIŠÚN, Filip. *Návrh automatického cyklu pro posuzování způsobilosti měření obrobkovou sondou na obráběcím centru* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134995>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Michal Holub. Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Professur Produktionssysteme und -prozesse, Betreuer Jan Berthold.

Poděkování

Toto téma diplomové práce je podpořeno projektem "Strojírenská výrobní technika a přesné strojírenství" CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008404 prostřednictvím Operačního programu výzkum, vývoj, vzdělávání (2014 – 2020) a spolufinancováno Evropskou unií. Chtěl bych poděkovat vedoucímu této práce Ing., Dipl.-Ing Michalu Holubovi, Ph.D. za vedení, stejně tak za jeho pomoc, ochotu a cenné rady během vypracovávání. Stejně tak bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Dipl.-Ing Jan Berthold za vedení. Také bych chtěl poděkovat Ing. Tomášovi Markovi, Ph.D. za asistenci a pomoc při provádění měření.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je moje původní dílo, pracoval jsem na ní samostatně pod vedením Ing., Dipl.-Ing Michala Holuba, Ph.D. a Dipl.-Ing Jan Berthold a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 20.5.2021

.....

Filip Mišún

Obsah

Úvod	18
Motivace	20
1 Měřicí sondy na obráběcích strojích.....	22
1.1 Použití obrobkových sond	22
1.2 Princip fungování obrobkové sondy	22
1.3 Rozdělení obrobkových sond.....	22
1.3.1 Konstrukční technologie dotykové sondy	23
1.3.2 Přenos signálu	25
1.3.3 Dotykové těleso sondy	26
1.4 Měření pomocí obrobkové sondy	28
1.4.1 Určení roviny.....	28
1.4.2 Určení kruhových útvarů.....	28
1.4.3 Určení úhlu.....	29
1.4.4 Příklady měřících cyklů	29
2 Geometrická přesnost stroje	30
2.1 Geometrická přesnost vztažená k rozměru	30
2.2 Zdroje geometrických chyb	30
2.3 Zařízení pro měření geometrické přesnosti	31
2.3.1 Laser interferometr.....	31
2.3.2 QC20-W ballbar	32
2.3.3 LaserTRACER	33
2.4 Kontrola přesnosti obráběcích strojů	33
2.4.1 Přesnost polohování	33
2.4.2 Přesnost kruhové interpolace	34
2.4.3 Volumetrická přesnost.....	35
3 Kompenzace geometrické přesnosti	36
3.1 Dělení kompenzací	36
3.2 Základní typy kompenzací.....	37
3.2.1 Kompenzace přímočarosti.....	37
3.2.2 Kompenzace chyby najetí do polohy	37
3.2.3 Volumetrická kompenzace.....	37
4 Použitá technika k provedení experimentů.....	38
4.1 Demonstrátor	38
4.2 Obrobková sonda	38
4.3 Johanssonovy měřky.....	39
4.4 Digitální libela	40
5 Návrh postupu měření	41
5.1 Určení kompenzačních konstant.....	41

5.1.1	Kompensace polohy	41
5.1.2	Kompensace kolmosti a polohy.....	42
5.1.3	Volumetrická kompensace	43
5.2	Strategie měření.....	43
6	Zpracování naměřených dat	46
6.1	Chyba měření	46
6.2	Určení délky etalonu	48
6.3	Určení tolerance měření	49
6.4	Prezentace naměřených hodnot.....	52
7	Měření na stroji MCV QUICK 754	54
7.1	Měření v ose x	54
7.1.1	Kompensace pro osu x.....	54
7.1.2	Naměřená data pro osu x	56
7.2	Vyšetřovací měření.....	57
7.2.1	Vliv teploty stroje	57
7.2.2	Kolmost pracovních os v rovině xz	58
7.2.3	Naklápění křížového stolu	60
7.3	Kalibrace sondy	61
7.4	Měření v ose y	62
7.4.1	Kompensace pro osu y.....	63
7.4.2	Naměřená data pro osu y	64
7.5	Opakované měření v ose y	65
7.5.1	Opakovaná kompensace pro osu y	65
7.5.2	Naměřená data pro osu y	68
7.6	Porovnání vlivů použitých kompensací pro osu y	69
8	Diskuze k dosaženým výsledkům	71
	Závěr	73
9	Zusammenfassung der Arbeit in Deutsch Sprache	74
9.1	Einleitung	74
9.2	Stand der Technik.....	74
9.2.1	Die Funktionsweise der Werkstück-Messtaster.....	75
9.2.2	Geometrische Genauigkeit der Maschine.....	78
9.3	Präzisierung der Aufgabestellung	80
9.4	Experimenteller Teil.....	82
9.4.1	Messungen auf der X-Achse.....	83
9.4.2	Untersuchende Messung des Maschinenverhaltens.....	84
9.4.3	Messungen auf der Y-Achse.....	86
9.4.4	Vergleich der angewandten Kompensationen für die Y-Achse	89

9.5	Diskussion der erzielten Ergebnisse	90
9.6	Zusammenfassung	91
10	Bibliografie.....	94
11	Seznam použitých zkratek, symbolů, obrázků a tabulek.....	97
11.1	Zkratky	97
11.2	Použité symboly.....	97
11.3	Seznam obrázků	98
11.4	Seznam tabulek	100
12	Přílohy	101
12.1	Obrázky z měření.....	101
12.2	Kalibrační list etalonů	110
12.3	Matlab	112
12.3.1	Chyba ustavení etalonu	112
12.3.2	Výpočet délek- přímka_bod rovina_bod	113
12.3.3	Výpočet tolerance	114

Úvod

V současné době je kladen stále větší a větší důraz na produktivitu a přesnost výroby. V případě přesného obrábění je nedílnou součástí procesu výroby – kontrola tvarové a rozměrové přesnosti obrobků. K tomuto účelu kontroly se používá přímo na obráběcím stroji obrobková sonda. Díky nasazení obrobkové sondy přímo v procesu výroby na obráběcím stroji je možné zefektivnit výrobu a být tak konkurenceschopnější.

Tento proces nabývá na významu z důvodu kladení důrazu na zvyšování automatizace při výrobě a snižování vedlejších časů přesunem obrobku na měrové středisko. Je nezbytné se na tento kontrolní proces podívat nejen ze strany přesnosti a opakovatelnosti obrobkové sondy, ale také z pohledu přesnosti a opakovatelnosti obráběcího stroje, které mohou patřit mezi slabé místo. Rozměry získané pomocí obrobkové sondy na obráběcím centru jsou většinou orientační nebo relativní, jelikož zde chybí zásadní tolerance rozměru a nelze proto jimi deklarovat rozměry obrobku. Zavedením postupů pro měření na obráběcích strojích s jasnými tolerancemi pak sníží nároky na obsluhu, a klesá tak riziko vzniku chyby lidským faktorem.

Tato práce se zabývá vytvořením postupů sloužících určením tolerance měření vybraného stroje pomocí obrobkové sondy. Následně je zkoumán vliv vybraných elektronických kompenzací na velikost tolerančního pole. Přesněji tedy, která z kompenzací má nejlepší vliv na samotnou toleranci měření. Byl vytvořen postup, který popisuje aplikaci samotných kompenzací na konkrétní stroj, tak i postup určení tolerance měření.

Tento postup byl následně testován a laděn na stroji MCV 754 QUICK od firmy Kovosvit, který se nachází v laboratořích Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky, působící pod Fakultou strojního inženýrství na VUT v Brně a je připravován postup pro dlouhodobé ověřování výsledků na stroji MCV 1220 od firmy TAJMAC-ZPS.

Motivace

Ve všech odvětvích průmyslu jsou kladeny vysoké nároky na produktivitu, stejně tak tomu je i v oblasti obráběcích strojů. Možnost, jak zvýšit efektivitu výroby, je provádět větší počet operací na jednom stroji. Jedna z těchto operací je měření rozměrů finálního obrobku.

V praxi jsou k tomu účelu běžně využívány souřadnicové měřicí stroje (CMM), které jsou schopny měřit v tolerancích deklarovanými výrobcem, a to zejména díky jejich umístění v oddělné a temperované místnosti. V praxi se však často ve výrobním procesu využívá ke kontrole obrobku obráběcí stroj s obrobkovou sondou, kde však zcela chybí údaj o tolerancích a mylně se užívá například opakovatelnosti sondy za celkovou hodnotu přesnosti měření. Je potřeba si však uvědomit, že do výsledné tolerance měření se promítají všechny chyby, a to nejen sondy ale i geometrické chyby celého stroje.

Stěžejním bodem této práce bylo vytvořit postup, jak určit toleranční pole měření pro konkrétní stroj MCV 754 QUICK od firmy Kovosvit. Dalším úkolem bylo klasifikovat geometrické chyby, které mají největší vliv na velikosti tolerančního pole měření a pomocí elektronických kompenzací je minimalizovat, a tím zlepšit přesnost měření stroje.

Získané poznatky mohou mít následně využití v podnicích, které potřebují pro zákazníka deklarovat rozměr výrobku v určitých tolerancích. Pro určité případy by mohly být použity postupy uvedené v této práci, přičemž k měření by mohl být využit stávající stroj, na kterém byla součást vyrobena. To by přineslo úsporu nákladů. Nebylo by totiž potřeba speciálního měřicího zařízení, popřípadě by se snížil čas výroby, jelikož by nebylo potřeba manipulovat s obrobkem, který by se v automatickém cyklu přeměřil přímo na stroji, na kterém byl vyroben.

1 Měřicí sondy na obráběcích strojích

Měřicí sondy (dále jen sondy) jsou v dnešní době nedílnou součástí CNC obráběcích strojů a své využití mají ve všech fázích procesu. Jedná se o spínač, který je navržený tak, aby se aktivoval při kontaktu s povrchem obrobku. Přínosem je pak lepší ekonomika výroby, díky čemuž se jejich použití stále rozšiřuje. Sondy pro obráběcí stroje je možné rozdělit na sondy [1]:

- pro měření obrobku
- nástrojové pro kontrolu nástrojů
- skenovací stroje pro vytváření 3D modelů z fyzických objektů.

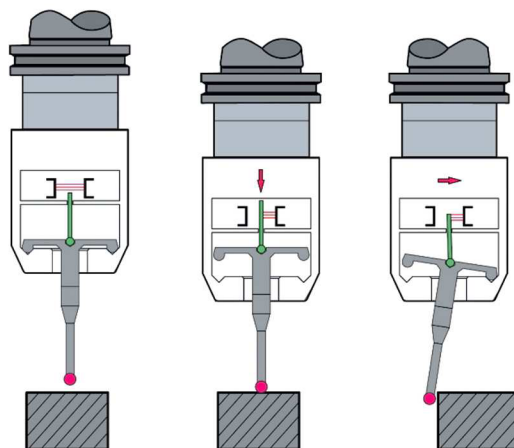
1.1 Použití obrobkových sond

Použití obrobkových sond během celého procesu výroby zvyšuje efektivitu výroby, a tím snižuje celkové náklady. Jejich použití spočívá v určování polohy, orientace v pracovním prostoru stroje nebo rozměrů obrobku. Umožňují zahájit výrobu bez ručního zásahu obsluhy, kdy při nepřesném upnutí obrobku dojde k posunu a natočení souřadnicového systému.

Pro měření obrobků se pro sondy využívají měřicí cykly, ve kterých jsou definovány dráhy sondy. Při doteku nebo kolizi s objektem je generován snímací signál. Získaná data jsou následně zpracována pro výpočet polohy měřeného prvku. [1]

1.2 Princip fungování obrobkové sondy

Obrobková sonda je upnuta ve vřetení pomocí upínacího přípravku, stejně jak tomu je u ostatních nástrojů. Při kontaktu dotekové kuličky s obrobkem dojde k vychýlení tyčinky a detekci kontaktu, viz obr. 1. Signál je následně odeslán do řídicího centra stroje k dalšímu zpracování.



Obr. 1 Konstrukce obrobkové sondy, převzato z [2], upraveno

1.3 Rozdělení obrobkových sond

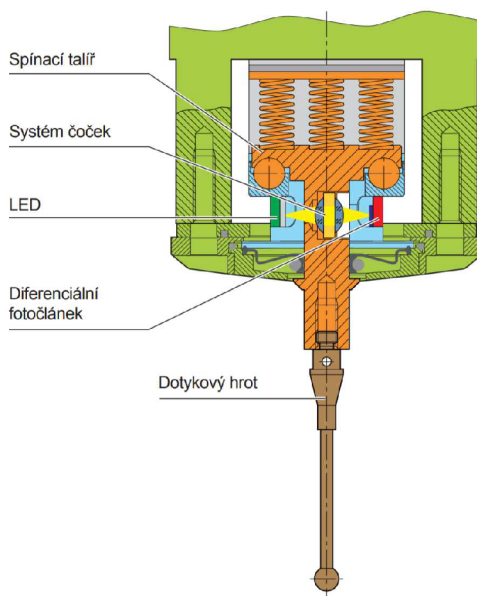
Obrobkové sondy mají různá provedení. Výběr provedení pak závisí především na jejím použití. V této kapitole budou popsány hlavní možnosti použité technologie v oblasti konstrukce, následném přenosu signálu a typech dotykových těles.

1.3.1 Konstrukční technologie dotykové sondy

Detekce vychýlení dříku s dotykovým tělesem může být provedena několika způsoby. Mezi tyto způsoby patří:

Optický senzor

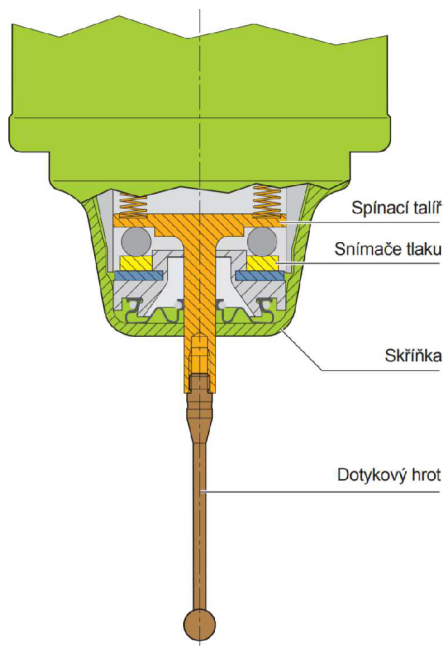
Pomocí LED článku jsou generovány světelné paprsky, které procházejí přes čočku, která je propojena s dříkem sondy. Následně světelné paprsky dopadají jako světelný bod na diferenciální fotočlánek. Při změně dopadu světelného bodu závislého na poloze čočky je vygenerován spínací signál. Příklad viz obr. 2. [3]



Obr. 2 Schéma fungování dotykové sondy s optickým senzorem [3]

Tlakový senzor

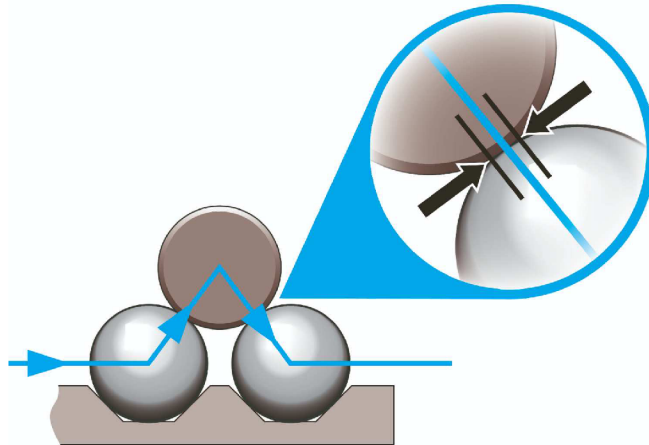
Tento typ konstrukce pracuje s přesným tlakovým snímačem. Samotný spínací impuls je generován na základě analýzy silového působení. [3] Konstrukční zpracování viz obr. 3.



Obr. 3 Schéma fungování dotykové sondy s tlakovým senzorem [3]

Odporový senzor

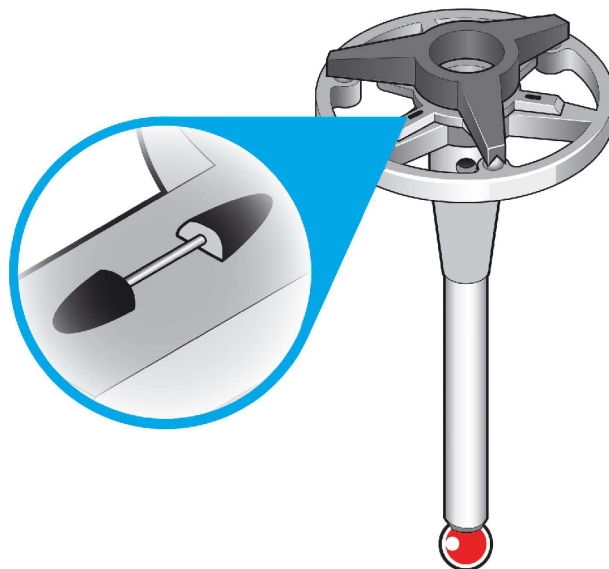
Kinematické odporové sondy obsahují odpružené kinematické upnutí tyčinek a kuliček viz obr. 4, pomocí kterého je definována poloha dotykového tělesa. Díky elektrickému obvodu je možné měřit i odpor celé soustavy, čím větší je síla působící na dotek, tím se odpor zvyšuje. Na základě toho je definovaná prahová hodnota aktivace, kdy dojde k vygenerování aktivačního signálu. [4]



Obr. 4 Schéma vytvoření elektrického obvodu pro odporový senzor [4]

Tenzometrický senzor

Tenzometrické sondy jsou konstrukčně velmi podobné sondám odporovým, nicméně elektrický obvod je nahrazen technologií tenzometrů pro měření kontaktní síly působící na dotek a generování signálu. [4] Schématické zobrazení viz obr. 5.



Obr. 5 Schématické zobrazení použití technologie tenzometrů [4]

Bylo provedeno porovnání různých mechanismů viz tabulka 1.1. Zvoleny byly sondy o podobných velikostech, které jsou zároveň blízké parametrům tenzometrické obrobkové sondě Renishaw, která byla použita během experimentů, více v kapitole 4.2.

Tabulka 1.1 Srovnání parametrů vybraných obrobkových sond, délka dřívku 50 mm

	Heidenhain TS750 [5]	Heidenhain TS740 [6]	Renishaw OPM60 [7]	Renishaw OMP400 [8]
Detekční mechanismus	Optický	Tlakový	Odporový	Tenzometrický
Spínací síla	X/Y = 0,2 N Z = 1,5 N	X/Y = 0,2 N Z = 0,6 N	X/Y = 0,75 N Z = 5,3 N	X/Y = 0,06 N Z = 2,55 N
Opakovatelnost měření (2σ)	0,25 μm	0,25 μm	1.00 μm	0,25 μm

Technické parametry vybraných zástupců se ve většině případů od sebe mnoho neliší, největší rozdíl nastává díky technologii RENGAGE v případě tenzometrické sondy, kde je díky nízké spínací síle dosaženo vysoké citlivosti, což vede k menšímu vychýlení a deformaci dřívku během měření. Opakovatelnost měření sondy následně nabývá nižších hodnot.

1.3.2 Přenos signálu

Pro přenos informací z obrobkové sondy do řídicího systému stroje se využívají tyto provedení:

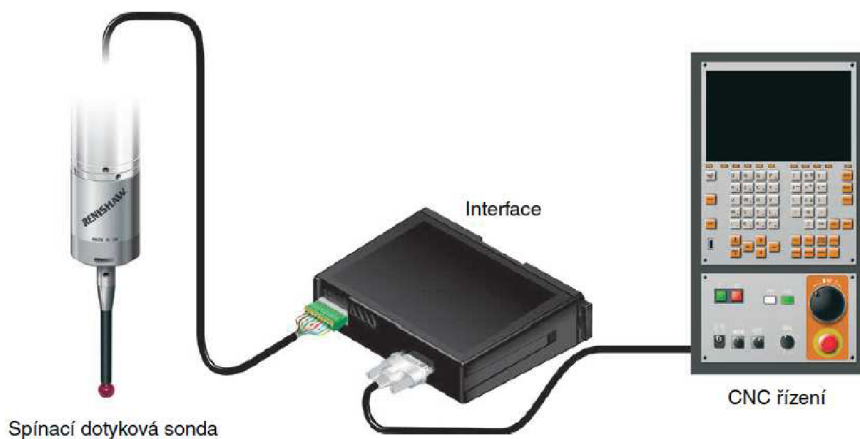
Optický systém, ten využívá ke komunikaci řídicího systému se sondou technologii infračerveného paprsku. [9] Systém provedení viz obr. 6



Obr. 6 Systém provedení obrobkové sondy s optickým systémem [9]

Rádiový systém, pracuje na podobném uspořádání jako systém optický, ale přenos dat mezi sondou a řídicím systémem stroje je uskutečněn pomocí rádiových vln. [9]

Kabelový systém, je velice jednoduchou spolehlivou formou přenosu signálu. Spínací dotyková sonda je s řídicím systémem propojena fyzicky pomocí kabelu, který ji zároveň i napájí. [9] Provedení viz obr. 7.



Obr. 7 Systém provedení obrobkové sondy s kabelovým systémem [9]

1.3.3 Dotykové těleso sondy

Pomocí dotykového hrotu dochází ke kontaktu sondy se samotným obrobkem. Výkon, respektive přesnost sondy je přímo ovlivněn vlastnostmi doteku. Tím může být například špatná geometrie doteku, jeho špatné umístění nebo nevhodná konstrukce dřívku, umožňující nadměrný průhyb během měření. Vzhledem k měřenému materiálu a způsobu měření se volí materiál dotyku. [10] Možné materiály, ze kterých se dotyk vyrábí jsou:

Rubín je jeden z nejtvrdších materiálů. V případě syntetického rubínu se jedná o oxid hlinitý. Rubínové kuličky mají hladký povrch, jsou pevné v tlaku a disponují vysokou odolností vůči mechanickému poškození. Vyhovuje většině průmyslových požadavků a používá se pro většinu operací. [11]

Nitrid křemíku, velice tvrdý materiál, odolný vůči opotřebení, který lze opracovat do přesných kulových tvarů. Vhodný především ke skenování¹ hliníku, protože nevzniká adhezivní otěr². Při skenování oceli však dochází ke značnému opotřebení. [11]

Oxid zirkoničitý, jedná se o velmi tvrdý keramický materiál, svou tvrdostí a rezistivitě vůči opotřebení se přibližuje kvalitám rubínu. Je proto vhodný pro aplikace skenování. [11]

Dalším důležitým parametrem je tvar dotyku. Použití konkrétních typů závisí především na měřicí aplikaci. Možné typy jsou popsány v následujících bodech.

Kulový dotyk, viz obr. 8 je nejjednodušší a nejpoužívanější typ doteku, jelikož je možné jej použít ve většině operací. Jak již bylo zmíněno dříve, doteky mohou být vybaveny kuličkami z různých materiálů. [12]

¹ Skenováním je myšlen proces, kdy kulička klouže po povrchu na místo bodového dotyku, kde dochází ke kontaktu pouze na krátkou dobu.

² Při adhezivním otěru dochází k přenosu měkčího materiálu (obrobku) na tvrdší (dotek) a dochází k jeho ukládání na povrchu doteku. To vede ke vzniku chyby pro další měření. [28]



Obr. 8 Kulový dotek s dříkem [10]

Válcový dotyk, příklad viz obr. 9 se používá pouze v konkrétních situacích. Je vhodný především k měření otvorů v plechu, lisovaných dílců a tenkých obrobků. Další možnost použití je měření závitů a lokalizace středu závitových otvorů. [12]



Obr. 9 Válcový dotek během měřicí operace [10]

Diskový dotyk, viz obr. 10, tento dotyk je vytvořen z kuličky a používá se ke snímání zápichů a drážek v otvorech, kde není možné použít běžný kulový dotyk. [12]



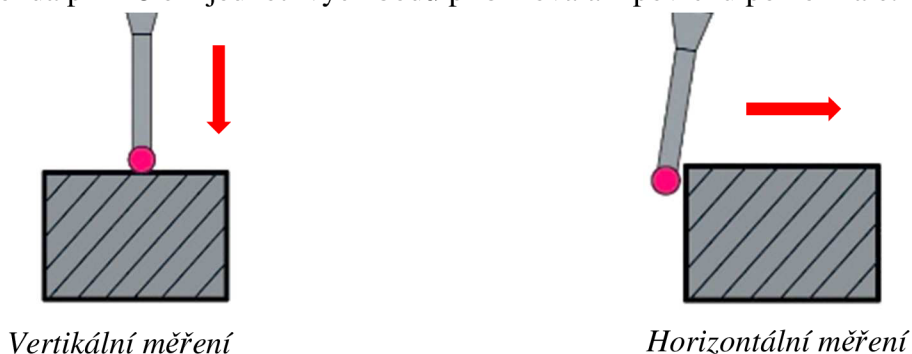
Obr. 10 Diskový dotyk během měřicí operace [10]

1.4 Měření pomocí obrobkové sondy

Obrobkové sondy se používají během celého procesu výroby. Své uplatnění mají při ustavování polotovaru a určování nulových bodů pro následující operace, během procesu obrábění, kdy je možné provádět průběžnou kontrolu rozměrů, tak ve finální části výroby, kdy lze pomocí obrobkové sondy diagnostikovat rozměry vyrobené součásti. [3] Všechny tyto procesy spočívají ve snímání bodů a jejich následným proložením úsečkou nebo křivkou. V následujících podkapitolách jsou popsány postupy, jak určit základní geometrické útvary.

1.4.1 Určení roviny

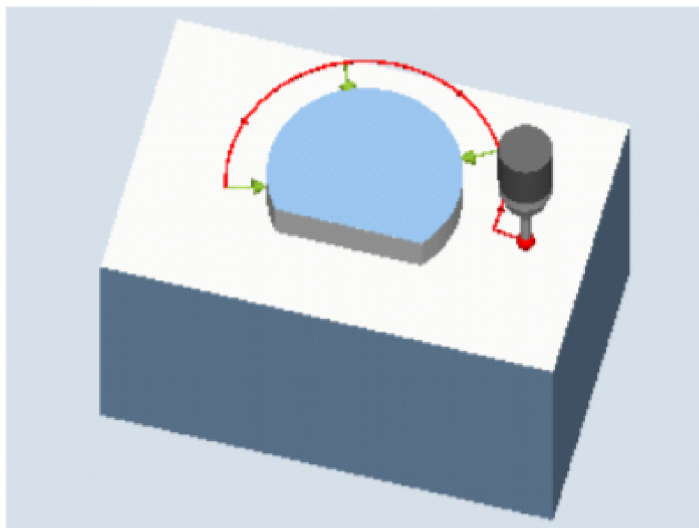
Pro určení roviny je potřeba změřit alespoň 3 body, které se nacházejí v této rovině. To je možné určit pomocí např. kulové sondy ve vertikálním nebo horizontálním směru, viz obr. 11. Důležité je, aby se sonda při měření jednotlivých bodů přibližovala k povrchu po normále.



Obr. 11 Měření bodu dotekovou sondou, převzato z [2], upraveno

1.4.2 Určení kruhových útvarů

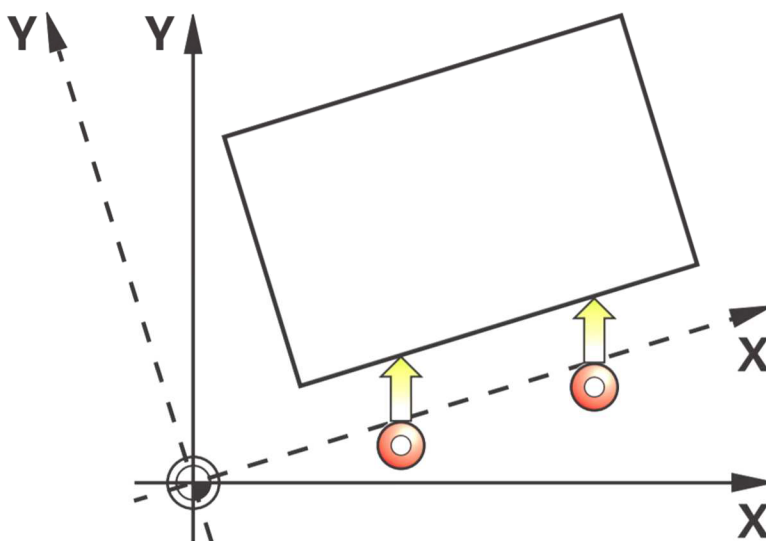
Pro určení rádiusu, resp. kruhových útvarů je potřeba změřit alespoň tři body, které leží na tomto útvaru v jedné rovině. Systém stroje následně tyto body proloží danou křivkou a může dopočítat i střed útvaru. Pro určení válcové plochy je potřeba přinejmenším ještě jeden bod navíc, který leží mimo rovinu zbylých bodů, [13] schématické znázornění viz obr. 12.



Obr. 12 Měření vnějšího kruhového segmentu [14]

1.4.3 Určení úhlu

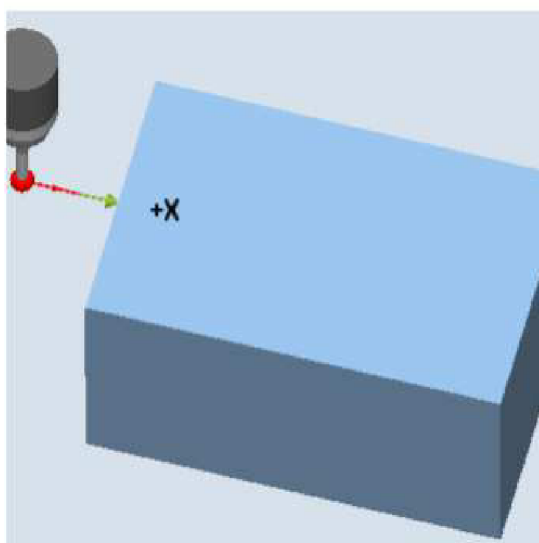
Určení úhlu je možné například použít při otáčení souřadného systému pro obrábění. K tomu je zapotřebí určit alespoň dva body, viz obr. 13



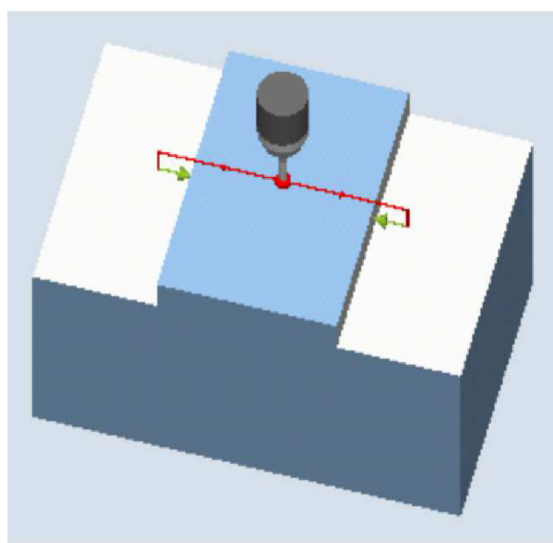
Obr. 13 Kompenzace šikmého ustavení obrobku na základě změření úhlu [3]

1.4.4 Příklady měřících cyklů

Měřící cykly jsou všeobecné podprogramy určené k řešení daných měřících úkonů, lze je pomocí parametrů přizpůsobit daným požadavkům. Pro účely měření délky etalonů byly použity konkrétně dva cykly SIEMENS a to cyklus 978 a cyklus 977. Cyklus 978 slouží ke zjišťování hrany, viz obr. 14. Pomocí něj je tedy možné určit polohy hran etalonu a následně vypočítat jeho délku, viz kapitola 6.2. [14] V případě cyklu 977 se jedná o nástroj pro měření díry, hřídele, drážky nebo žebra viz obr. 15. Na základě zvolené měřící osy a počátku měření systém určí dva body na protilehlých hranách a vypočte šířku žebra, v konkrétním případě délku etalonu. [14]



Obr. 14 Cyklus 978, určení hrany [14]



Obr. 15 Cyklus 977, určení délky útvaru [14]

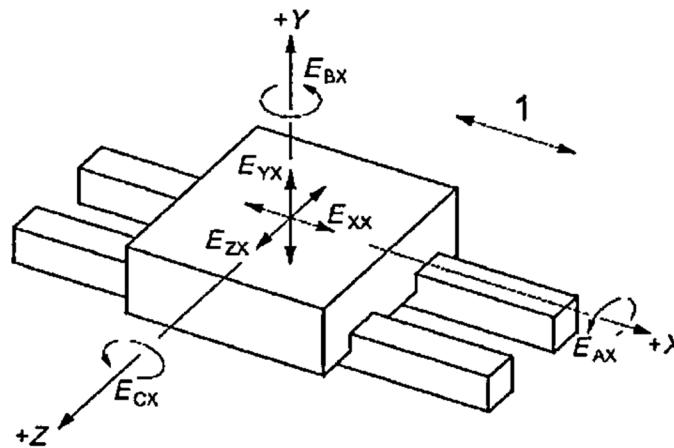
2 Geometrická přesnost stroje

Vzhledem k růstu průmyslové výroby rostou i nároky na parametry obráběných součástek, a tím i na samotné obráběcí stroje. Ve většině případů se jedná o požadavky na produktivitu a kvalitu práce. Největší vliv na tyto požadavky má mechanické ústrojí stroje. [15]

2.1 Geometrická přesnost vztahená k rozměru

S ohledem na normu ČSN ISO 230-1 má každá lineární osa 6 stupňů volnosti. Typický CNC obráběcí stroj se třemi osami tedy může mít až 21 geometrických chyb, viz obr. 16. Tyto chyby jsou:

- 3x3 chyby translační (lineární posuv)
- 3x3 chyby úhlové
- 3 chyby kolmosti mezi jednotlivými osami (X-Y, X-Z, Y-Z)



Obr. 16 Stupně volnosti lineární osy x, podle ISO 230-1 [15]

Popis jednotlivých chyb pro lineární osu X viz tabulka 2.1

Tabulka 2.1 Popis chyb pro lineární osu x [15]

E_{XX} – chyba polohování	E_{AX} – úhlová chyba naklopení kolem osy x
E_{XY} – chyba přímosti ve směru osy y	E_{BX} – úhlová chyba naklopení kolem osy y
E_{XZ} – chyba přímosti ve směru osy z	E_{CX} – úhlová chyba naklopení kolem osy z

2.2 Zdroje geometrických chyb

Přesnost výrobních strojů je ovlivněna různými faktory. V následujících bodech budou popsány hlavní zdroje chyb ovlivňující přesnost relativní polohy nástroje.

Kinematické chyby, jsou způsobeny nedokonalým tvarem funkčních součástí a jejich polohy vůči sobě. Časem může docházet k jejich opotřebení, a tím pádem ke změnám kinematických chyb.

Termomechanické chyby, během obrábění, je generováno určité množství tepla, které přímo ovlivňuje funkční části stroje. Také kolísání vnější teploty okolí má vliv na obráběcí stroj. Tyto změny teploty pak následně vedou k rozpínání a smršťování funkčních částí stroje.

Statické zatížení, je dalším zdrojem chyby. Není možné, aby byl stroj dokonale tuhý a vlivem statického zatížení od tíhy samotného stroje, popřípadě obrobku dochází k průhybům částí obráběcího stroje.

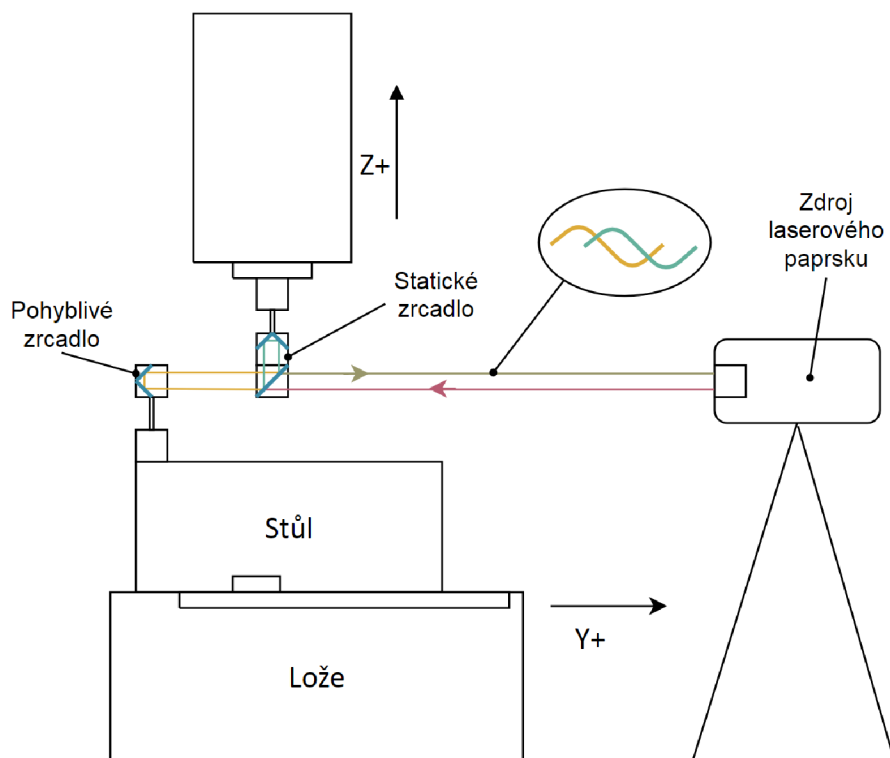
Dynamické zatížení, je generováno během obrábění od nástroje, ale mohou to být také síly způsobené zrychlením nebo zpomalením během posuvů, stejně tak jako vibrace generované během provozu. [16]

2.3 Zařízení pro měření geometrické přesnosti

Existuje celá řada měřících zařízení, s jejichž pomocí lze diagnostikovat geometrické chyby na obráběcím centru. Z naměřených dat je možné následně vypočítat kompenzační koeficienty, které napomáhají snižovat geometrické chyby. V následujících podkapitolách budou popsány přístroje, které byly použity pro diagnostiku obráběcího centra během pokusů.

2.3.1 Laser interferometr

Interferometrie je měřící metoda, která využívá interference světelných, rádiových nebo zvukových vln. Pro měření mechanického pohybu v přesném obrábění se používá interference světla. Použitím dvou světelných paprsků lze následně vytvořit interferenční obrazec. [17] Konfigurace systému zdroje laserového paprsku a soustavy zrcadel pro měření osy y, viz obr. 17.



Obr. 17 Konfigurace pro měření osy y

Pro samotné měření bylo použito zařízení firmy Renishaw, XL-80 s přesností lineárního měření $\pm 0,5$ ppm v kombinaci s jednotkou XC-80 (oba zařízení viz obr. 18) pro kompenzaci vlivu prostředí, jimiž jsou teplota, vlhkost a tlak okolního vzduchu a teplota samotného stroje. Parametry vzduchu v okolí mají totiž přímý vliv na vlnovou délku, a tudíž přímo ovlivňují přesnost měření.

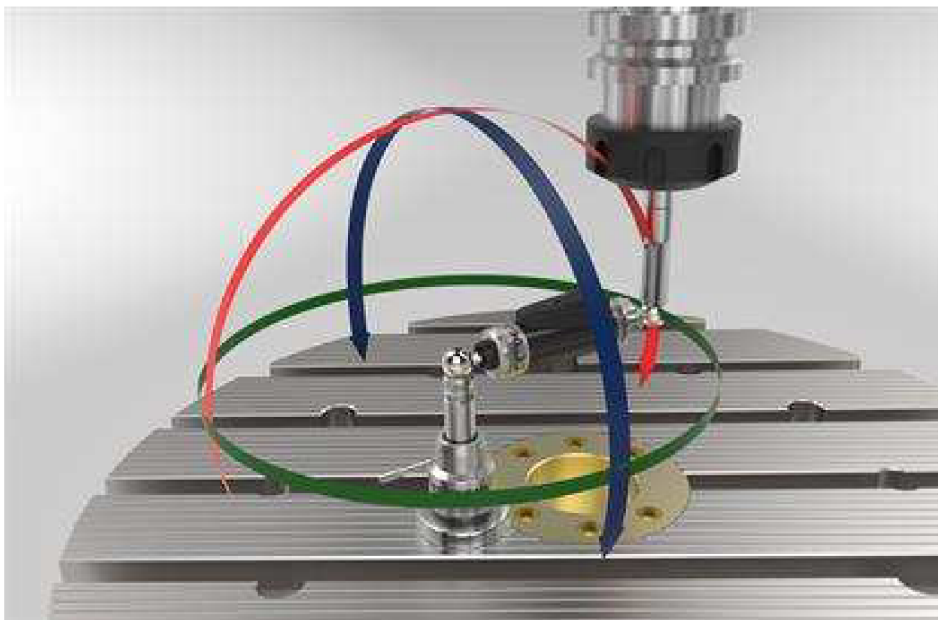


Obr. 18 Laser-interferometr XL-80 a kompenzační jednotka XC-80, společnosti Renishaw [18]

Data jsou následně zpracována pomocí softwaru CARTO. Jedná se o volně přístupný produkt firmy Renishaw. Tento program slouží k zobrazení naměřených hodnot a k určení kompenzačních hodnot podle zvolených norem, které je následně možné zadat do řídicího systému stroje.

2.3.2 QC20-W ballbar

Jedná se o měřicí zařízení pro diagnostikování kolmosti os obráběcího stroje od firmy Renishaw. Dva magnetické držáky slouží jako základny, jedna umístěná na vřetení stroje, druhá na pracovním stole. Mezi tyto základny je následně vložen lineární snímač, viz obr. 19.



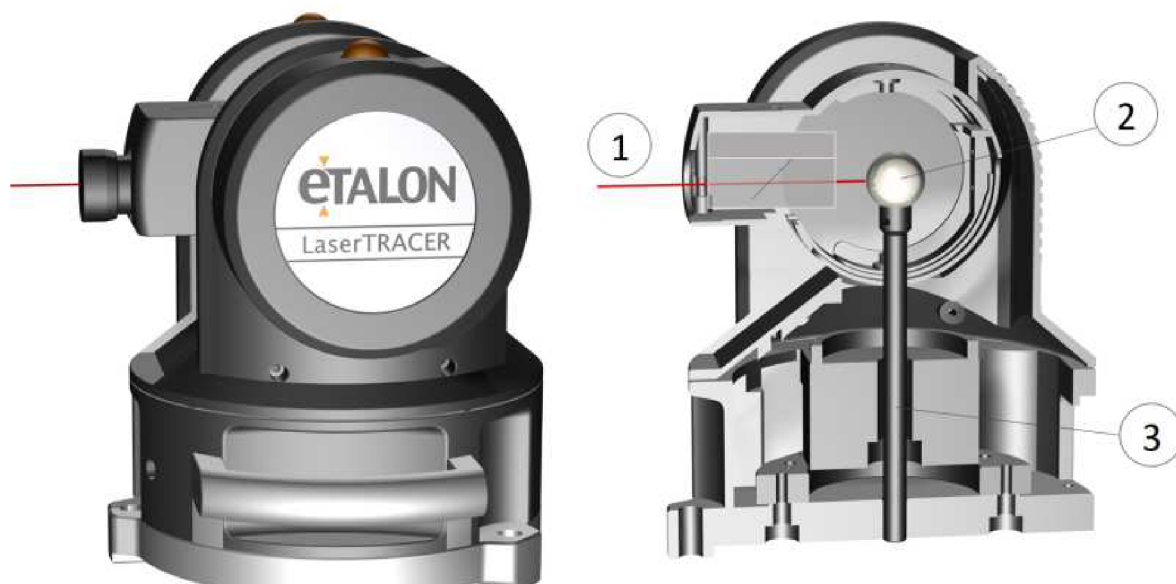
Obr. 19 Měřicí zařízení QC20-W ballbar [19]

Na základě kinematického uložení koulí v magnetických základnách, je možné pomocí ballbar měřit i malé změny poloměru naprogramované kruhové dráhy kolem základy umístěné na pracovním stole. [19]

Před započítím měření, protože je ballbar relativní měřidlo, je potřeba jej zkalibrovat. K tomu slouží přípravek nainstalovaný v pouzdře. Ten je vyroben ze speciálního materiálu s velmi nízkým koeficientem tepelné roztažnosti. Měření je následně zpracováno podle zvolené normy pomocí softwaru Ballbar 20.

2.3.3 LaserTRACER

Jedná se o zařízení, kterým je možné diagnostikovat volumetrickou přesnost stroje. Jedná se o vlastní laserovou hlavu (obr. 20), odražeče a další potřebný hardware. Zařízení funguje na bázi samonaváděcího interferometrického měření délky. Díky použité technologii prostorového odražeče s tvarovou odchylkou, sloužící jako referenční zrcadlo, je možné zachovat stabilitu sledovacího mechanismu a eliminovat tak chyby vedení v jednotlivých osách. Zařízení pracuje s rozlišovací přesností 1 nm. Laserový paprsek je kompenzovaný na základě okolní teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu. [20]



- (1) Měřící paprsek s nanometrovým rozlišením
- (2) Referenční kulička s chybou <math><50\text{nm}</math>
- (3) Materiál s nízkým tepelným koeficientem

Obr. 20 Měřící zařízení Laser Tracer, převzato z [20], upraveno

2.4 Kontrola přesnosti obráběcích strojů

Měření přesnosti obráběcích strojů může být provedeno různými způsoby za použití různých přípravků a zařízení s rozdílným nastavením. V této kapitole budou popsány způsoby měření, které byly použity během experimentů za použití výše zmíněné techniky. [15]

2.4.1 Přesnost polohování

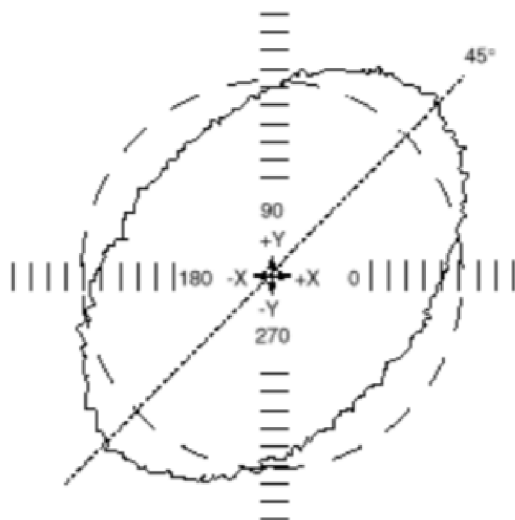
Jedná se o přesnost a opakovatelnost najetí do požadované souřadnice na lineární ose. Zkouška může být provedena například podle normy ČSN ISO 230-2 nebo VDI/DGQ 3441. V případě vertikál frézky s křížovým stolem je potřeba měření provádět tak, aby byl měřen relativní pohyb mezi vřetenem pro upnutí nástroje a stolem nesoucí obrobek ve směru pohybu měřené osy.

K měření může být použit laser interferometr, kdy se stroj polohuje na zadané souřadnice, přičemž pomocí externího zařízení je měřena skutečná poloha. Následně je možné z těchto hodnot vypočítat odchylku. Měření může být provedeno jednostranně, kdy nastavování polohy probíhá pouze ze stejné strany nebo oboustranně, kdy dochází k najíždění na požadovanou souřadnici z obou směrů. Celé měření je provedeno v nezátíženém stavu, ve vhodném tepelném prostředí. [15]

2.4.2 Přesnost kruhové interpolace

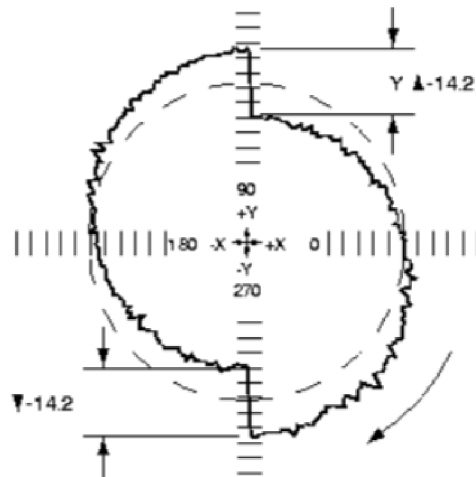
Měření a vyhodnocení přesnosti kruhové interpolace je popsáno například normou ČSN ISO 230-4. Měření slouží k vyhodnocení schopnosti stroje interpolovat kruhové dráhy o zadaném průměru, chyby pak způsobí, že se poloměr kruhu od naprogramovaného kruhu odchýlí. V případě vertikální frézky se tedy jedná o kombinaci pohybu dvou lineárních os. Může se zde projevit například chyba odměřování, přímosti, vůle, reverzační špičky. K získání dat, může sloužit například zařízení Double Ballbar. Naměřené data slouží k výpočtu celkové hodnoty přesnosti, konkrétně kruhovitost.

V případě geometrické odchylky, kdy se jedná například o kolmost os nebo přímost pohybu. V případě že mezi osami není úhel 90° změní se kruhová dráha na elipsu viz obr. 21.



Obr. 21 Chyba kolmosti os [21]

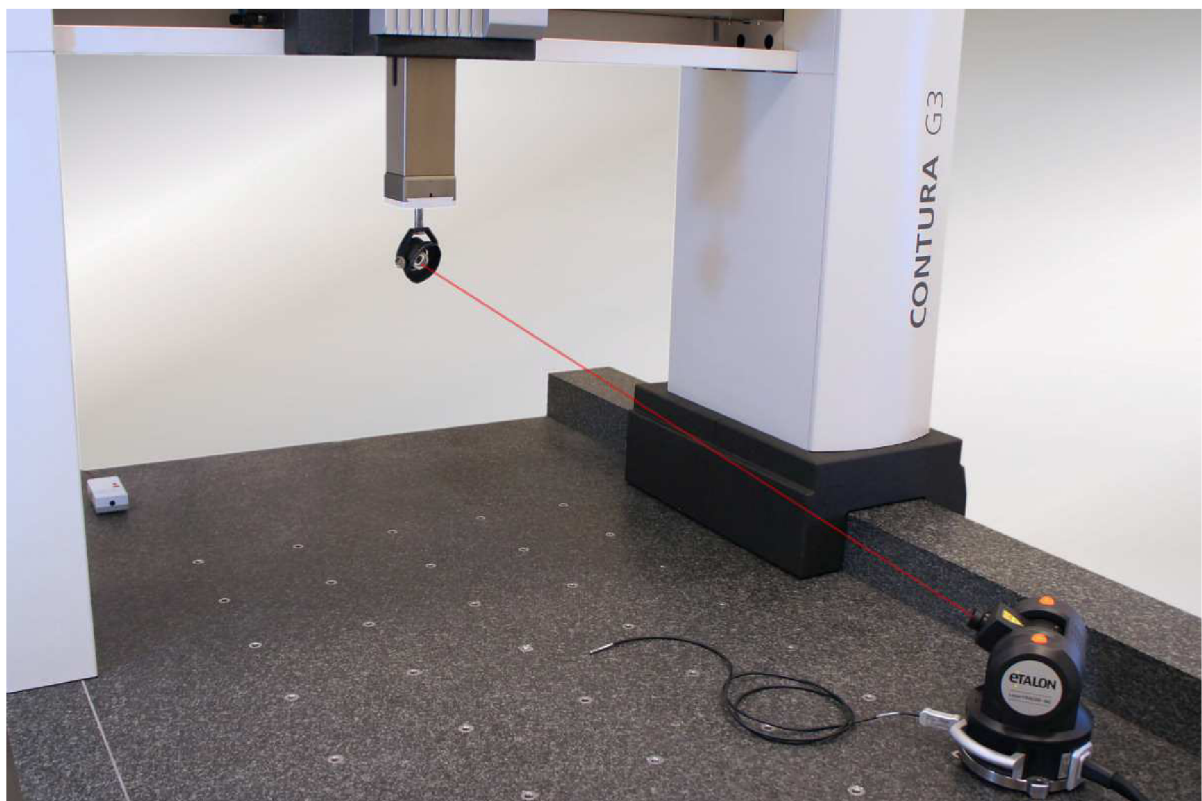
Podle tvaru kruhové dráhy je možné také získat informace o chování řízení a pohonů. Tím může být například axiální vůle neboli Backlash. Na kruhové dráze vzniknou skoky (obr. 22) v místech, kde dochází ke změně směru posuvu lineární osy. Backlash je způsoben vůlí v pohonu nebo vedení stroje.



Obr. 22 Axiální vůle – Backlash [21]

2.4.3 Volumetrická přesnost

Chyby pro volumetrickou přesnost jsou reprezentovány vektorovou mapou odchylek v pracovním prostoru. Tyto odchylky je možné měřit pomocí zařízení LaserTRACE (dále jen LTc). Princip měření je založen na multilateraci. V tomto případě je pozice objektu v prostoru určena ze čtyř naměřených délek, které byly pořízeny z definovaných poloh za pomoci laserového paprsku. LTc umístěný na pracovním stole stroje vysílá paprsek, který je nasměrován do odražeče, ten je umístěn ve vřetení stroje, a je odražen zpět do měřicího zařízení (obr. 23). [15]



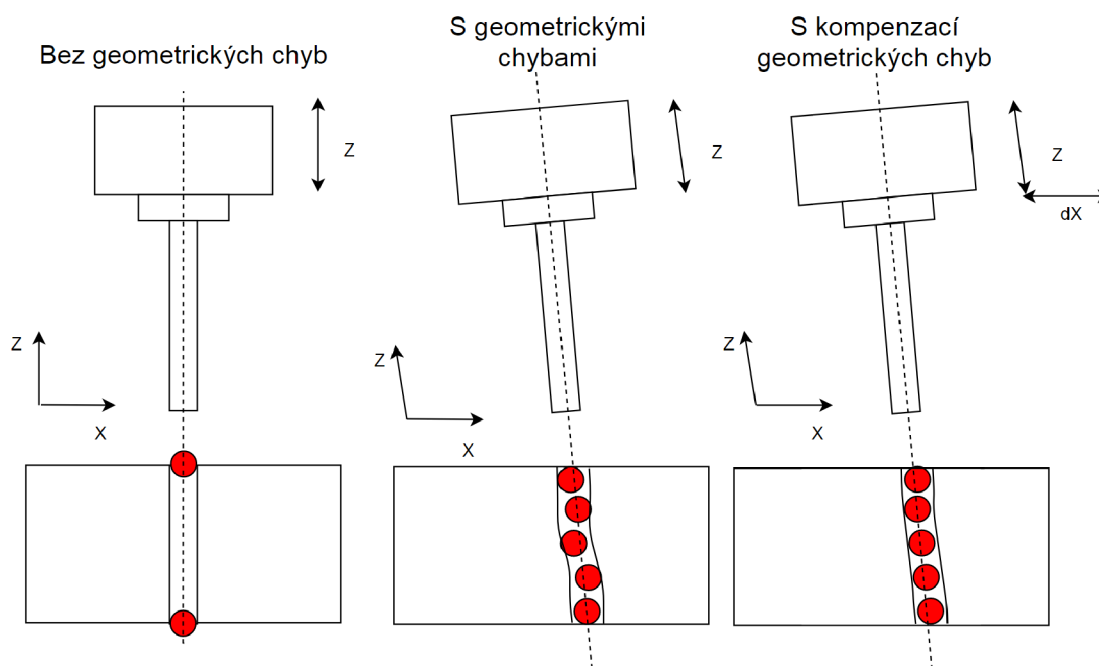
Obr. 23 Konfigurace pro měření volumetrické přesnosti pomocí LTc [22]

3 Kompenzace geometrické přesnosti

Naměřená data o geometrické přesnosti stroje nemusí sloužit pouze jako ukazatel stavu, v jakém se stroj nachází. Mohou být také použita k jeho zlepšení. Další možností, jak zvýšit kvalitu obrábění je za použití elektronické kompenzace, kterou je možno zadat do softwaru stroje. Ten je v dnešní době součástí většiny CNC obráběcích strojů. [15]

Kompenzace je proces, ve kterém se hlavně jedná o eliminaci kvazistatických chyb. Ty jsou tvořeny chybami geometrickými neboli kinematickými a statickými. Podle některých odhadů tvoří 60-70 % v případě 3osého centra z celkové přesnosti pracovního stroje. Chyby lze eliminovat hardwarově, přičemž je možné u stroje například vyrovnat lože nebo opravit vodící plochy. Další možností je eliminovat chyby pomocí softwaru. V tomto případě je možné kompenzovat nezávisle jednotlivé osy nebo je možné dělat volumetrickou kompenzaci, která kompenzuje chyby v daném prostoru. [23]

Příklad geometrické kompenzace viz obr. 24. V tomto případě se jedná o výrobu díry. V ideálním případě je vyrobena bez odchylek (z levo). Na prostředním obrázku jsou znázorněny geometrické chyby stroje a jak ovlivní finální podobu díry. Obrázek vpravo ukazuje možnosti kompenzace a tím zmírnění dopadu geometrických chyb. [15]



Obr. 24 Schématické znázornění obecného principu kompenzace, převzato z [15], upraveno

3.1 Dělení kompenzací

Kompenzace lze obecně rozdělit do dvou skupin, těmito skupinami jsou:

Kalibrace, která slouží k nastavení stroje.

Aktivní kompenzace, kde jsou odchylky sledovány během pracovního procesu. Řídící systém data průběžně vyhodnocuje a provádí kompenzace v reálném čase. Nejběžnějším případem jsou teplotní kompenzace. [23]

3.2 Základní typy kompenzací

S ohledem na stanovené cíle a vhodnosti použití existuje několik základních typů kompenzací. V následujících podkapitolách jsou popsány typy kompenzací, které jsou vhodné pro použití na malých vertikálních obráběcích centrech s třemi osami a jsou kompatibilní s verzí řídicího systému Siemens Sinumerik 840D sl 4.7.

3.2.1 Kompenzace přímočarosti

Kompenzace přímočarosti může být založená na datech získaných pomocí zařízení Laser interferometr a příslušné sady odrazecích prvků, viz kapitola 2.3.1. Na základě naměřených dat jsou vytvořeny kompenzační tabulky, které jsou zadány do řídicího systému stroje. Po zadání kompenzační tabulky je provedeno následně verifikační měření, které má za cíl ověření úspěšnosti kompenzace přímočarosti. [15]

3.2.2 Kompenzace chyby najetí do polohy

Potřebná data pro kompenzaci chyby najetí do polohy mohou být naměřena znovu pomocí zařízení Laser interferometr a příslušné sady odrazecích prvků, viz kapitola 2.3.1. Postup měření je pak popsán v kapitole 2.4.1. Postup kompenzace je podobný jako u kompenzace přímočarosti. Ze získaných dat se vygeneruje kompenzační tabulka, která se vloží do řídicího systému stroje. Po aktivaci kompenzací je opět provedeno verifikační měření. [15]

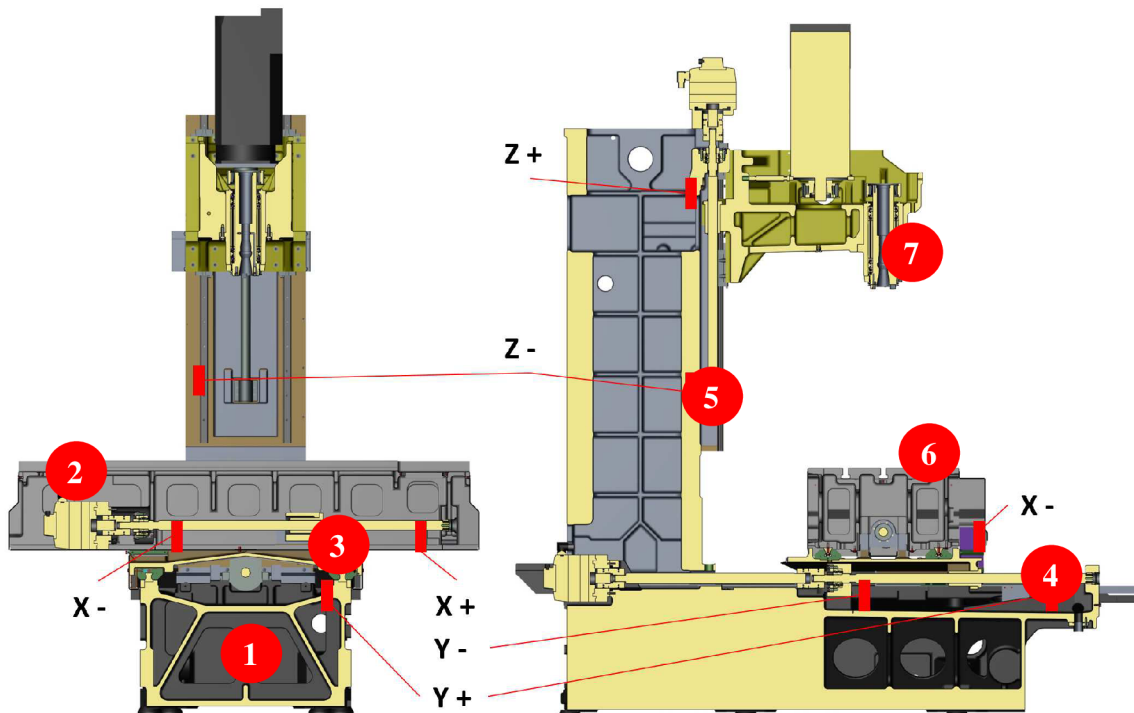
3.2.3 Volumetrická kompenzace

Jako měřicí zařízení může být použito zařízení LTc od firmy Etalon nebo víceosý laserový interferometr XM-60 od firmy RENISHAW. Použití zařízení LTc je popsáno v kapitole 2.3.3. Tímto způsobem je možné popsat u tříosého obráběcího stroje až 21 chybových parametrů. Výpočet kompenzační tabulky je závislý na volbě výpočtového modelu. Plný model FRB popisuje všech 21 chybových parametrů, redukovaný model RRB popisuje 17 chybových parametrů. V závislosti na počtu měřených chyb se odvíjí i doba měření geometrických chyb stroje. Z naměřených hodnot jsou následně vytvořeny kompenzační tabulky a opět následuje verifikační měření. Pro verifikaci může následně posloužit také zařízení Ballbar popsáno v kapitole 2.3.2. Jedná se totiž o časově nenáročné měření na rozdíl od použití zařízení Laser Tracer. [15]

4 Použitá technika k provedení experimentů

4.1 Demonstrátor

Experimenty byly provedeny na tříosé frézce MCV 754 QUICK od firmy Kovosvit Mas. Řada strojů MCV je postavena na nosném rámu ve tvaru C, viz obr. 25.



Obr. 25 Základní koncepce MCV 754 QUICK [2]

Technická data stroje, viz tabulka 4.1

Tabulka 4.1 Technická data MCV 754 QUICK [2]

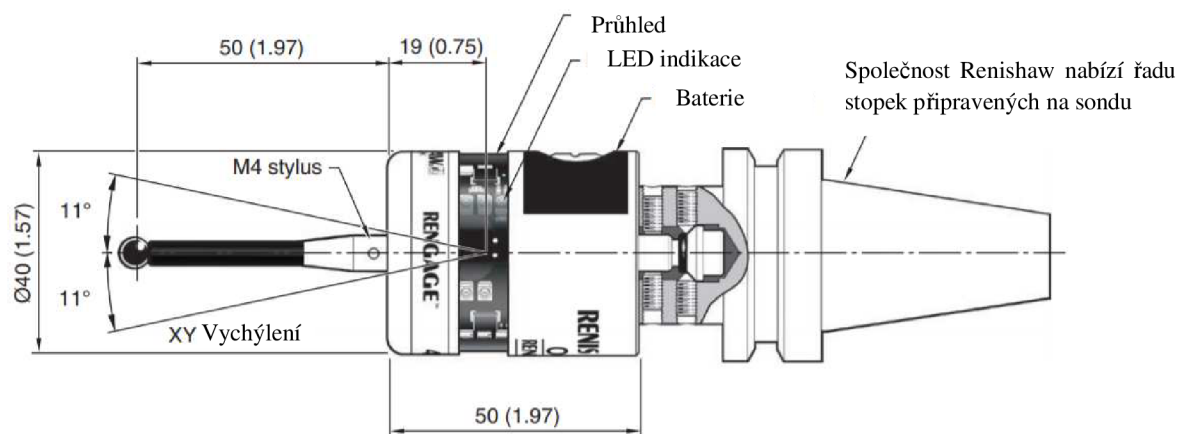
1. Lože stroje
2. Upínací plocha stolu 1 000×500
3. Lineární valivé vedení – osa X – zdvih 754 mm
4. Lineární valivé vedení – osa Y – zdvih 500 mm
5. Lineární valivé vedení – osa Z – zdvih 550 mm
6. Max. zatížení stolu - 400 kg
7. Vřeteník

4.2 Obrobková sonda

Pro všechny měřicí operace byla použita obrobková sonda Renishaw OMP400. Jedná se o kompaktní, vysoce přesnou dotykovou sondu. Sonda pracuje s technologií Rengade, která využívá křemíkových tenzometrů k dosažení co nejvyšší přesnosti. Data jsou následně opticky přenášena do řídicího systému stroje. [8] Rozměry sondy, viz obr. 26 a specifikace viz tabulka 4.2

Tabulka 4.2 Specifikace sondy Renishaw OMP400 [8]

Směry snímání	Všesměrové $\pm X$, $\pm Y$, $+Z$
Jedno směrová opakovatelnost $\pm X$, $\pm Y$, $+Z$	$\pm 0,25 \mu\text{m}$ 2 sigma – délka doteku 50 mm
2D deformace v osách X, Y	$\pm 0,25 \mu\text{m}$ 2 sigma – délka doteku 50 mm
Spínací síla doteku X, Y	00,06 N



Rozměry v mm (palcích)

Obr. 26 Obrobková sonda Renishaw OMP400 [8]

4.3 Johanssonovy měrky

Koncové měrky, také označovány jako Johanssonovy měrky, jsou ocelové hranoly o vysoké rozměrové přesnosti. V rámci experimentů byly použity koncové měrky (obr. 27) o délkách 125, 150, 200, 300, 400 a 500 mm s přesností v řadě 1, podle ISO 3650 viz tabulka 4.3.

Tabulka 4.3 Deviace rozměru pro Johanssonovy měrky podle ISO 3650 [24]

Nominální délka [mm]	Deviace rozměru v [μm]	Odchylka [μm]	Kalibrovaná délka etalonu [mm]
125	0.18	+0,47	125,00047
150	0.2	+0,69	150,00069
200	0.25	+1,95	200,00195
300	0.35	+2,24	300,00224
400	0.45	-0,92	399,99908
500	0.5	+2,56	500,00256



Obr. 27 Johanssonovy měrky uložené v dřevěném boxu

4.4 Digitální libela

Jedná se o přesné měřicí zařízení s digitálním měřením úhlu. Konkrétně bylo použito zařízení BlueLEVEL od firmy Wyler, viz obr. 28.



Obr. 28 Digitální libela BlueLEVEL od firmy Wyler [25]

Technické parametry viz tabulka 4.4. S tímto zařízením lze měřit například přímost, rovnoběžnost nebo rovinnost obráběcího stroje. Na stroji MCV 754 QUICK byl pomocí tohoto zařízení měřen průhyb křížového stolu v ose x.

Tabulka 4.4 Technické parametry digitální libely BlueLEVEL od firmy Wyler [25]

<i>Citlivost</i>	<i>1 $\mu\text{m}/\text{m}$ nebo 5 $\mu\text{m}/\text{m}$</i>
<i>Měřicí rozsah</i>	<i>$\pm 20 \text{ mm}/\text{m}$ nebo $\pm 100 \text{ mm}/\text{m}$</i>
<i>Rychlost odezvy</i>	<i>5 sekund</i>
<i>Hmotnost zařízení</i>	<i>1200 g</i>

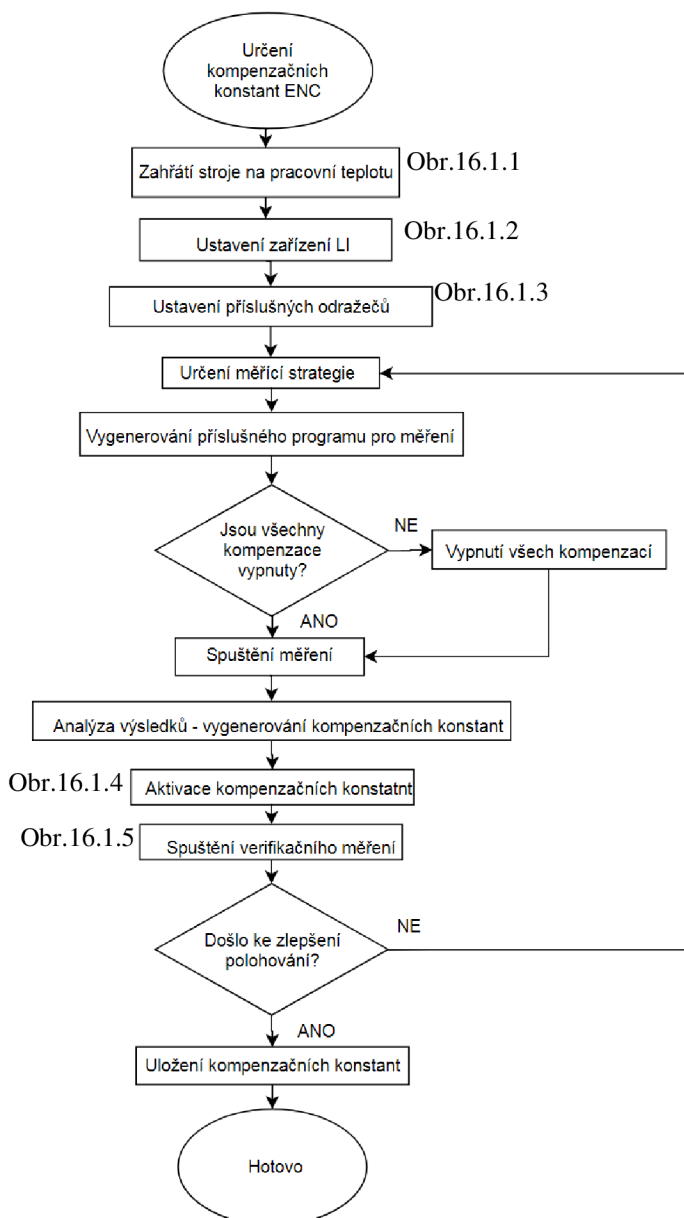
5 Návrh postupu měření

V této kapitole jsou popsány postupy použité k určení jednotlivých kompenzací, stejně tak postup měření celého experimentu. Vzhledem k dostupnosti vybavení, budou pro celý experiment využívány 3 druhy kompenzací, jejichž vliv bude následně možné porovnat s daty naměřenými na stroji bez jakýchkoliv kompenzací.

5.1 Určení kompenzačních konstant

5.1.1 Kompenzace polohy

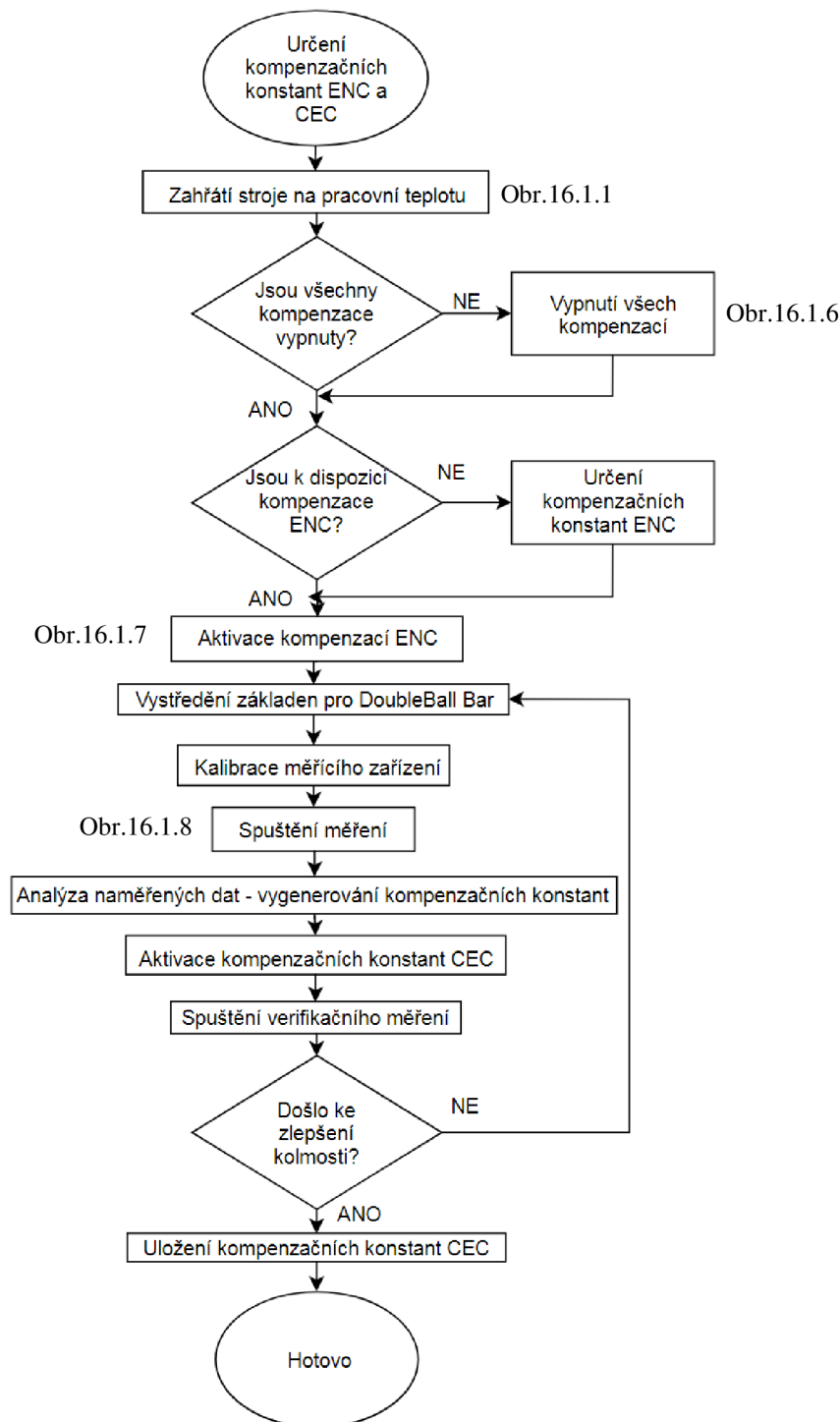
Na obr. 29 je diagram postupu určení kompenzačních konstant polohy, zkráceně se jedná o parametr ENC. Diagram obsahuje odkazy na doplňující fotografie dostupné v přílohách.



Obr. 29 Diagram určení kompenzace polohy

5.1.2 Kompenzace kolmosti a polohy

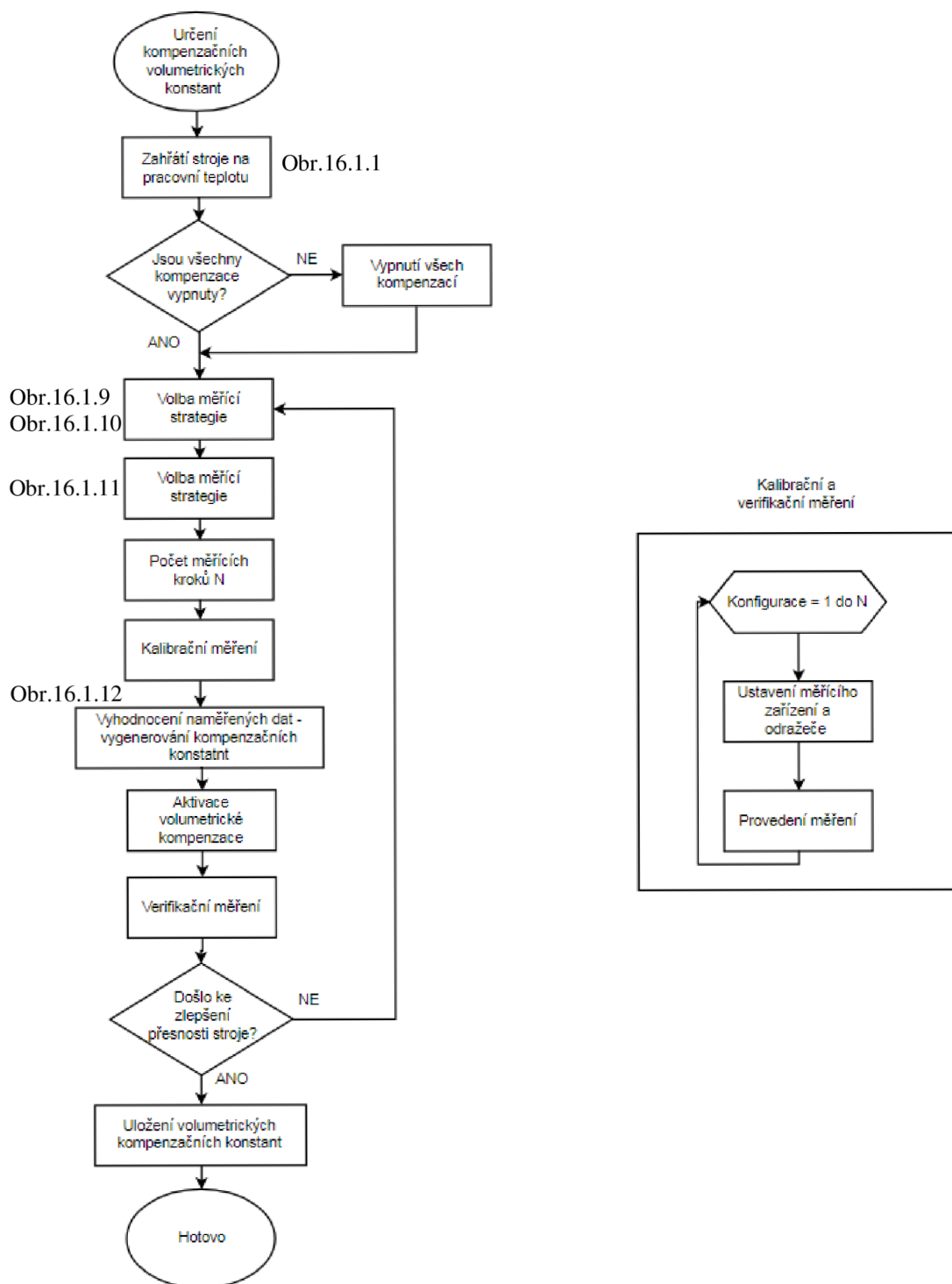
Na obr. 30 je diagram postupu určení kompenzačních konstant kolmosti, zkráceně se jedná o parametr CEC v návaznosti na určení kompenzace polohy. Diagram obsahuje odkazy na doplňující fotografie dostupné v přílohách.



Obr. 30 Diagram určení kompenzace kolmosti a polohy

5.1.3 Volumetrická kompenzace

Pro případ volumetrické kompenzace je postup znázorněn v diagramu na obr. 31. Diagram obsahuje odkazy na doplňující fotografie dostupné v přílohách.



Obr. 31 Diagram určení volumetrických kompenzací

5.2 Strategie měření

Cílem měření bylo určit, v jaké toleranci je stroj schopný měřit, popřípadě jaký vliv na danou toleranci mají jednotlivé elektronické kompenzace. Konečné měření probíhalo pouze v jedné

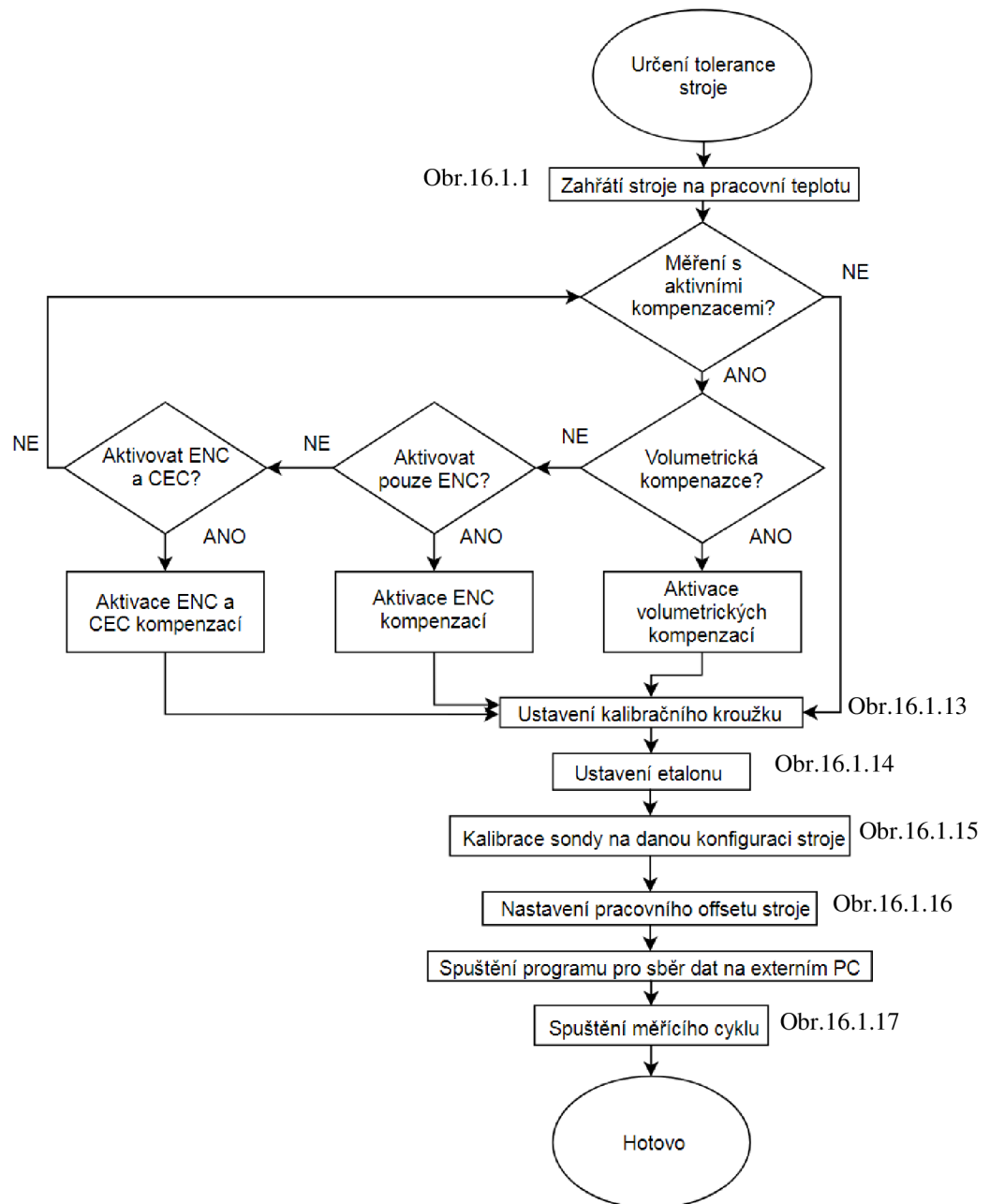
ose. Možné osy byly x a y, jelikož zde bylo možné provést kompenzaci polohy pomocí příslušného zařízení, stejně tak zde lze provádět měření etalonu vzhledem ke konstrukci stroje a použité obrobkové sondě. Úvodem bylo provedeno průzkumné měření, které mělo za cíl ukázat, jaké geometrické chyby do měření vstupují, zda jsou konstantní a mohou ovlivnit hlavní měření.

Na základě získaných dat z úvodního měření pak byla zvolena osa, ve které bylo provedeno hlavní měření. Hlavní měření se skládalo z několika konfigurací stroje ve dvou různých výškách osy Z, viz tabulka 5.1.

Tabulka 5.1 Konfigurace jednotlivých měření

<i>Konfigurace stroje</i>	<i>Výška v ose Z od stolu</i>	
	<i>Z = 55 mm</i>	<i>Z = 195 mm</i>
<i>Bez kompenzací</i>	X	X
<i>Kompenzace ENC</i>	X	X
<i>Kompenzace ENC + CEC</i>	X	X
<i>Volumetrická kompenzace</i>	X	X

Jednotlivé konfigurace stroje byly voleny na základě dostupného vybavení. Bylo by však možné měřit například pouze s aktivní kompenzací kolmosti CEC, nicméně se předpokládalo, že samotná kompenzace kolmosti nemá pro daný typ měření vliv. Rozdílné výšky v ose z jsou voleny, aby bylo možné posoudit závislost měření na výšce, zda dochází k signifikantním změnám či nikoliv. Na obr. 32 je diagram postupu měření pro jednotlivé nastavení stroje. Diagram obsahuje odkazy na doplňující fotografie přiložené v příloze. Pro vyhodnocení byla zvolena norma VDA 5 především z důvodu její jednoduchého a snadného použití. Zároveň se zde počítá i s teorií nejistot měření. Norma VDA 5 uvádí minimální počet 25 rozměrů, pro určení tolerance měření. Celkově bylo měřeno 30 rozměrů pro každý případ, tento počet byl zvolen v závislosti na možné ztrátě některých dat vlivem jejich přenosu na externí zařízení pomocí interní wifi sítě.



Obr. 32 Diagram postupu měření

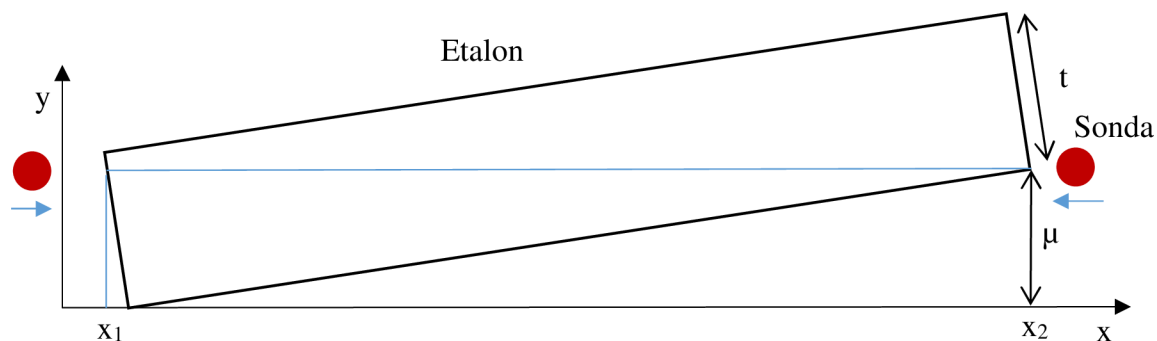
6 Zpracování naměřených dat

Měření je provedeno pomocí jednotlivých etalonů, jimiž jsou Johanssonovy měřky. Ty jsou uchyceny ke stolu stroje pomocí magnetických držáků. Pro účely měření je etalon srovnán pomocí úchylkoměru připevněného k vřetení stroje. Etalon má však kalibrované pouze čela, která jsou přesně broušena a jsou vůči sobě paralelní. Zbylé čtyři podélné strany nejsou jasné geometricky definované. Z toho důvodu není možné ustavit etalon bez chyby.

6.1 Chyba měření

Vliv chyby měření se projeví na nepřesnosti v naměřené délce, jelikož z důvodu nepřesného ustavení etalonu dochází k jeho pootočení v jedné nebo více pracovních rovinách, což má za následek vznik chyby při měření. V této kapitole jsou tedy popsány a odvozeny vztahy vzniku chyby z důvodu špatného srovnání a chyby přenesené sondou. Během měření je poloměr kuličky použitý na sondě považován za dokonalý, stejně tak jako geometrické rozměry etalonu. Posledním předpokladem je, že při měření délky v jedné ose nedochází ke změně polohy v ostatních osách během samotného měření.

Srovnání etalonu s chybou je možné vidět na obr. 33. Naměřené body jsou reprezentovány body x_1 a x_2 . V případě výpočtu délky pomocí dvou bodů se jedná o rozdíl souřadnic těchto bodů. Je patrné, že vzdálenost bodů x_1 a x_2 závisí právě na natočení etalonu, přičemž délka bude chybně narůstat, a to v intervalu chyby ustavení μ , přičemž $\mu = (0, t)$, kde t reprezentuje výšku etalonu.

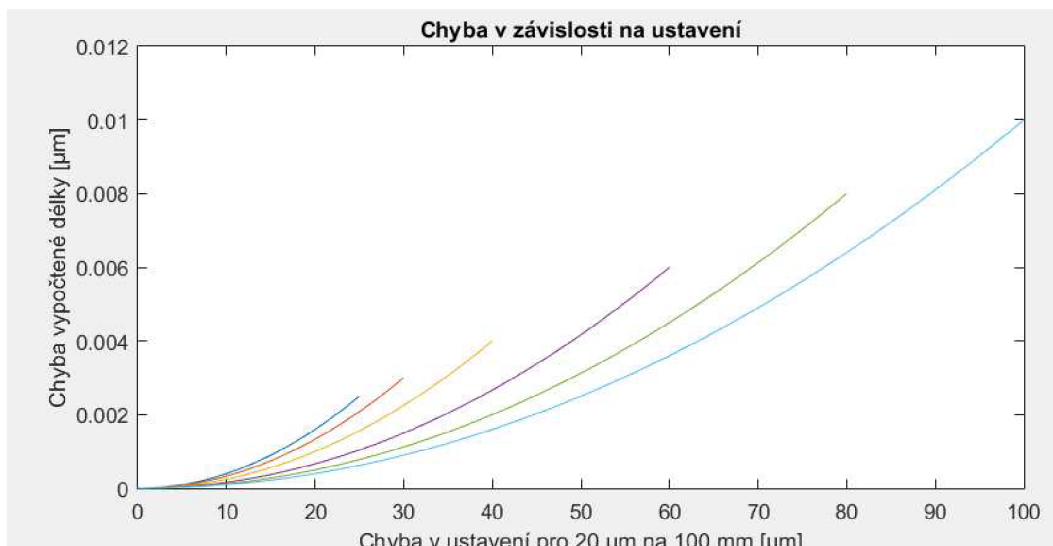


Obr. 33 Chyba vzniklá nepřesným ustavením etalonu, pro osu x

Závislost chyby prvního stupně ustavení je odvozena v rovnici 1.

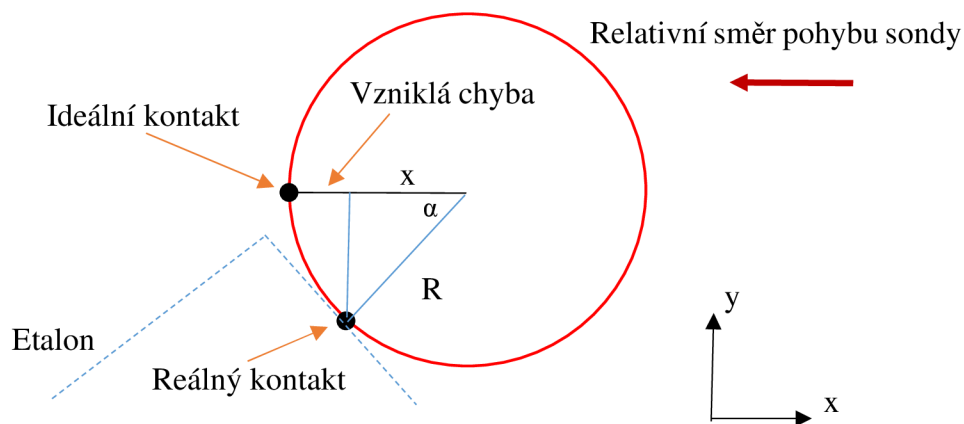
$$\text{Chyba1} = x_2 - x_1 - L = \sqrt{L^2 - \mu^2} + \frac{\mu^2}{\sqrt{L^2 - \mu^2}} - L \quad 1$$

Kde L je délka použitého etalonu a μ je odchylka od ideálního ustavení. Maximální chyba byla zvolena 20 μm na délce 100 mm. Následně byl použit program Matlab a skript 12.3.1 k vykreslení průběhu celé funkce pro délky etalonů $L=125, 150, 200, 300, 400, 500$ mm, viz obr. 34.



Obr. 34 Vykreslení funkce závislosti prodloužení etalonu na chybě ustavení

V případě chyby přenesené sondou se v hlavní míře opět projevuje nepřesné ustavení etalonu. Aby bylo měření co nejpřesnější, musí se bod kontaktu kuličky s etalonem a střed kuličky sondy nacházet v ose ve, které probíhá měření. V případě natočení etalonu pak vzniká chyba, viz Obr. 35.



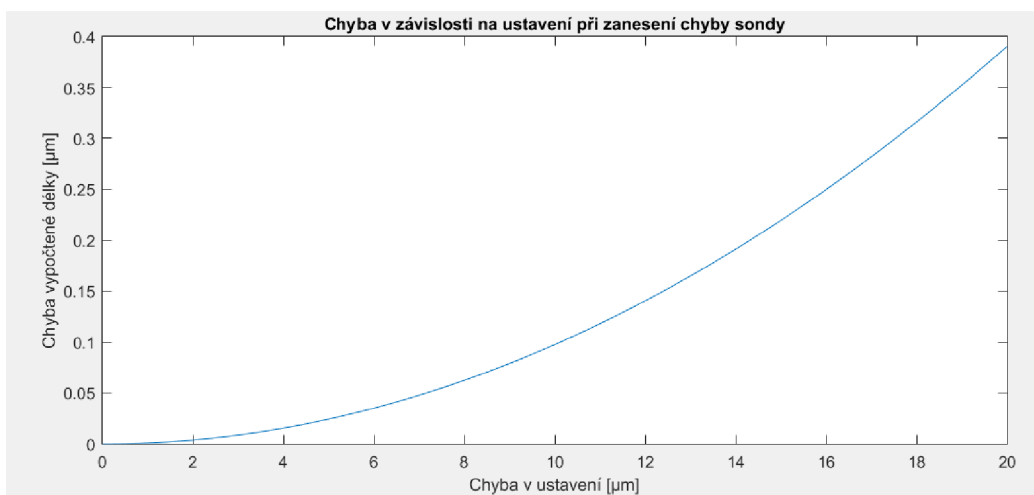
Obr. 35 Ukázka vzniku chyby přenesené sondou, pro osu x

Závislost této chyby druhého stupně na úhlu natočení α je zohledněna v rovnici 2,

$$Chyba_2 = R - x = R - \cos(\alpha) \cdot R \quad 2$$

přičemž α v tomto případě $\sin(\alpha) = \frac{\mu}{L_{Etalon}}$.

Při zachování maximální předpokládané chyby ustavení $20 \mu\text{m}$ na 100mm , je pro různé délky etalonu úhel α stejný, to znamená, že vzniklá chyba není závislá na délce měřeného etalonu. Průběh této funkce viz obr. 36.



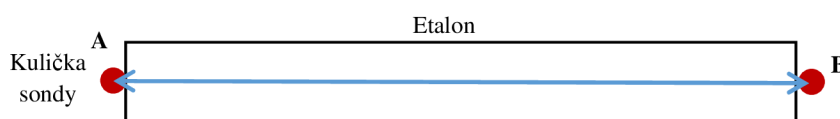
Obr. 36 Vykreslení funkce závislosti chyby přenesené sondou

6.2 Určení délky etalonu

Naměřené hodnoty jsou ze stroje obdrženy formou textového souboru s polohou dotyku sondy s etalonem, se souřadnicemi x , y , z , v případě použití cyklu 978. Prvním krokem je určení vektoru naměřených délek. Možnosti mohou být následující:

Metoda vzdálenosti dvou bodů

V případě osy x se od sebe odečtou pouze souřadnice jedné z os a vytvoří se vektor délek, viz obr. 37 a rovnice 3. [13]

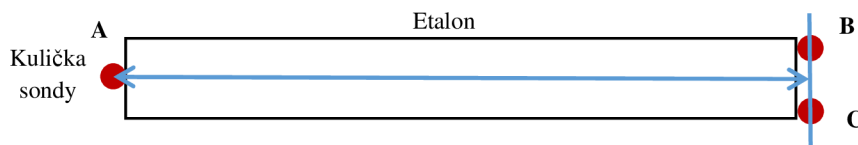


Obr. 37 Metoda vzdálenosti pomocí dvou bodů

$$L_{BB} = B_x - A_x \quad 3$$

Metoda vzdálenosti bodu a přímky

Použití této metody nese teoreticky výhodu v tom, že kompenzuje nepřesné ustavení etalonu v jedné z pracovních rovin, viz obr. 38 a vytvoří se vektor délek, podle rovnice 4. [13]



Obr. 38 Metoda vzdálenosti pomocí bodu a přímky

$$L_{BP} = \frac{|N_1 \cdot A_x + N_2 \cdot A_y + N_3|}{\sqrt{N_1^2 + N_2^2}} \quad 4$$

kde N je matice koeficientů obecné rovnice přímky pro body B a C . Pro její určení je potřeba nejdříve vyjádřit směrový vektor U , podle rovnice 5.

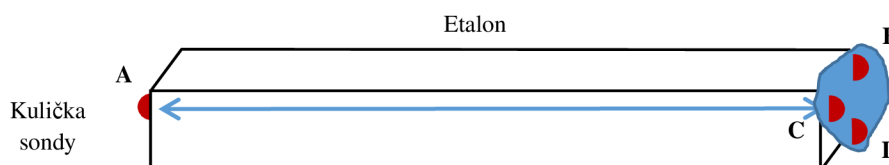
$$U = C - B \quad 5$$

Ze směrového vektoru se určí normálový vektor. To se provede tak, že u směrového vektoru přehodíme obě souřadnice a u jedné změním znaménko. Takto máme parametry N_1 a N_2 . Hodnota N_3 se vypočítá pomocí rovnice 6.

$$N_3 = -N_1 \cdot B_x - N_2 \cdot B_y \quad 6$$

Metoda vzdálenosti bodu a roviny

Tato metoda, na rozdíl od předchozí teoreticky kompenzuje nepřesné ustavení etalonu ve dvou pracovních rovinách, viz obr. 39. Ze tří naměřených bodů na jedné straně se vytvoří rovina, ke které se dopočítá vektor délek k bodu na druhé straně. [13]



Obr. 39 Metoda vzdálenosti pomocí bodu a roviny

$$L_{BR} = \frac{|M_1 \cdot A_x + M_2 \cdot A_y + M_3 \cdot A_z + M_3|}{\sqrt{M_1^2 + M_2^2 + M_3^2}} \quad 7$$

kde M je matice koeficientů obecné rovnice roviny pro body B , C a D . Pro určení matice je potřeba nejdříve vyjádřit vektory roviny BC a BD

$$\begin{aligned} BC &= C - B \\ BD &= D - B \end{aligned} \quad 8$$

Následně se pomocí vektorového součinu vypočítá normálový vektor pro danou kombinaci bodů.

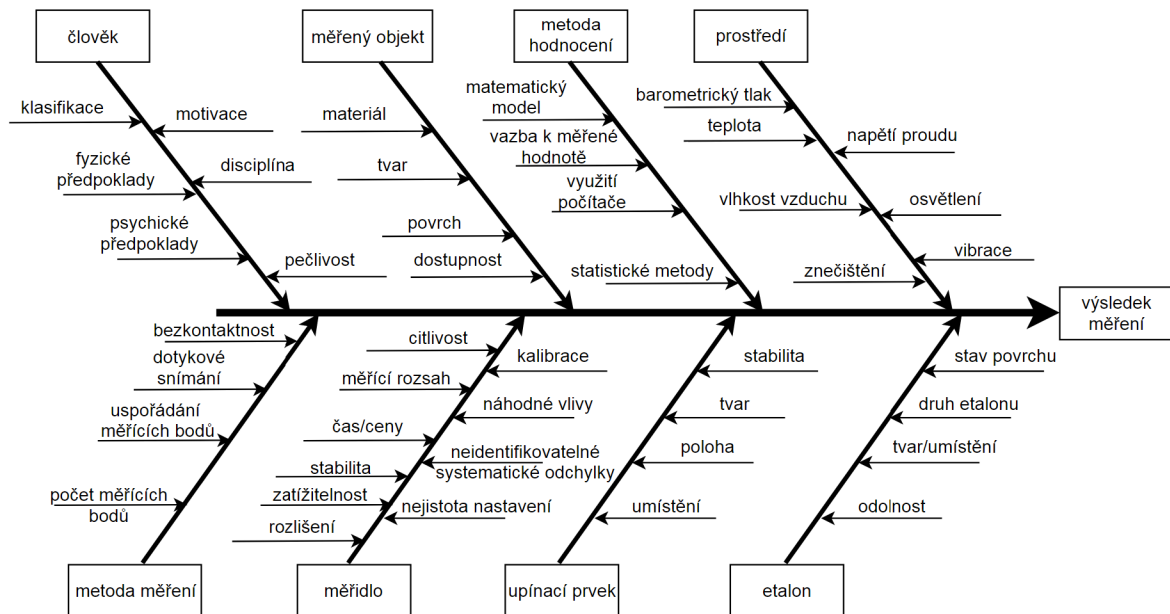
$$M = BC \times BD \quad 9$$

V tomto případě je takto možné vypočítat hodnoty M_1 , M_2 a M_3 . Hodnota M_4 se vypočítá pomocí následující rovnice:

$$M_4 = -M_1 \cdot B_x - M_2 \cdot B_y - M_3 \cdot B_z \quad 10$$

6.3 Určení tolerance měření

Celý proces měření je ovlivněn širokým spektrem možných chyb, viz obr. 40, v návaznosti na naměřené data a kalibrovanou délku etalonu lze určit, v jakých tolerancích je možné na daném stroji, (popřípadě dané ose) měřit.



Obr. 40 Důležité vlivy na nejistotu výsledků měření, převzato z [26], upraveno

Postup pro určení této tolerance je následující. Po určení vektoru délek je potřeba vypočítat směrodatnou odchylku opakovatelnosti s_g viz rovnice 11.

$$s_g = \sqrt{\frac{1}{K-1} \cdot \sum_{i=1}^K (L_i - \bar{x}_g)^2} \quad 11$$

Kde K je počet naměřených délek, L_i naměřená délka i -tého členu vektoru délek a \bar{x}_g je aritmetický průměr naměřených délek.

Dalším krokem je výpočet tolerance pro měřicí systémy T_{c_g} rovnice 12, za použití koeficientu $c_g \geq 1,33$ a $T_{c_{gk}}$ rovnice 13, při použití koeficientu $c_{gk} \geq 1,33$. [26]

$$T_{c_g} = \frac{c_g \cdot 4 \cdot s_g}{0,2} \quad 12$$

$$T_{c_{gk}} = \frac{c_{gk} \cdot 3 \cdot s_g + |\bar{x}_g - x_e|}{0,1} \quad 13$$

V obou případech byl koeficient zvolen 1,33, tak aby výsledná tolerance byla co nejmenší. Hodnota x_e je referenční délka měřeného etalonu. Pro výpočet samotné tolerance měření byla použita tolerance měřicího systému s vyšší hodnotou.

Je potřeba vypočítat kombinovanou nejistotu, ta se počítá za použití nejistoty kalibrace, rovnice 14.

$$u_{cal} = \frac{U_{CAL}}{k_{CAL}} \quad 14$$

Kde U_{CAL} je nejistota kalibrace a pro tento případ je zvolena jako $U_{CAL} = 0,0008$ a $k_{CAL} = 2$ [26]. Další složkou nejistoty je opakovatelnost u_{EVR} , ta se rovná směrodatné odchylce viz rovnice 15.

$$u_{EVR} = s_g = \sqrt{\frac{1}{K-1} \cdot \sum_{i=1}^K (L_i - \bar{x}_g)^2} \quad 15$$

Následně je potřeba určit rozlišení u_{RE} , pomocí rovnice 16, RE je rozlišovací schopnost stroje, vychází z vlastností daného měřicího zařízení.

$$u_{RE} = \frac{0,5 \cdot RE}{\sqrt{3}} \quad 16$$

Poslední potřebnou složkou je nejistota vychýlení u_{BI} , ta se počítá podle rovnice 17.

$$u_{BI} = \frac{|\bar{x}_g - x_e|}{\sqrt{3}} \quad 17$$

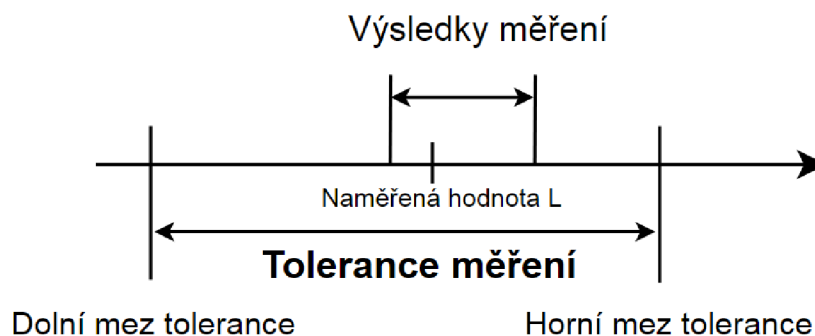
Z těchto koeficientů se následně vypočítá pomocí rovnice 18, kombinovaná nejistota měřicího systému u_{MS} , kterou je po rozšíření možné použít pro výpočet tolerance měření.

$$u_{MS} = \sqrt{u_{cal}^2 + \max\{u_{EVR}^2; u_{RE}^2\} + u_{BI}^2} \quad 18$$

Finální toleranci měření je možné vypočítat pomocí rovnice 19

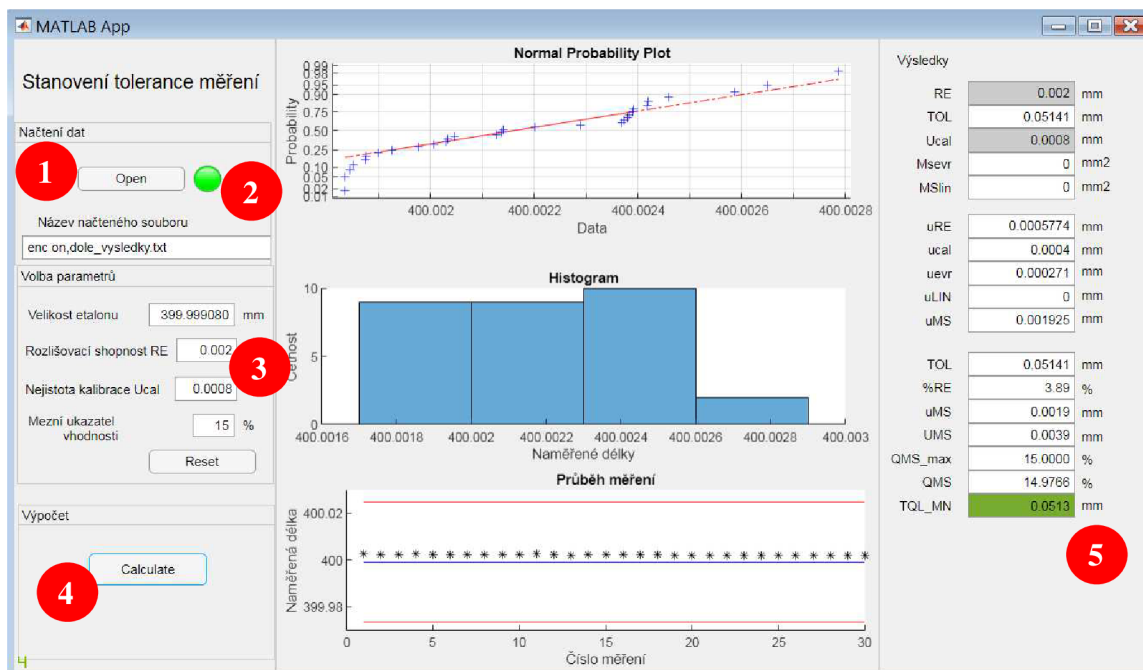
$$TOL_{min} = \frac{4 \cdot u_{MS}}{Q_{MS_{max}}} \quad 19$$

Kde $Q_{MS_{max}}$ je mezní hodnota ukazatele vhodnosti a je zvolena jako 15 %. Je potřeba zmínit, že výsledná tolerance udává celkovou velikost tolerančního pole, viz Obr. 41.



Obr. 41 Zobrazení intervalu tolerance měření, převzato z [26], upraveno

K výpočtu tolerančních polí pro jednotlivé konfigurace stroje byla vytvořena v rámci zpracování diplomové práce aplikace v prostředí Matlab, která umožňuje rychlý výpočet tolerance a dalších parametrů, viz obr. 42 a tabulka 6.1 kde je stručný popis aplikace. Aplikace byla dále využita pro zpracování výpočtu tolerance měření viz kapitola 7 a je přiložena v příloze.

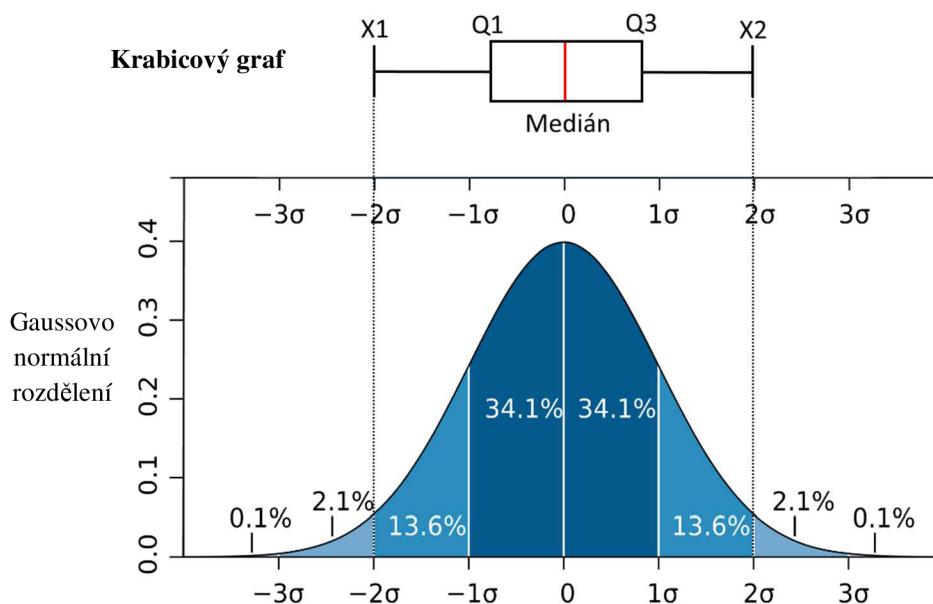


Obr. 42 Uživatelské rozhraní aplikace pro určování tolerance měření
 Tabulka 6.1 Vysvětlivky k Obr. 42

1. Načtení dat, otevře prohlížeč pro výběr textového souboru s naměřenými délkami
2. Kontrolka, zda uživatel zvolil textový soubor
3. Volba parametrů, kalibrovaná délka etalonu a dalších
4. Spuštění výpočtu
5. Výsledná tolerance měření s dalšími daty

6.4 Prezentace naměřených hodnot

Pro zobrazení jednotlivých vypočtených délek z naměřených bodů je vytvořen krabicový graf. Příklad je zobrazen na obr. 43 v horní části. Tento diagram je nyní ještě doplněn o diagram normálního (Gaussova) rozdělení, pro lepší zřetelnost, co znamenají jednotlivé hodnoty.



Obr. 43 Objasnění hodnot krabicového grafu

Krabicový diagram je standardizovaná metoda, jak zobrazit soubor hodnot ve více číselném zhodnocení.

- Medián reprezentuje střední získanou hodnotu.
- Q1 (25. percentil) reprezentuje hodnotu prvního kvartilu, jedná se o medián spodní poloviny získaných hodnot.
- Q3 (75. percentil) reprezentuje hodnotu třetího kvartilu, jedná se o medián horní poloviny získaných hodnot.
- X1 a X2 znázorňuje zvolený interval, který vychází právě z intervalu mezi kvartily Q1 a Q3

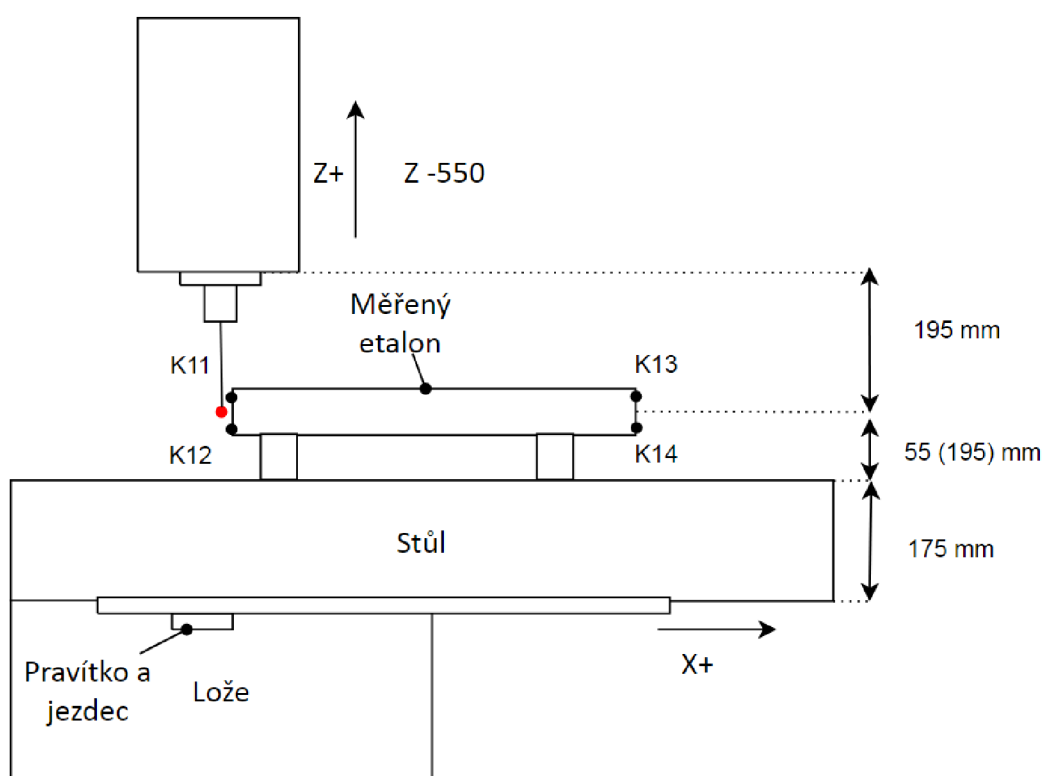
Velikost intervalu X1 až X2 byla pro tento případ volena podle pravidla 2σ , přibližně 95,45 %. Tato hodnota vychází z Gaussova normálního rozdělení. Toto bylo zvoleno na základě častého použití právě pro tyto účely. [26]

7 Měření na stroji MCV QUICK 754

V této kapitole jsou popsány jednotlivé iterace měření, které byly provedeny v rámci zkoušek na stroji MCV QUICK 754 za pomoci dříve zmíněných přípravků a za účelem ověření výše uvedených cílů. Toto bylo provedeno z důvodu potřeby vyšetřit a popsat závislosti polohování stroje během měřicího procesu.

7.1 Měření v ose x

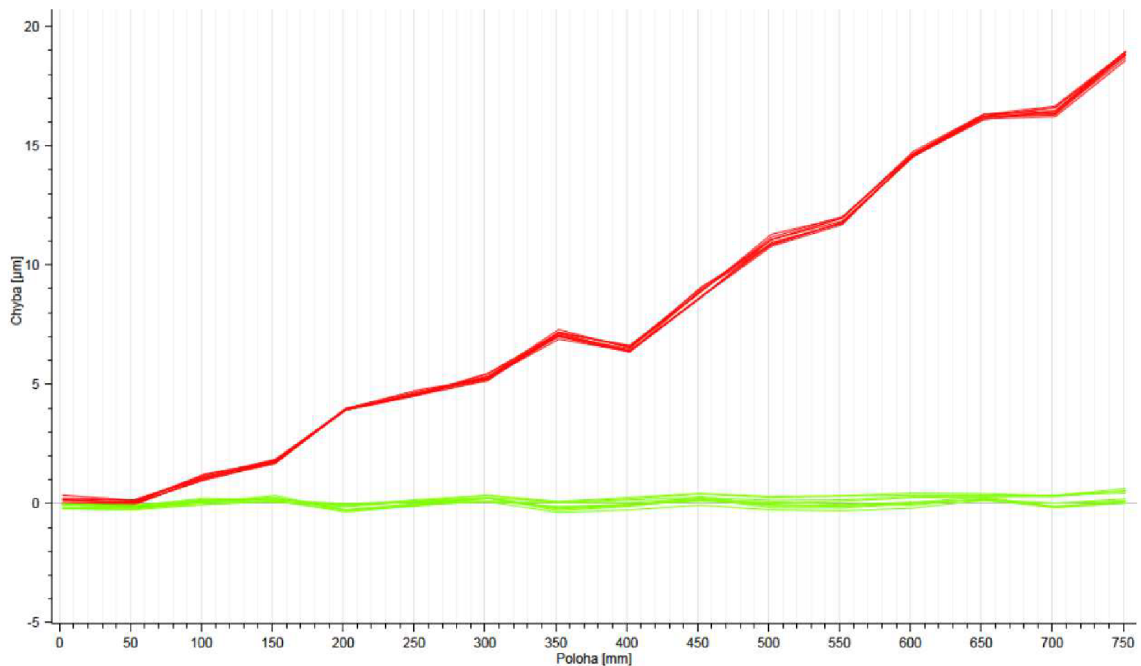
Měření v ose x bylo provedeno s etalonem (Johanssonovou měrkou) o kalibrované délce 500,00256 mm (viz tab. 4.3) ve dvou výškách Z pomocí cyklu 978 viz kapitola 1.4.4.. Na každé straně byly naměřeny 2 sady bodů po 30 opakováních, u horního a spodního okraje etalonu viz obr. 44. Měření probíhalo ve třech různých nastaveních stroje, bez kompenzací, s kompenzací polohy a s kompenzací polohy a kolmosti.



Obr. 44 Schématické zobrazení ustavení etalonu pro měření v ose x

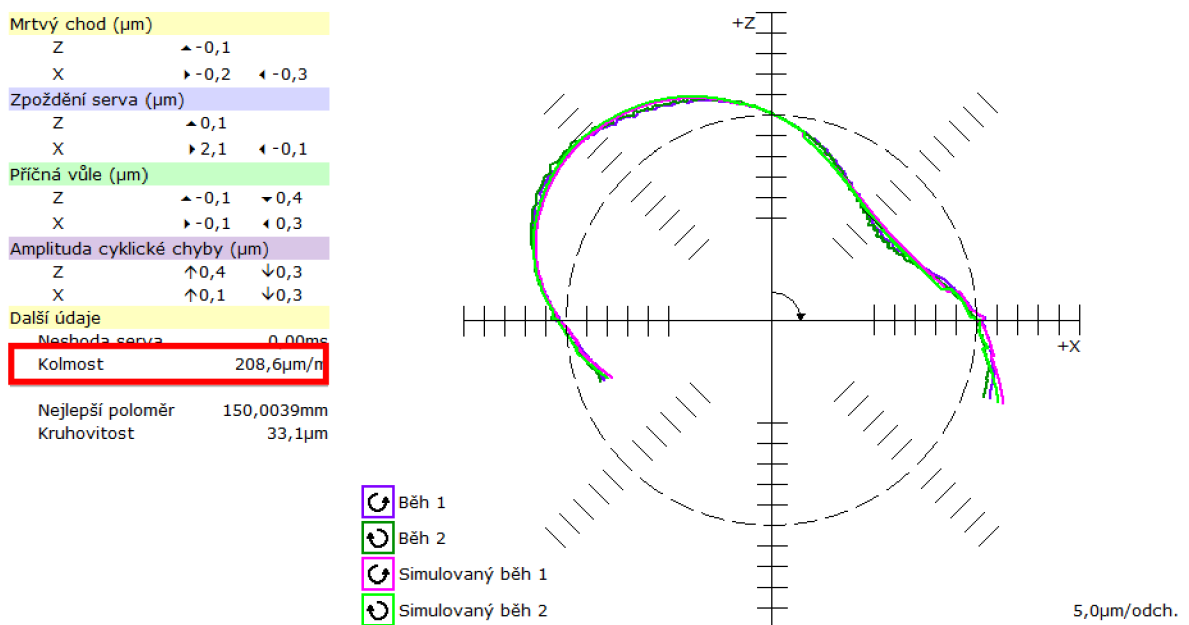
7.1.1 Kompenzace pro osu x

Přesnost polohování stroje v ose x byla určena pomocí přístroje XL-80 od společnosti Renishaw. Osa byla kompenzována v intervalu od $x=2$ mm do $x=752$ mm s krokem 50 mm. Na obr. 45 jsou graficky zobrazeny červenou křivkou odchylky polohování v jednotlivých pozicích před kompenzací polohy a následně zelenou křivkou odchylky po kompenzaci polohy. Naměřená data byla zpracována pomocí softwaru CARTO Explore, který také dokáže generovat korekci chyby.



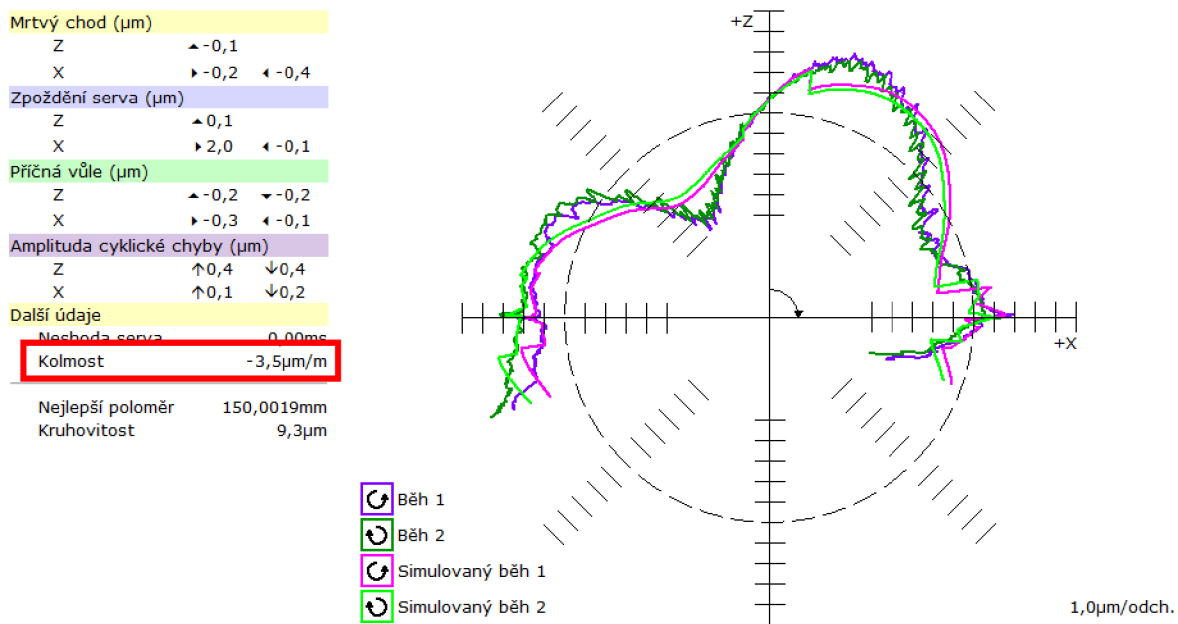
Obr. 45 Porovnání přesnosti polohování osy x před (červená) a po (zelená) kompenzaci

Kolmost os v rovině xz bylo měřeno pomocí Double Ballbaru. Byl použit nástavec pro měření s rádiusem 150 mm. Zmíněnou rovinu xz je možné měřit v rozsahu 270°. Naměřená data byla zpracována v softwaru Renishaw Ballbar 20. Na obr. 46 je možné vidět výsledek stroje bez kompenzací kolmosti. Chyba kolmosti osy x vůči ose z je přibližně 208 μm/m.



Obr. 46 Výsledky kalibrační diagnostiky v rovině xz

Na základě naměřených dat bylo možné vygenerovat kompenzační konstanty a zanést je do systému. Výsledky verifikačního měření chyby kolmosti os v rovině xz po kompenzaci, obr. 47. Chyba kolmosti osy x vůči ose z je 3,5 μm/m.



Obr. 47 Výsledky verifikačního měření v rovině xz

7.1.2 Naměřená data pro osu x

Naměřené body byly zpracovány podle postupů uvedených v kapitole 6.2, kdy byly vypočteny délky mezi dvěma body a mezi bodem a přímkou, výsledky jsou shrnuty v tabulka 7.1.

Tabulka 7.1 Naměřené délky etalonu s referenční délkou 500,025 mm

Konfigurace	Vypočtená délka [mm]			
	K11-K13	K12-K14	K11K12-K13	K11-K13K14
Bez kompenzace dole	499,9956	499,9964999	499,9955877	499,995594
ENC – dole	500,0104	500,0120525	500,0103945	500,010405
ENC – nahoře	500,008663	500,0094755	500,0086579	500,008661
ENC a CEC – dole	500,0103	500,0107796	500,0103466	500,0103461
ENC a CEC – nahoře	500,007485	500,0084688	500,0074837	500,0074793

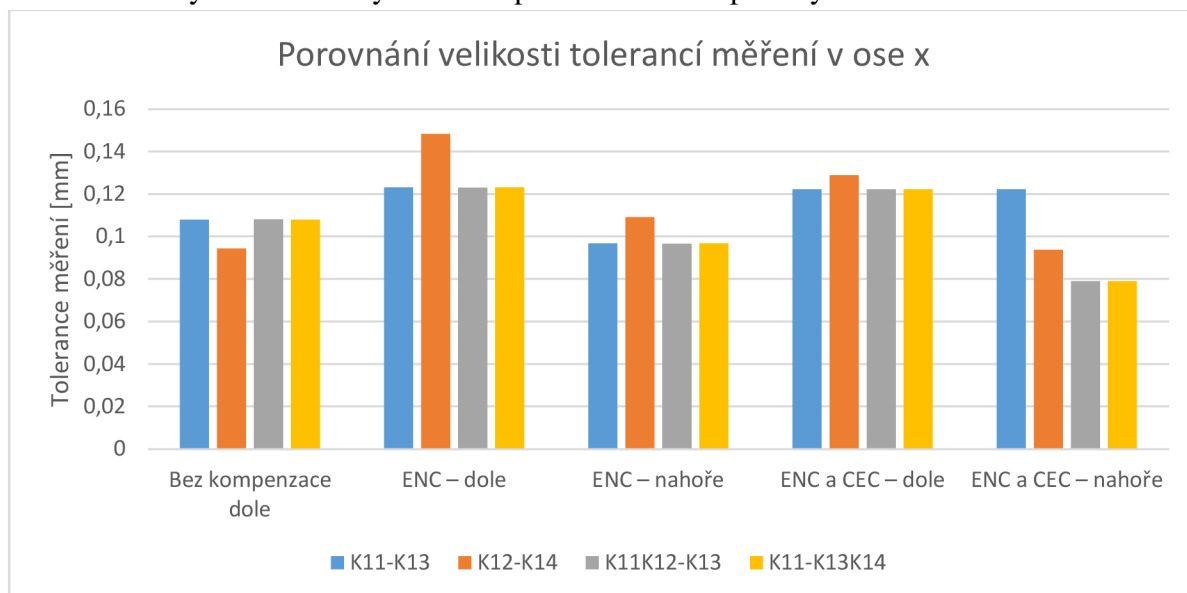
Všechna naměřená data jsou k nalezení v příloze. Z těchto dat byly následně vypočteny tolerance měření pro jednotlivé konfigurace pomocí navržené aplikace viz kapitola 6.3. Výsledky jsou zobrazeny v tabulka 7.2.

Tabulka 7.2 Dosažená tolerance měření v ose x pro různé konfigurace

Konfigurace	Vypočtená tolerance měření [mm]			
	K11-K13	K12-K14	K11K12-K13	K11-K13K14
Bez kompenzace dole	0,10790	0,09426	0,10806	0,10796
ENC – dole	0,12317	0,14826	0,12297	0,12314
ENC – nahoře	0,09673	0,10902	0,09664	0,09669
ENC a CEC – dole	0,12225	0,12884	0,12225	0,12224
ENC a CEC – nahoře	0,12224	0,09378	0,07898	0,07892

Je možné vidět, že do měření vstupuje další proměnná. Výsledné minimální tolerance se s aktivními kompenzacemi zvyšují, což je proti původnímu předpokladu, kdy aktivní kompenzace by měly měření zpřesňovat.

Pro lepší přehlednost jsou data zobrazena graficky na obr. 48. Je vidět, že měření pomocí přímký a bodu na rozdíl od běžně používaného bodu a bodu, nepřináší signifikantní změnu, proto vzhledem k časové náročnosti měření nebude testována ani metoda bodu a roviny a následně už tyto dvě metody nebudou pro další měření použity.



Obr. 48 Grafické vyhodnocení tolerance měření pro osu x

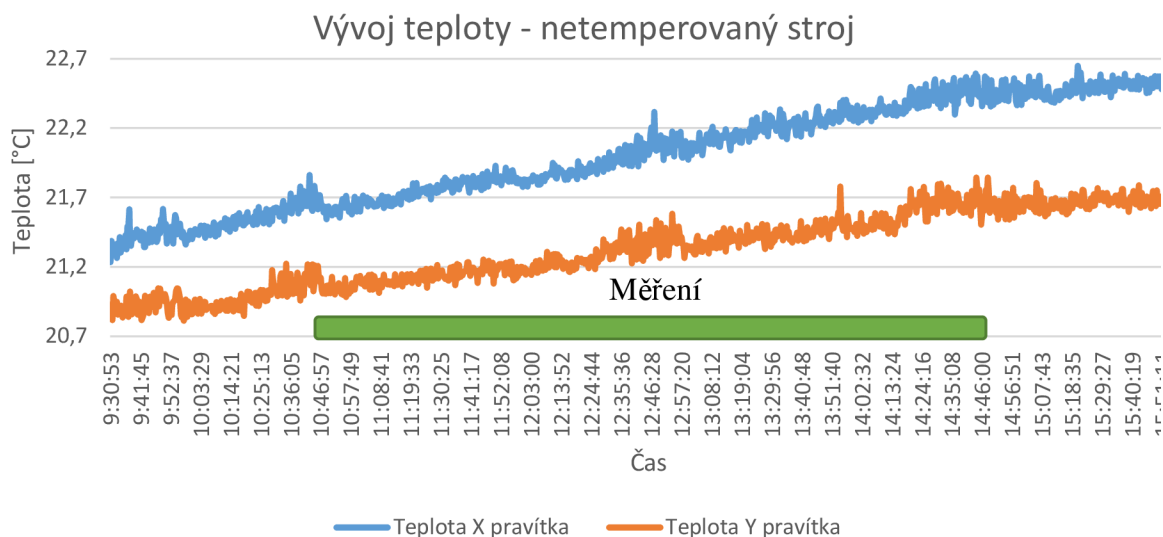
Zároveň je zde patrné, že získané tolerance nejsou konstantní. Z tohoto důvodu budou následovat další pokusná měření s cílem tuto proměnnou identifikovat, popřípadě se pokusit z naměřených dat sestavit model chování daného stroje.

7.2 Vyšetřovací měření

Prvním krokem byla diagnostika konkrétního zařízení. Cílem bylo zjištění geometrických chyb, které se na stroji MCV QUICK 754 nacházejí. Na základě naměřených dat pak bylo možné určit, co musí samotnému měření předcházet, ale i například, která osa je vhodnější pro dané měření.

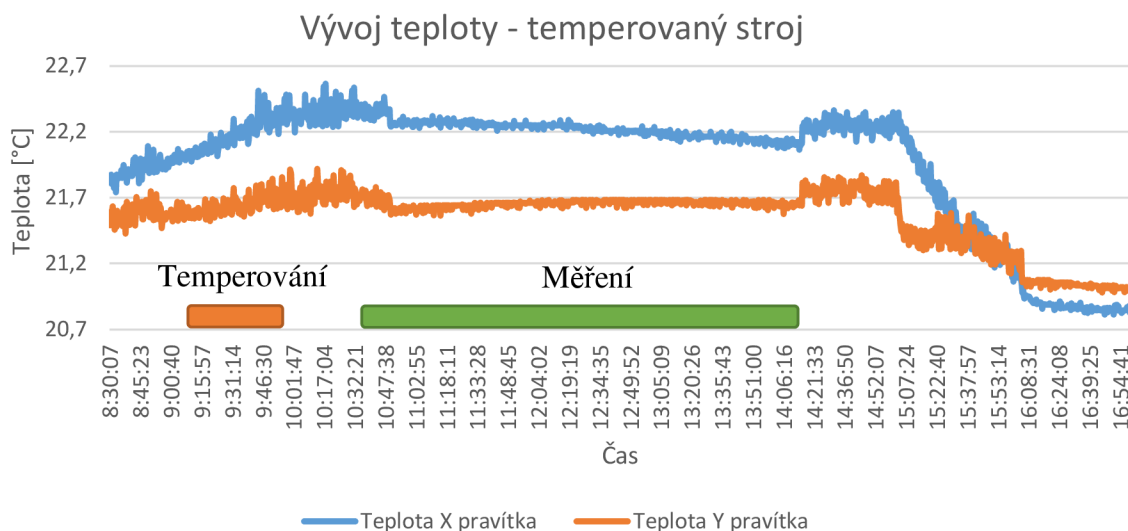
7.2.1 Vliv teploty stroje

Jeden z faktorů, který může mít signifikantní vliv na naměřené hodnoty je teplota stroje. Pokud je měření prováděno na nepřipraveném stroji, tak během měření dochází k zahřívání částí stroje a mění se jeho geometrické charakteristiky. Obecně je na stroji stanovena tolerance teploty ± 1 °C, což je možné vidět na obr. 49, že teplota během měření se udržuje v tomto intervalu.



Obr. 49 Vývoj teploty stroje během měření

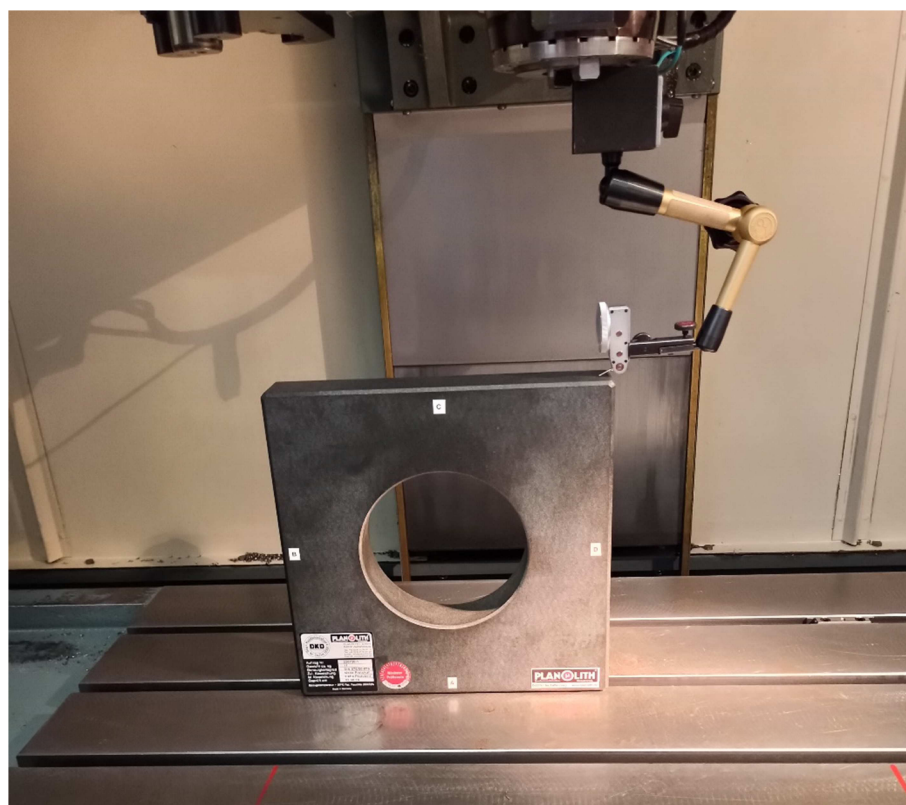
V případě měření však i toto zahřívání stroje může mít vliv na výsledky. Bylo rozhodnuto před každým měřením stroj temperovat na pracovní teplotu tak, aby byl minimalizován vliv zahřívání stroje. To je provedeno spuštěním zahřívacího cyklu na cca 30 min před začátkem měření. Na obr. 50 je možné vidět, jak dojde k zahřátí stroje a k ustálení teplot pro následné měření.



Obr. 50 Zahřátí stroje a ustálení na provozní teplotě

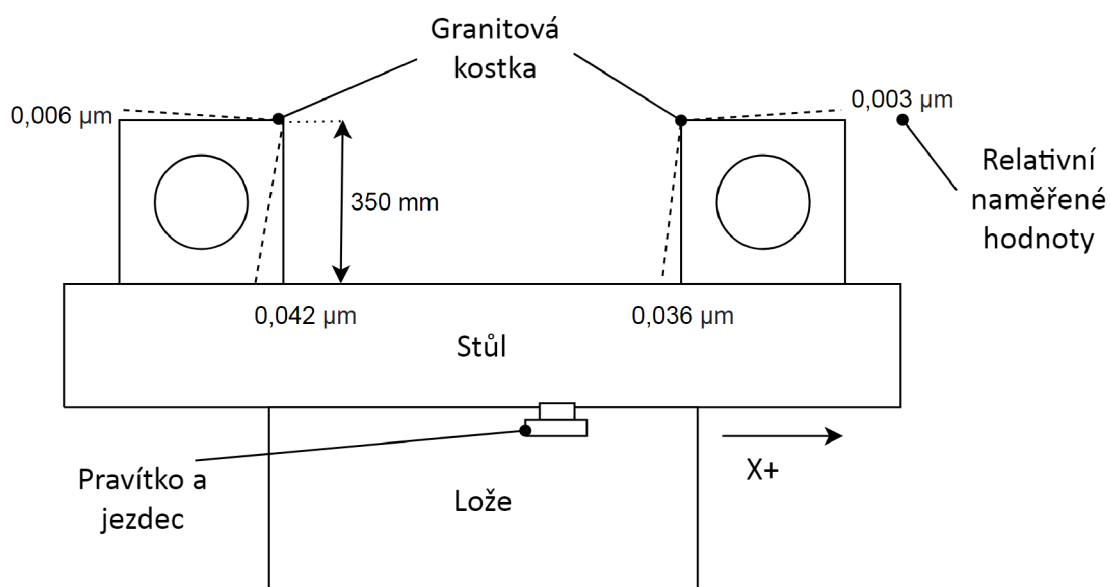
7.2.2 Kolmost pracovních os v rovině xz

Kolmost osy z vůči křížovému stolu bylo měřeno pomocí granitové kostky a úchylkoměru s rozlišením 1 μm . Ustavení k vidění na obr. 51.



Obr. 51 Měření kolmosti osy z

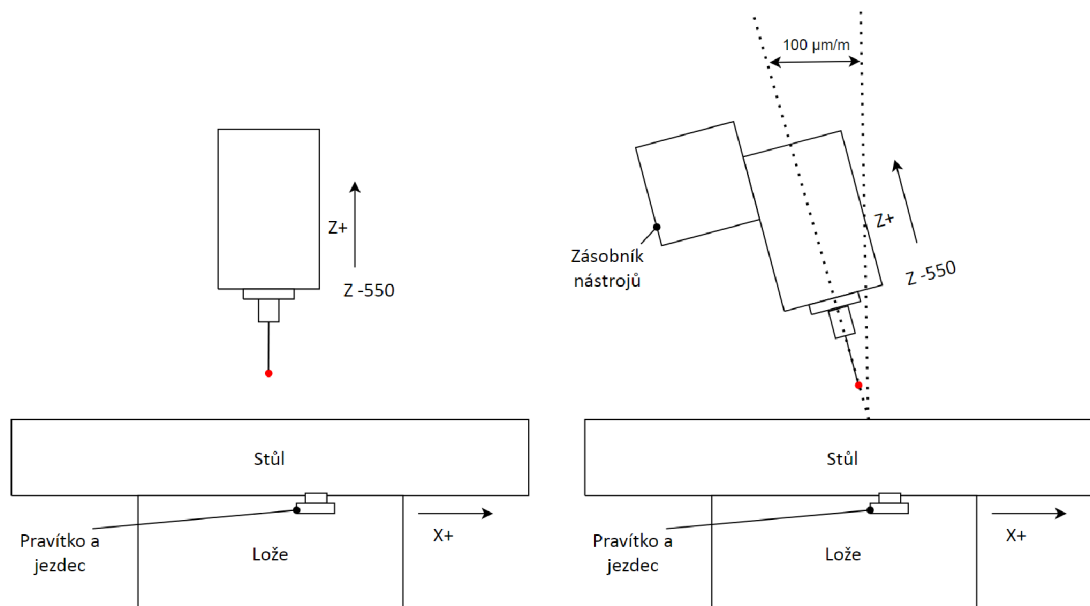
Měření ukázalo chybu kolmosti osy Z přibližně $148 \mu\text{m/m}$. Naměřené hodnoty, ze kterých byla tato hodnota stanovena viz obr. 52.



Obr. 52 Grafické znázornění výsledku měření kolmosti v rovině xz

Tento fakt potvrzuje i předešlé měření pomocí přípravku Ballbar, kdy kolmost osy z na osu x byla naměřena $200 \mu\text{m/m}$. Naměřené výsledky nejsou zcela shodné. Je to s největší pravděpodobností způsobeno rozdílným charakterem měření, co se týče polohy osy x vůči ose

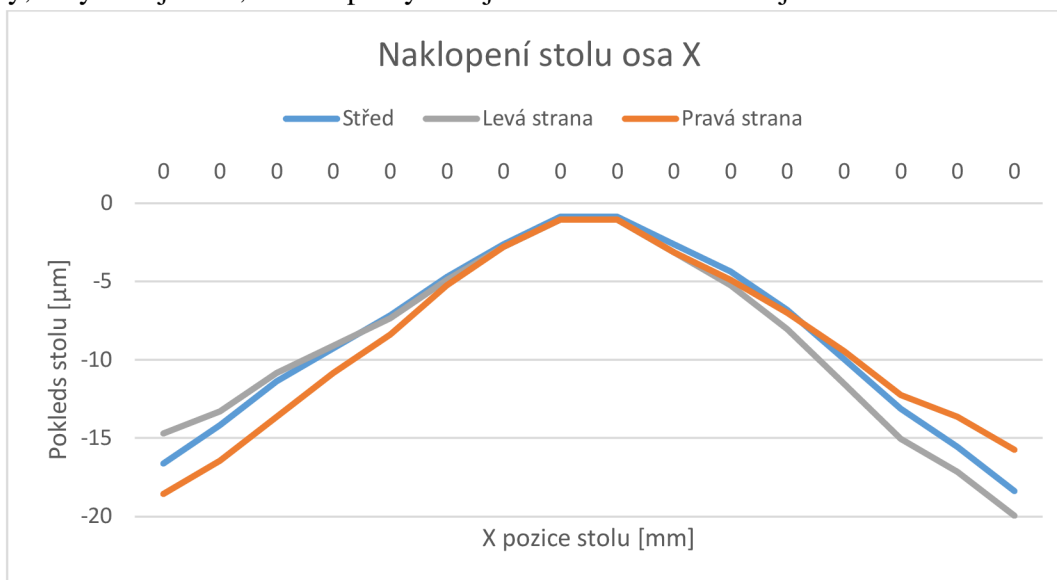
z, nicméně obě měření ukazují vychýlení osy z ve stejném směru. To může být zapříčiněno například nesouměrným zatížením od zásobníku nástrojů, viz obr. 53



Obr. 53 Znárodnění vlivu nesouměrného zatížení na kolmost os

7.2.3 Naklápění křížového stolu

Naměřená data, zobrazená na obr. 52 také ukazují, že chyba kolmosti osy z vůči ose x není konstantní. Toto může být způsobeno například naklápěním křížového stolu pod vlastní vahou. Toto bylo vyšetřeno pomocí přesné digitální libely, která byla umístěna na zvolenou pozici na pracovní ploše a následně se polohoval stůl v ose x v celém rozsahu. Takto byly vyšetřeny 3 body, levý okraj stolu, střed a pravý okraj stolu. Naměřené data je možné vidět na obr. 54.

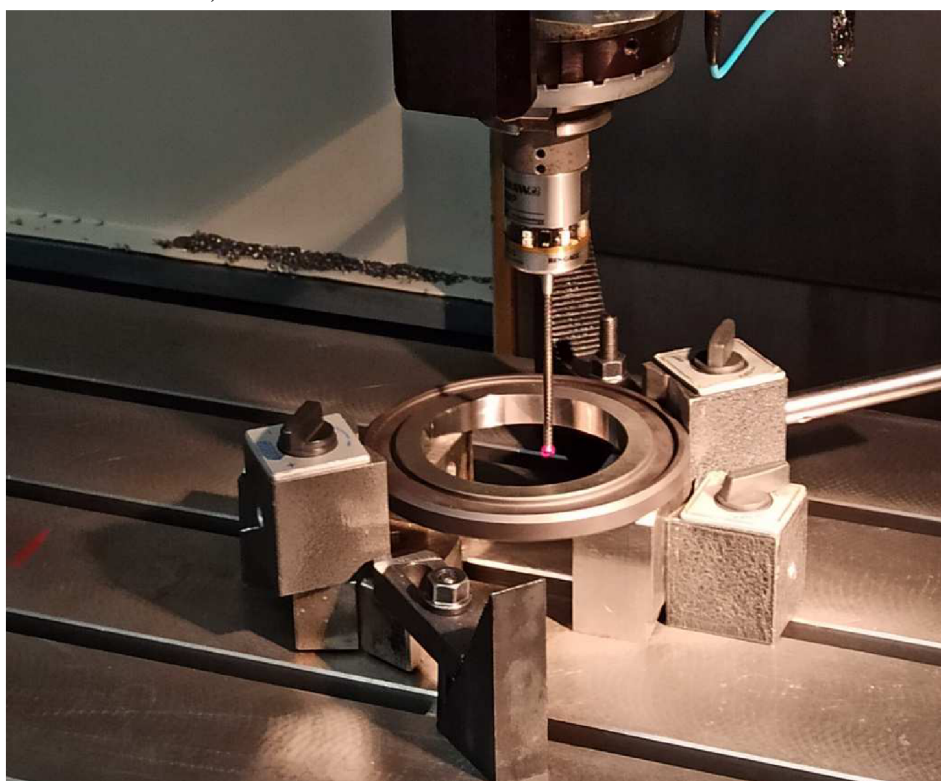


Obr. 54 Výsledky měření naklápění křížového stolu pro osu x

Z naměřených dat vyplývá, že pokud se stůl přesune z pozice X = 2 na X = 352 mm, pak jeho levý okraj klesne o 15 μm.

7.3 Kalibrace sondy

Pro účely pokusů byl použit dotek o průměru 6 mm. Kalibrace kuličky pro osu x a y byla provedena ve výšce, kde následně probíhalo také měření etalonu. Kalibrace byla provedena pomocí kroužkového etalonu, viz obr. 55.



Obr. 55 Kalibrace doteku na kalibračním kroužku

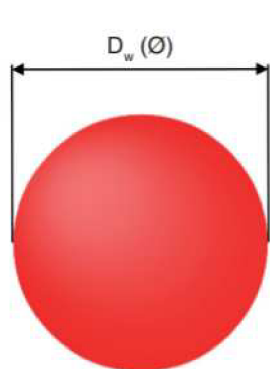
Kalibraci sondy bylo nutné provést při zavádění jednotlivých nastavení stroje. Naměřené průměry kuličky vycházely konstantě s ohledem na použité kompenzace přibližně 5,95 mm, což je o 50 nm menší průměr, než by měl být vzhledem k rozměrovým tolerancím. Použité doteky od firmy Renishaw jsou dodávány v různých průměrech o různých třídách přesnosti, viz obr. 56.

Stupeň přesnosti (Grade)	Jmenovitý průměr v mm (přes)	Jmenovitý průměr v mm (až do)	Rozměrové odchylky* μm	Odchylka průměru kuličky (μm) V_{DWS}	Odchylka kulatosti tvaru od (μm) t_{DW}
3	-	12	$\pm 5,32$	0,08	0,08
5	-	12	$\pm 5,63$	0,13	0,13
10	-	25	$\pm 9,75$	0,25	0,25
16	-	25	$\pm 11,4$	0,40	0,40
20	-	38	$\pm 11,5$	0,50	0,50

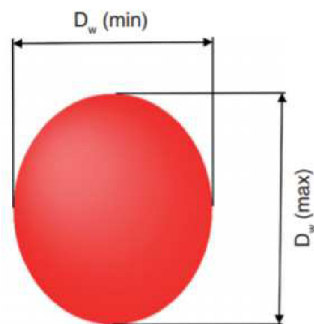
Obr. 56 Rozměrové tolerance dotyku od firmy Renishaw [27]

V Obr. 57 jsou názorně zobrazeny postupy k určení jednotlivých veličin na obr. 56.

Jmenovitý průměr D_w **Odchylka průměru V_{DWS}** **Odchylka kulatosti tvaru T_{DW}**

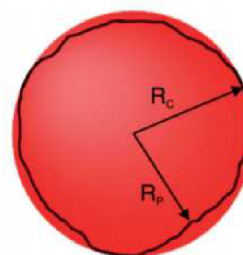


Hodnota průměru použita pro identifikace velikosti kuličky doteku.



Ball diameter variation
 $V_{DWS} = D_w (\text{max}) - D_w (\text{min})$

Rozdíl mezi největším a nejmenším průměrem kuličky.



R_c = Radius of circumscribing circle
 R_p = Smallest radius
 Deviation from spherical form
 $T_{DW} = R_c - R_p$

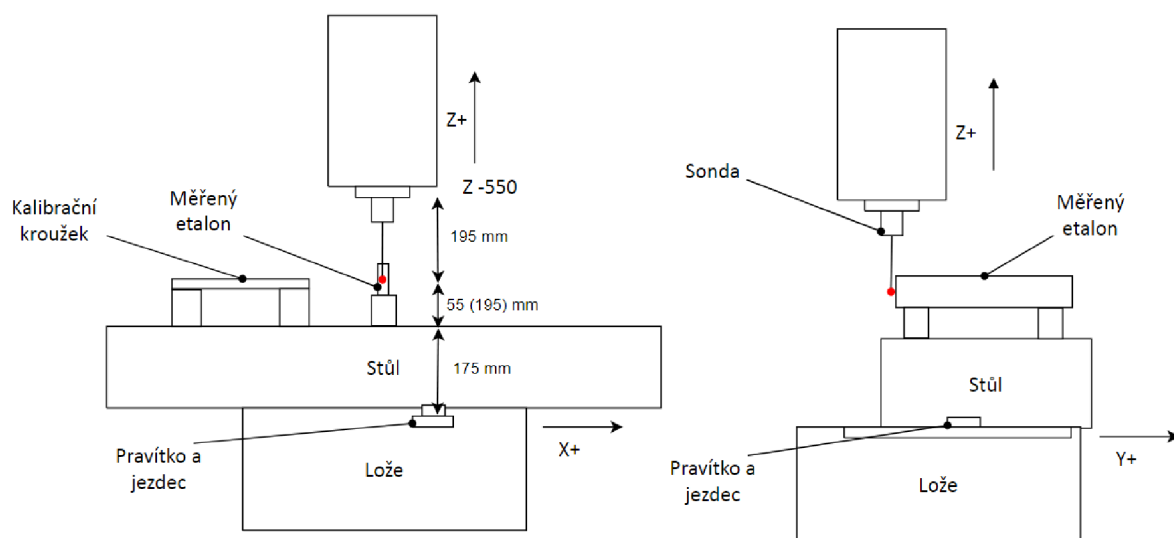
Největší radiální vzdálenost v kterémkoliv směru mezi koulí opsanou kružnicí povrchu a libovolným bodem jejího povrchu

Obr. 57 Určení chyby doteku, doplnění Obr. 57 [27]

Následná konzultace s pracovníky z Renishaw ukázala, že naměřený průměr kuličky během kalibrace totiž neudává fyzický průměr kuličky, ale jedná se o tzv. elektronický průměr. Toto se děje z důvodu zpoždění reakce stroje během zpracování signálu (sonda – přijímač – řídicí systém). Stejně je takto kompenzována hystereze mechanismu, kdy dochází k rozdílnému spínání sondy v opačných směrech. Znamená to tedy, že následně při zachování stejných posuvových rychlostí během měření obrobku jsou chyby minimalizovány.

7.4 Měření v ose y

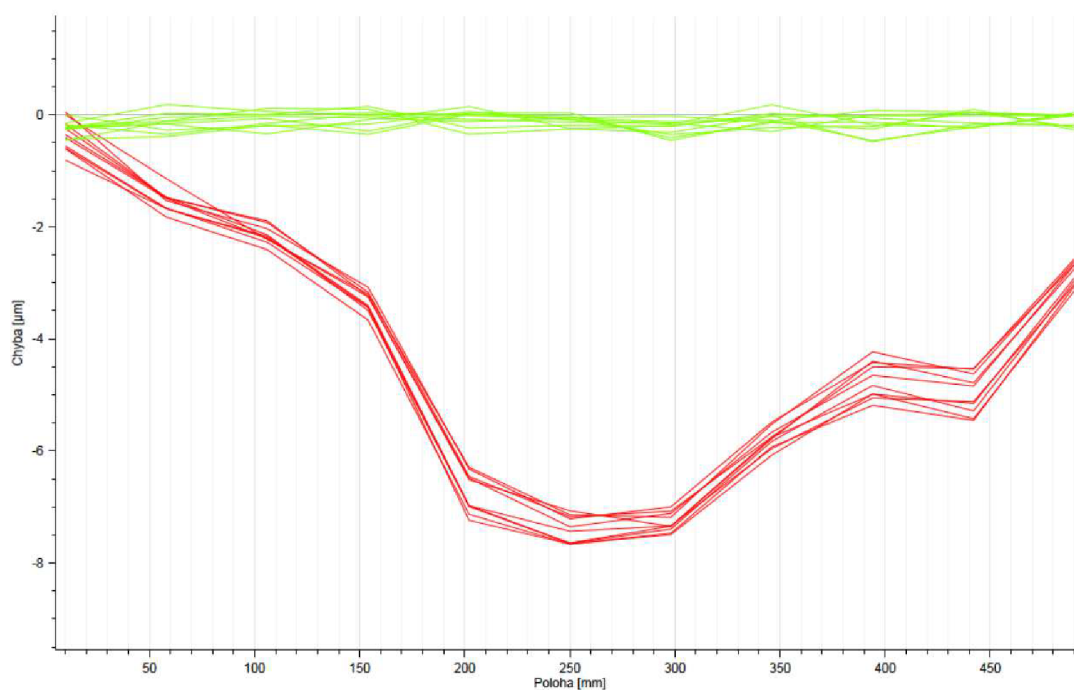
V případě měření v ose y bylo z důvodu velikosti pracovního prostoru možné použít etalon o maximální délce 400 mm. Měření bylo provedeno bez kompenzací, s aktivovanou kompenzací polohy a s aktivní kompenzací polohy a kolmosti. Byly provedeny 2 sady měření v závislosti na výšce v ose z, a to 55 a 195 mm, viz obr. 58.



Obr. 58 Schéma ustavení etalonu, kalibračního kroužku, rozměry

7.4.1 Kompenzace pro osu y

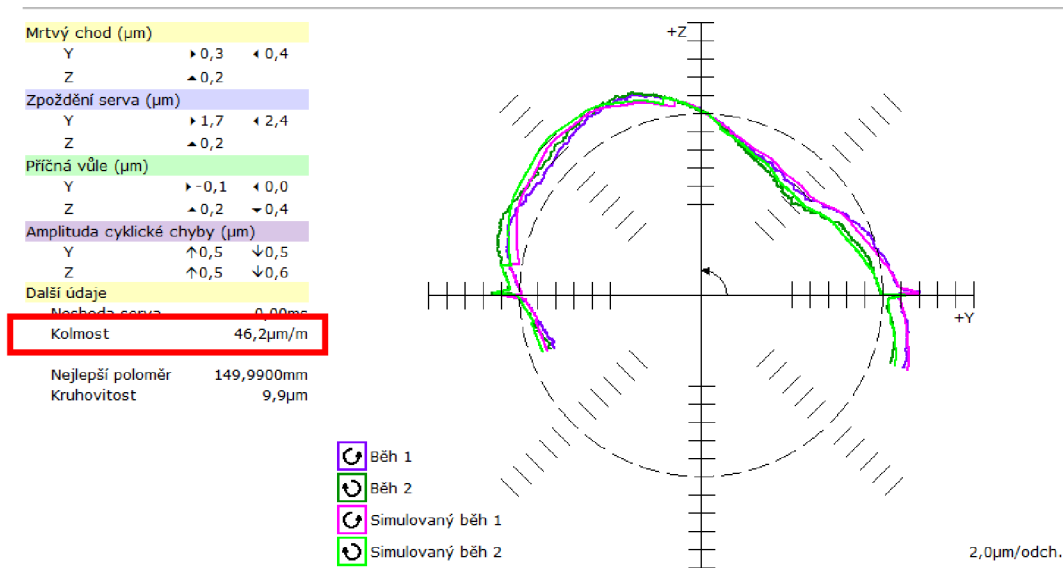
Přesnost polohování stroje v ose y byla určena pomocí přístroje XL-80 od společnosti Renishaw. Osa byla kompenzována v intervalu od $y=10$ mm do $x=490$ mm s krokem 48 mm. Na obr. 59 jsou graficky zobrazeny červenou křivkou odchylky polohování v jednotlivých pozicích před kompenzací polohy a následně zelenou křivkou odchylky po kompenzaci polohy. Naměřená data byla zpracována pomocí softwaru CARTO Explore, který také dokáže generovat korekci chyby.



Obr. 59 Porovnání přesnosti polohování osy y před (červená) a po (zelená) kompenzaci

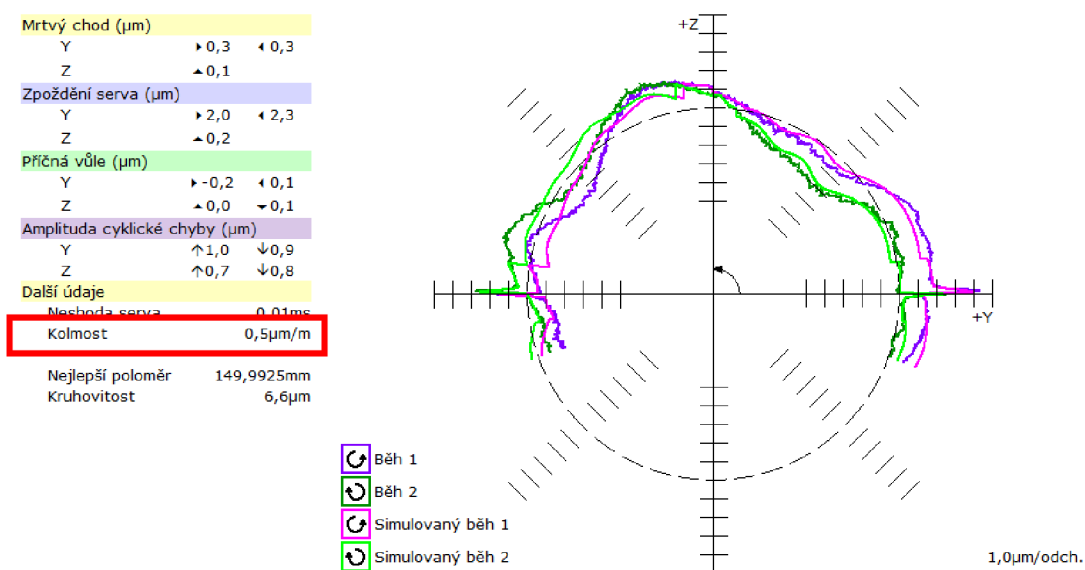
Chyba kolmosti os v rovině yz byla měřena pomocí Double Ballbaru. Byl použit nástavec pro měření s rádiusem 150 mm. Zmíněnou rovinu yz je možné měřit v rozsahu 270° . Naměřená

data byla zpracována v softwaru Renishaw Ballbar 20. Na obr. 60 je možné vidět výsledek stroje bez kompenzací kolmosti. Chyba kolmosti osy y vůči ose z je přibližně 46 $\mu\text{m}/\text{m}$.



Obr. 60 Výsledky kalibrační diagnostiky v rovině yz

Na základě naměřených dat bylo možné vygenerovat kompenzační konstanty a zanést je do systému. Výsledky verifikačního měření chyby kolmosti os v rovině yz po kompenzaci, obr. 61. Chyba kolmosti osy y vůči ose z je 0,5 $\mu\text{m}/\text{m}$.



Obr. 61 Výsledky verifikačního měření v rovině yz

7.4.2 Naměřená data pro osu y

K měření byl použit cyklus 977, viz 1.4.4. Znamená to tedy, že stroj již jednotlivé délky počítá automaticky. Naměřená data byla následně zpracována, výsledky viz tabulka 7.3.

Tabulka 7.3 Naměřené délky etalonu s referenční délkou 399,99908 mm

<i>Konfigurace</i>	<i>Aritmetický průměr [mm]</i>	<i>Směrodatná odchylka [μm]</i>	<i>Rozdíl naměřené a kalibrované délky [mm]</i>	<i>Tolerance měření [mm]</i>
<i>Bez kompenzace dole</i>	400,011679	0,217	0,012599	0,195210
<i>Bez kompenzace nahoře</i>	400,013226	0,403	0,014146	0,218600
<i>ENC – dole</i>	400,006657	0,190	0,007577	0,118410
<i>ENC – nahoře</i>	400,007980	0,231	0,008900	0,138300
<i>ENC a CEC – dole</i>	400,008239	0,184	0,009159	0,142300
<i>ENC a CEC – nahoře</i>	400,006731	0,259	0,007651	0,119270

Všechna naměřená data jsou přiložena v příloze. S ohledem na skutečnost, že stroj podle technických dat dosahuje přesnosti polohování 20 μm , byly naměřené směrodatné odchylky řádově menší. Rozptyl hodnot je pak řádově nižší, pro výšku $z = 195$ mm je však dvojnásobný. Dosažená tolerance měření v konfiguraci bez aktivních kompenzací vychází podle postupů normy VDA 5 0,195210 mm a 0,218600 mm.

V případě aktivních kompenzací polohy jsou naměřeny hodnoty s rozdílem 8 μm od kalibrovaného etalonu. Dosažená tolerance měření je tedy pro tento případ nižší, podle postupů z norem VDA vychází 0,11841 mm pro $z=55$ mm a 0,138300 mm pro $z=195$ mm

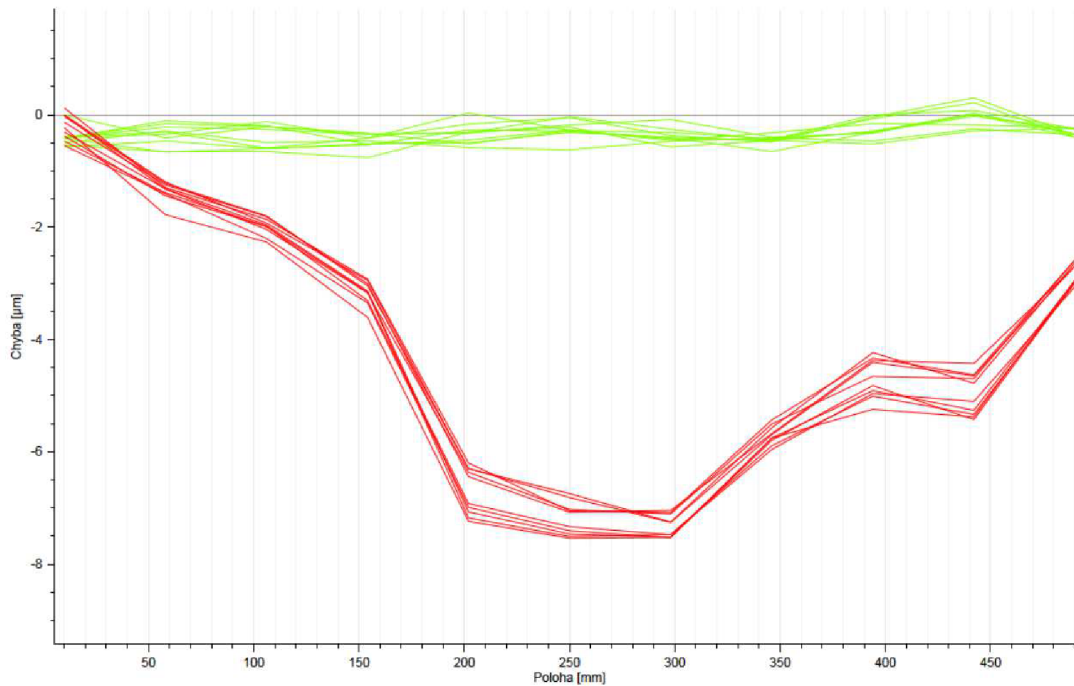
Pro případ aktivovaných kompenzací kolmosti a polohy je rozdíl v naměřené průměrné délce etalonu a skutečné opět přibližně 8 μm což je velice podobné jako pouze při aktivní kompenzaci polohy. Vypočtená tolerance pro danou konfiguraci je pro výšku $z = 55$ mm, 0,14230 mm a pro výšku $z=195$ mm, 0,11927 mm.

7.5 Opakované měření v ose y

Na základě dosažených výsledků při určování tolerance měření bylo provedeno druhé měření pro tuto osu s cílem zopakovat dosažené výsledky, aby bylo možné potvrdit konstantnost měření. Strategie měření proto zůstala identická (2 sady měření v závislosti na výšce v ose z, a to 55 a 195 mm, viz obr. 58), navíc bude provedeno měření po volumetrické kompenzaci.

7.5.1 Opakovaná kompenzace pro osu y

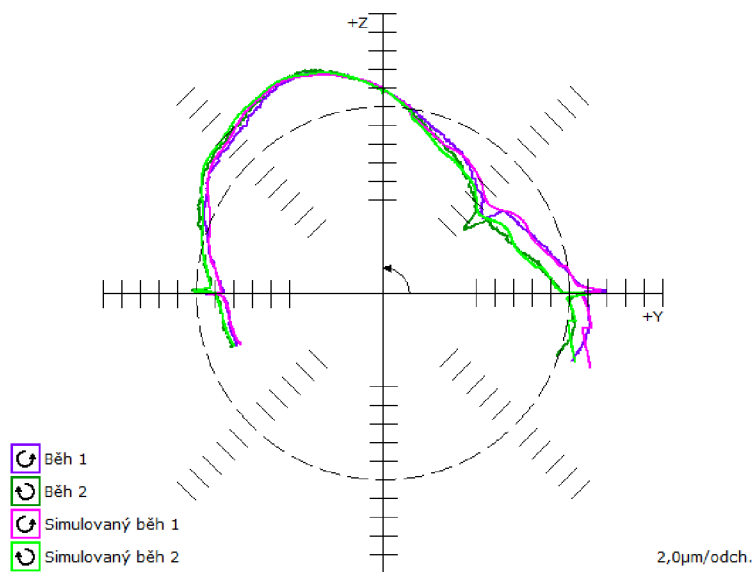
Opět byla změřena přesnost polohování stroje v ose y, testovaný interval od $y=10$ mm do $y=490$ mm s krokem 48 mm. Na obr. 62 jsou graficky zobrazeny červenou křivkou odchylky polohování v jednotlivých pozicích před kompenzací polohy a následně zelenou křivkou odchylky po kompenzaci polohy.



Obr. 62 Porovnání přesnosti polohování osy y před (červená) a po (zelená) kompenzaci

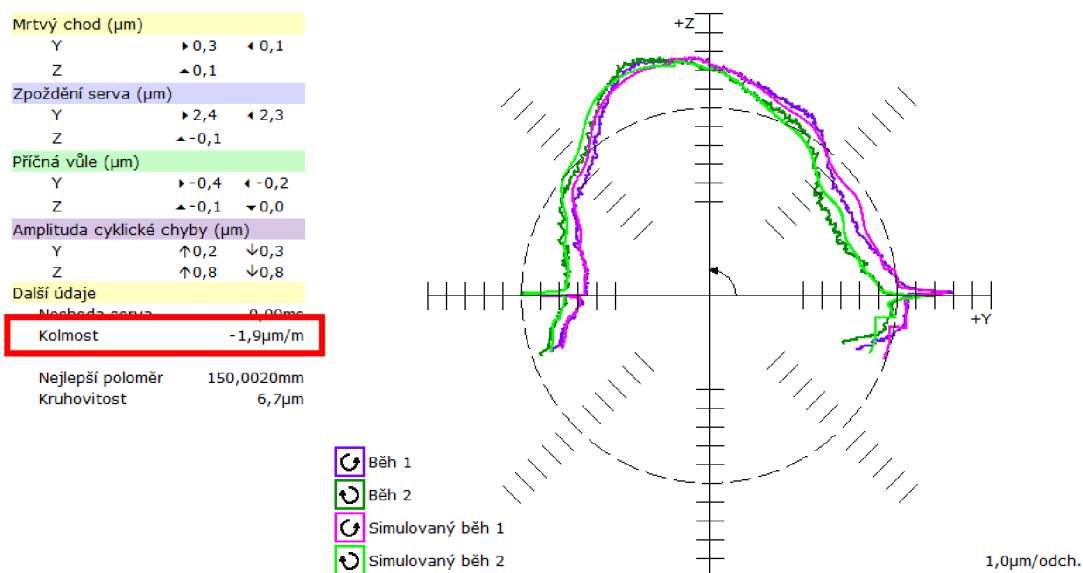
Stejně tak chyba kolmosti os v rovině yz byla měřena pomocí Double Ballbaru. Na obr. 63 je možné vidět výsledek stroje bez kompenzací kolmosti. Chyba kolmosti osy y vůči ose z je přibližně 52 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Mrtvý chod (μm)		
Y	▶ 0,4	◀ 0,1
Z	▲ 0,0	
Zpoždění serva (μm)		
Y	▶ 2,7	◀ 1,9
Z	▲ -0,1	
Příčná vůle (μm)		
Y	▶ 0,1	◀ 0,1
Z	▲ 0,0	▼ 0,7
Amplituda cyklické chyby (μm)		
Y	↑ 0,4	↓ 0,3
Z	↑ 1,8	↓ 1,5
Další údaje		
Neoběda serva	0,02ms	
Kolmost	52,1$\mu\text{m}/\text{m}$	
Nejlepší poloměr	150,0027mm	
Kruhovitost	14,5 μm	



Obr. 63 Výsledky kalibrační diagnostiky v rovině yz

Na základě naměřených dat bylo možné vygenerovat kompenzační konstanty a zanést je do systému. Výsledky verifikačního měření chyby kolmosti os v rovině yz po kompenzaci, obr. 64. Chyba kolmosti osy x vůči ose z je 1,9 $\mu\text{m}/\text{m}$.

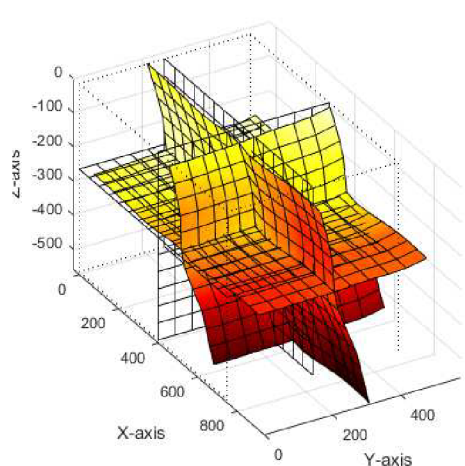


Obr. 64 Výsledky verifikačního měření v rovině yz

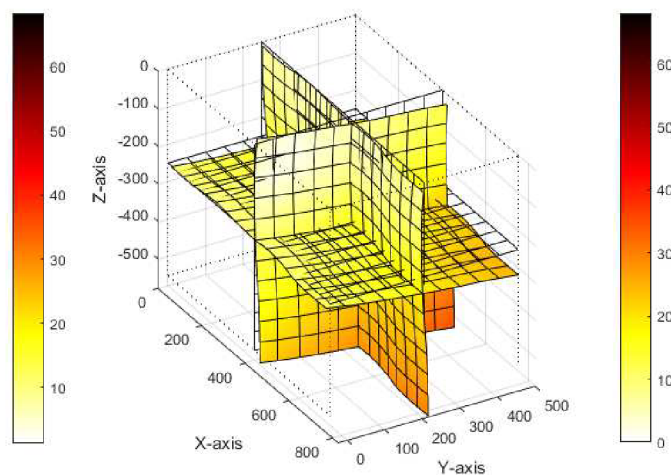
Volumetrická kompenzace se skládala z diagnostického a verifikačního měření pomocí zařízení LTC od firmy ETALON. V tomto případě byly kompenzovány všechny tři osy. Kompenzovaný prostor včetně počtu kompenzačních bodů, viz Tabulka 7.4. Na obr. 65 je grafické vyhodnocení geometrické přesnosti před zavedením kompenzací a na obr. 66 je grafické vyhodnocení geometrické přesnosti po aktivaci kompenzace.

Tabulka 7.4 Parametry volumetrické kompenzace

	<i>Začátek intervalu [mm]</i>	<i>Konec intervalu [mm]</i>	<i>Počet kompenzačních kroků</i>	<i>Velikost kroku [mm]</i>
<i>Osa X</i>	100	600	10	50
<i>Osa Y</i>	0	500	10	50
<i>Osa Z</i>	-400	0	10	50



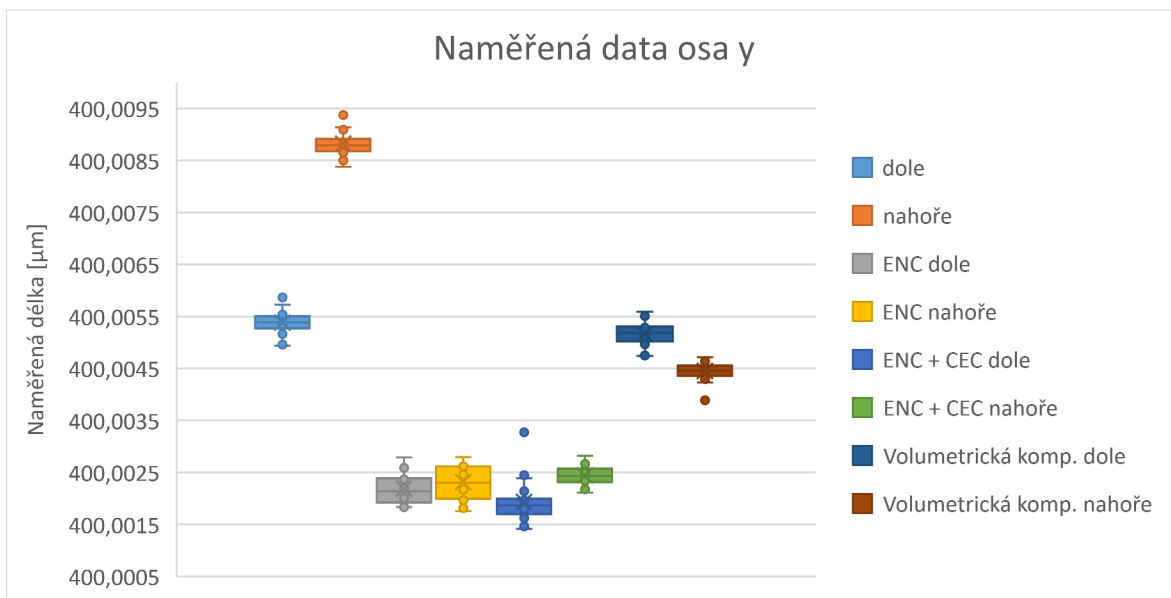
Obr. 65 Kalibrační měření pro volumetrickou kompenzaci



Obr. 66 Verifikační měření po volumetrické kompenzaci

7.5.2 Naměřená data pro osu y

V této podkapitole jsou shrnuty výsledky získané opakovaným měřením délky etalonu s kalibrovanou délkou 399,99908 mm s cílem replikovat dosažené výsledky a prokázat tak stabilitu měření. Navíc pak bylo provedeno měření s aktivní volumetrickou kompenzací. Naměřená data jsou zobrazena na obr. 67. Získaná data jsou zpracována, viz tabulka 7.5.



Obr. 67 Krabicový diagram naměřených dat

Tabulka 7.5 Naměřená data pro opakované měření v ose y, etalon = 399,99908 mm

Konfigurace	Aritmetický průměr [mm]	Směrodatná odchylka [μm]	Rozdíl naměřené a kalibrované délky [μm]	Tolerance měření [mm]
<i>Bez kompenzace dole</i>	400,0053831	0,211093	6,303057	0,098729
<i>Bez kompenzace nahoře</i>	400,008822	0,235729	9,741981	0,15115256
<i>ENC – dole</i>	400,0021844	0,266465	3,104352	0,051333
<i>ENC – nahoře</i>	400,0023167	0,322875	3,236655	0,053235
<i>ENC a CEC – dole</i>	400,0019331	0,358262	2,85313	0,047753
<i>ENC a CEC – nahoře</i>	400,002443	0,175898	3,363018	0,0550606
<i>Volumetrická komp. dole</i>	400,0051569	0,213682	6,076943	0,095417
<i>Volumetrická komp. nahoře</i>	400,004451	0,158085	5,37097	0,084786

Opakované měření bez aktivních kompenzací vyšlo s menším rozdílem mezi naměřenou délkou a délkou kalibrovanou, než tomu bylo u prvního měření v ose y. Relativně velký rozdíl hodnot byl naměřen v jednotlivých výškách. To může být způsobeno charakterem měření, jelikož poté, co byly určeny všechny kompenzační konstanty proběhlo měření pro jednotlivé konfigurace dole a následně byl etalon s kalibračním kroužkem přestaven do horní polohy, kde měření opět proběhlo pro všechny konfigurace. Tento postup byl zvolen z důvodu časové náročnosti při přestavování a srovnávání etalonu.

Během aktivní kompenzace polohy se opět projevilo zlepšení tolerance měření, kde pro obě měřené výšky podle normy VDA 5 vychází tolerance měření přibližně 0,052 mm. Aktivní kompenzace polohy a kolmosti nepřináší znatelné zlepšení v porovnání pouze s aktivní kompenzací polohy.

V případě volumetrické kompenzace je možné opět pozorovat zmenšení dosažené tolerance měření, od původního nekompenzovaného stroje. Podle normy VDA 5 bylo dosaženo tolerance měření přibližně 0,09 mm pro obě výšky.

Největší vliv na dosaženou toleranci měření má kompenzace polohy. To bylo dosaženo hlavně skutečností, že samotná kompenzace byla provedena v prostoru, kde následně probíhalo samotné měření, tím se podařilo eliminovat některé další chyby. V případě volumetrické kompenzace, také možné pozorovat zmenšení tolerančního pole. Co však z tabulek není patrné, je že tato kompenzace je nastavena na velkou část pracovního prostoru, tudíž by výsledky měly být podobné pro jakoukoliv pozici měření, zatímco v případě kompenzace polohy to není zcela možné a naměřené hodnoty se mohou rozcházet v závislosti na umístění etalonu v prostoru.

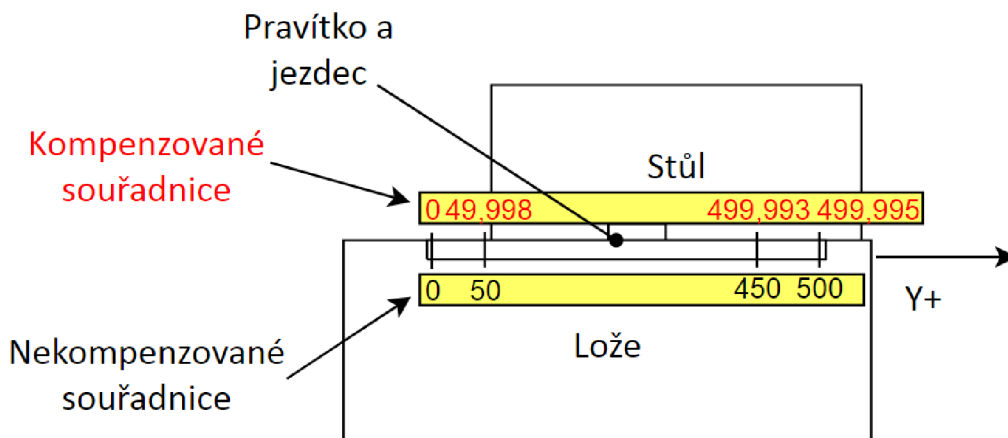
7.6 Porovnání vlivů použitých kompenzací pro osu y

V tabulce tabulka 7.6 jsou shrnuty rozdíly v naměřených rozměrech při použití konkrétních kompenzací.

Tabulka 7.6 Shrnutí hodnot kompenzací a vlivu na naměřenou délku etalonu

	$z = 55 \text{ mm}$	$z = 195 \text{ mm}$	<i>Kolmost yz</i>	<i>Polohování ENC</i>
<i>Výchozí délka</i>	400,011679	400,013226		
<i>Bez kompenzací</i>	0	0	46,2 $\mu\text{m}/\text{m}$	8,3 $\mu\text{m}/0,5 \text{ m}$
<i>ENC</i>	-0,005022	-0,005246	46,2 $\mu\text{m}/\text{m}$	1 $\mu\text{m}/0,5 \text{ m}$
<i>CEC a ENC</i>	-0,00344	-0,006495	0,5 $\mu\text{m}/\text{m}$	1 $\mu\text{m}/0,5 \text{ m}$

V případě kompenzace polohy dochází v ose y k „prodloužení“ pravítka, názorná ilustrace na obr. 68. Je zde zobrazeno, jakých nepřesností při odečítání z pravítka se stroj dopouští, když není kompenzován. V případě tedy, že je měření prvního bodu etalonu provedeno v oblasti $y=50 \text{ mm}$, dojde ke kontaktu sondy s etalonem na souřadnici $y_{r1}=49,998 \text{ mm}$, přičemž řídicí systém vyhodnotí, že se nachází na souřadnici $y_{s1}= 50 \text{ mm}$. V druhém bodě se stane obdobně v oblasti $y=450 \text{ mm}$, kdy stroj je na reálné pozici $y_{r2} = 449,993 \text{ mm}$, ale řídicí systém vyhodnotí, že se nachází na souřadnici $y_{s2} = 450 \text{ mm}$, viz obr. 49. Když se následně vypočte délka etalonu ze souřadnic reálných a kompenzovaných, je právě ta reálná délka o 5 μm větší než, stejně jako je tomu u naměřených hodnot.



Obr. 68 Ilustrace prodloužení pravítka vlivem polohové kompenzace

Při použití kompenzace kolmosti, která zjednodušeně pro rovinu yz funguje podle rovnice 20.

$$y = y_r + y_k \quad y_k = f(z) \quad 20$$

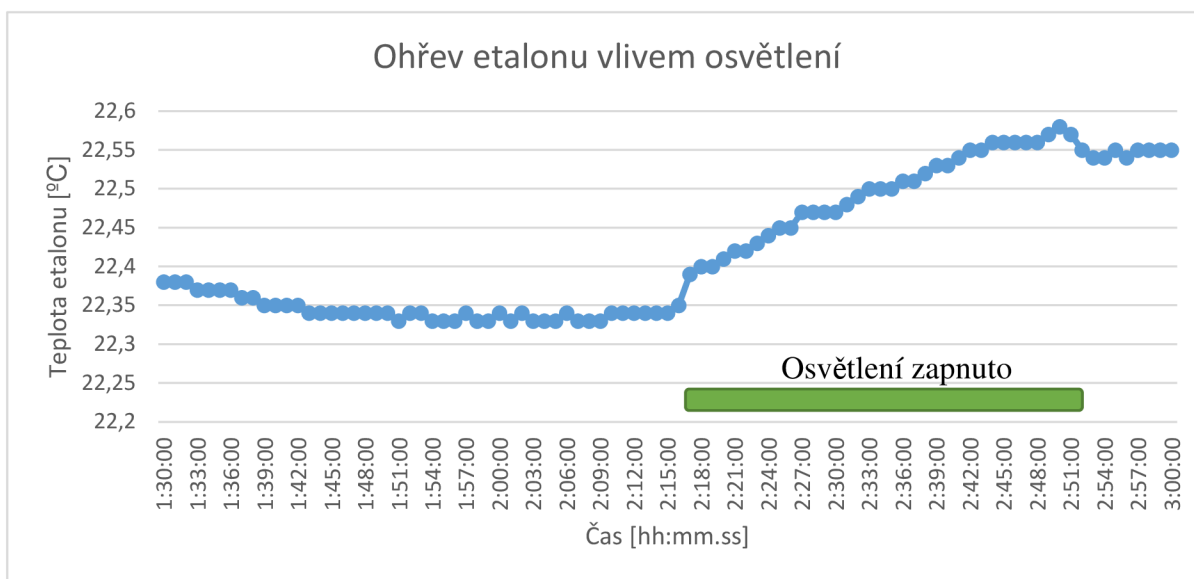
Kde y je pozice, na kterou se má stroj přenastavit. Ta se určuje podle hodnoty y_r reprezentující reálnou pozici stolu a y_k je kompenzační hodnota. Samotná kompenzační hodnota se získá z kompenzační funkce přímo závislé na poloze z . Znamená to tedy, že pokud je z konstantní, pozice y se nemění, tudíž se neprojevují kompenzace. Proto při kompenzaci kolmosti pro výšku $z = 55$ mm nedojde ke změně polohy vlivem kompenzace kolmosti a změna délky etalonu je ovlivněna pouze chybovými faktory. To je možné pozorovat v případě výšky $z = 195$ mm, kde dojde ke změně délky o přibližně $2 \mu\text{m}$. To může být způsobeno několika faktory. Těmito faktory mohou být například rozlišovací schopnost pravítka, nepřesnost sepnutí sondy, opakovatelnost najetí. Také má na měření vliv kolmost a přímost celého zařízení, popřípadě nekonzistentní prostředí, ve kterém bylo měření prováděno.

8 Diskuze k dosaženým výsledkům

Na úvod bylo provedeno měření včetně kompenzací polohy a kolmosti pro stanovení přesnosti měřicího procesu na ose x. Byl předpoklad, že kompenzace polohy bude mít, vzhledem k nižší časové náročnosti měření a zavedení kompenzací, nejlepší výsledky. Ukázalo se však, že i když bylo možné snížit chybu polohování z 20 μm na 2 μm , nebylo dosaženo lepší tolerance měření. Z toho vyplynulo, že zavedení samotných kompenzací nemusí vést přímo ke zlepšení geometrie stroje, a tím i zvýšení přesnosti měření. Důležité v tomto případě je znát celkové chování stroje.

Následně tedy bylo provedeno vyšetřovací měření, které ukázalo, že vlivem konkrétní konstrukce stroje dochází k průhybu stolu pod vlastní vahou v ose x, což znamená, že tato osa není vhodná pro měření v daném rozsahu. Je možné, že pokud by se použil kratší etalon, než byl původní 500 mm, například 125 mm, chyba průhybu stolu by se zde neprojevila. Byla však zvolena jiná možnost dalšího testování, a to měření v ose y. V této ose by nemělo docházet k průhybu stolu, jelikož vedení je rovnoměrně podepřeno po celé délce. Z důvodu velikosti osy však mohl být použit pouze etalon o délce 400 mm. První sada měření potvrdila tuto teorii, kdy v případě kompenzace polohy došlo ke snížení tolerance měření cca na polovinu. Druhé měření v ose y mělo za cíl dosáhnout stejných výsledků, aby se potvrdila opakovatelnost tohoto postupu. Byla snaha zopakovat měření v co nejvíce podobných krocích a za stejných podmínek, jako tomu bylo u předešlé. Výsledky při kompenzaci polohy v tomto případě vyšly velice podobně, popřípadě lépe.

Parametr, který mohl mít vliv na naměřené výsledky a nebyl považován za významný, byla teplota etalonu. Přesněji rozdíl teploty etalonu od teploty, na kterou byl stroj kalibrován. Během kompenzace polohy byla teplota materiálu 22,3 $^{\circ}\text{C}$, na kterou byl stroj kompenzován. Doplňující měření ukázalo, že etalon se od osvětlení pracovního prostoru ohřeje o přibližně 0,3 $^{\circ}\text{C}$, viz obr. 69 na 22,6 $^{\circ}\text{C}$. Což vede k jeho prodloužení, při teoretické tepelné roztažnosti etalonu 12 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$, z 399,99908 mm na 400,000224 mm, což například u kompenzace polohy a kolmosti v poloze dole změní výslednou toleranci měření z 0,0478 mm na 0,0323 mm.



Obr. 69 Ohřev etalonu vlivem osvětlení pracovního prostoru

Pro tyto rozměry je měření značně ovlivněno teplotou stroje stejně tak prostředí, ve kterém je měření prováděno. Neznamená to, že docházelo k extrémním výkyvům teplot, nicméně i změna o 1 °C hraje zásadní roli. V případě, že by byla měřena teplota etalonu během měření, bylo by možné následně korigovat jeho reálnou délku, a tím dosáhnout pravděpodobně ještě nižších tolerancí měření, aniž by bylo nutné použít teplotně stabilní pracoviště. Toto tvrzení je založeno i na skutečnosti, že naměřené hodnoty v ose y jsou pokaždé vyšší, než je délka kalibrovaného etalonu, stejně tak rozptyl měření je řádově nižší.

Co se týče použití jednotlivých kompenzací, každá má své výhody i nevýhody. Samotná kompenzace polohy není časově náročná a je možné s ní dosáhnout značného zlepšení. Je však aplikovatelná pouze na konkrétní osu. Stejně tomu je i u kompenzace kolmosti, kterou je možné mít aktivovanou zároveň. V poslední řadě volumetrická kompenzace. Jedná se o metodu, která je časově náročnější na určení a zavedení kompenzačních hodnot, jelikož dochází k proměření většiny pracovního prostoru, to však nese výhodu v tom, že je možné uskutečňovat měření ve všech osách libovolně v prostoru a lze očekávat stejné výsledky.

Závěr

Celá práce je rozdělena do několika částí. Úvod práce je věnován popsání současného stavu techniky tak, aby byl čtenář seznámen s technologií obrobkových sond a s aplikací elektronických kompenzací. Následuje pak ještě popis techniky, která byla použita pro praktickou část práce.

Následuje vlastní část práce. Nejdříve byly určeny postupy s cílem ověření způsobilosti měření na obráběcích strojích pomocí obrobkové sondy tak, aby mohla být jednotlivá měření identická, stejně tak aby je bylo možné zopakovat ve stejné sekvenci.

Úvodní měření v ose x však ukázalo, že pouhá kompenzace bez pochopení fungování konkrétního stroje nestačí, a i když měřicí zařízení ukazovalo vyšší přesnost polohování, výsledky tolerance měření obrobkovou sondou na délkovém etalonu byly horší. Na základě následného zkoumání stroje se přešlo k měření v ose y, které už vykazovalo očekávané chování a to tedy, že použití vhodných kompenzací má vliv na velikost tolerančního pole měření, kdy jej bylo možné zmenšit na polovinu, a to i v případě, že nebyla kompenzována teplota etalonu.

Je možné říct, že měření začíná narážet na skutečnost, že není prováděno v teplotně kontrolované místnosti. Toto je však v některých případech finančně nákladné nebo nereálné. Bylo by však možné vytvořit model, na základě kterého by se online kompenzovala délka etalonu na základě jeho teploty, stejně pak i velikost obrobku během měření.

Pokračování ve vývoji těchto postupů by mohlo být předmětem další práce. Bylo by vhodné doplnit toleranci měření o regresní funkci, která by popisovala přesnost měření v celém rozsahu osy za použití měření více etalonů. Následně by bylo vhodné celý proces měření a vyhodnocení automatizovat bez použití externí techniky. K tomu by bylo potřeba vyvinout software, který by bylo možné aplikovat přímo do řídicího systému SIEMENS. Tato aplikace by následně sloužila k získání dat a následnému vyhodnocení tolerance měření přímo na stroji a celý proces by tak byl pro běžné uživatele daleko jasnější a přehlednější a zároveň celý proces by se výrazně urychlil.

9 Zusammenfassung der Arbeit in Deutsch Sprache

9.1 Einleitung

Heutzutage wird immer mehr Wert auf die Produktivität und Genauigkeit der Produktion gelegt. Bei der Präzisionsbearbeitung ist ein integraler Bestandteil des Produktionsprozesses - die Überprüfung der Form- und Maßhaltigkeit von Werkstücken. Für diese Prüfung direkt am Bearbeitungszentrum wird ein Werkstücktaster eingesetzt. Dank des Einsatzes des Werkstücktasters direkt im Produktionsprozess auf dem Bearbeitungszentrum ist es möglich, die Produktion zu optimieren und damit wettbewerbsfähiger zu sein.

Dieser Prozess gewinnt immer mehr an Bedeutung, da der Schwerpunkt auf der zunehmenden Automatisierung in der Produktion und der Reduzierung von Stillstandszeiten durch das Transportieren des Werkstücks zum Messzentrum liegt. Es ist notwendig, diesen Prüfprozess nicht nur in Bezug auf die Genauigkeit und Wiederholbarkeit des Werkstückmesstasters zu betrachten, sondern auch in Bezug auf die Genauigkeit und Wiederholbarkeit des Bearbeitungszentrums, das den Flaschenhals des Prozesses darstellen kann. Die mit dem Werkstückmesstaster auf dem CNC-Bearbeitungszentrum ermittelten Maße sind in der Regel indikativ oder relativ, da ihnen grundlegende Maßtoleranzen fehlen und sie daher nicht zur Deklaration von Werkstückmaßen verwendet werden können. Durch die Einführung von Messverfahren für CNC-Bearbeitungszentren mit eindeutigen Toleranzen werden die Anforderungen an den Bediener reduziert und damit das Risiko menschlicher Fehler verringert.

Diese Arbeit befasst sich mit der Erstellung von Verfahren zur Ermittlung der Messtoleranz einer ausgewählten Maschine mittels eines Werkstücktasters. Anschließend wird der Einfluss von ausgewählten elektronischen Kompensationen auf diesen Wert untersucht. Genauer gesagt, welche der elektronischen Kompensationen den besten Einfluss auf die Messfähigkeit eines Werkstücktasters selbst hat. Es wurde ein Verfahren erstellt, das die Anwendung der Kompensationen selbst auf eine bestimmte Maschine beschreibt, sowie die Vorgehensweise zur Ermittlung der Messtoleranz.

Dieses Verfahren wurde anschließend auf der Maschine MCV 754 QUICK der Firma Kovosvit getestet und abgestimmt. Diese Maschine befindet sich in den Labors des Lehrstuhls für Produktionsmaschinen, Systeme und Robotik, der der Fakultät für Maschinenbau an der Technischen Universität Brünn untersteht. Anschließend wird ein Verfahren zur langfristigen Verifizierung der Ergebnisse an der Maschine MCV 1220 von TAJMAC-ZPS vorbereitet.

9.2 Stand der Technik

Werkstückmesstaster (im Folgenden nur Messtaster) sind heute ein fester Bestandteil von CNC-Werkzeugmaschinen und haben ihren Einsatz in allen Phasen des Bearbeitungsprozesses. Es ist einen Schalter, der so konzipiert ist, dass er bei Kontakt mit der Werkstückoberfläche aktiviert wird. Der Vorteil ist eine bessere Wirtschaftlichkeit der Produktion, dank derer sich ihr Einsatz ständig erweitert. Messtaster für Werkzeugmaschinen können in Messtaster unterteilt werden. [1]:

- zum Messen des Werkstücks
- für die Werkzeugkontrolle
- Scanner Maschinen zur Erstellung von 3D-Modellen aus physischen Objekten

9.2.1 Die Funktionsweise der Werkstück-Messtaster

Zur Vermessung von Werkstücken werden Messzyklen für die Messtaster verwendet, in denen die Tastwege definiert sind. Bei Berührung oder Kollision mit einem Objekt wird ein Abtastsignal erzeugt. Die gewonnenen Daten werden anschließend verarbeitet, um die Position des gemessenen Elements zu berechnen. [1]

Der Messtaster wird, wie bei anderen Werkzeugen auch, mittels einer Spannmittel. Wenn die Tastkugel mit dem Werkstück in Berührung kommt, wird die Schaft ausgelenkt und eine Berührung erkannt, siehe Abb. 1. Das Signal wird dann an die Maschinensteuerung zur weiteren Verarbeitung weitergeleitet.

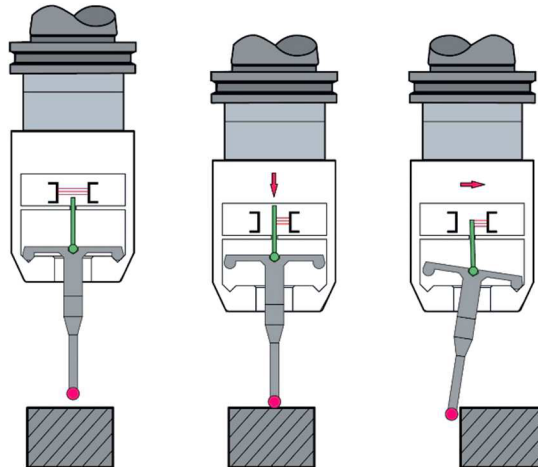


Abb. 1 Design der Werkstücksonde, entnommen aus [28], modifiziert

Werkstücktaster haben unterschiedliche Bauformen. Die Wahl der Bauform hängt dann hauptsächlich von der Verwendung ab. Die Detektion der durch den Kontakt verursachten Schaftauslenkung kann auf verschiedene Arten erfolgen. Diese Methoden sind:

- Optischer Sensor
- Drucksensor
- Widerstandssensor
- Dehnungsmessstreifen-Sensor

Es wurde ein Vergleich der verschiedenen Mechanismen durchgeführt, siehe Tabelle 1. Es wurden Messtaster ähnlicher Größe gewählt, die auch nahe an den Parametern des Renishaw-DMS-Werkstückmesstasters liegen, der später bei den Experimenten verwendet wurde, mehr in Kapitel 9.4.

Tabelle 1 Vergleich der Parameter ausgewählter Werkstücksonden, Schaftlänge 50 mm

	Heidenhain TS750 [5]	Heidenhain TS740 [6]	Renishaw OPM60 [7]	Renishaw OMP400 [8]
Erkennungsmechanismus	Optisch	Druck	Resistiv	Tensometrisch
Schaltkraft	X/Y = 0,2 N Z = 1,5 N	X/Y = 0,2 N Z = 0,6 N	X/Y = 0,75 N Z = 5,3 N	X/Y = 0,06 N Z = 2,55 N
Wiederholbarkeit der Messung (2σ)	0,25 μm	0,25 μm	1.00 μm	0,25 μm

Die technischen Parameter ausgewählter Vertreter unterscheiden sich in den meisten Fällen nicht wesentlich, der größte Unterschied ergibt sich dank der RENGAGE-Technologie im Falle einer Dehnungsmessstreifen-Sonde, bei der eine hohe Empfindlichkeit erreicht wird, was zu einer geringeren Durchbiegung und Verformung der Schaft während der Messung führt. Die Wiederholgenauigkeit der Sondenmessung wird in der Folge geringer.

Folgende Varianten werden verwendet, um Informationen vom Werkstücktaster an die Maschinensteuerung zu übertragen:

- **Ein optisches System**, das die Infrarottechnologie zur Kommunikation zwischen dem Steuersystem und der Messtaster nutzt. [9]
- **Funksystem**, es arbeitet auf einer ähnlichen Anordnung wie das optische System, aber die Datenübertragung zwischen der Messtaster und dem Steuerungssystem der Maschine erfolgt über Funkwellen. [9]
- **Das Kabelsystem** ist eine sehr einfache und zuverlässige Form der Signalübertragung. Das Messtaster ist über ein Kabel physikalisch mit der Steuerung verbunden und wird von dieser auch mit Strom versorgt. [9]

Die Kugel berührt das Werkstück selbst mit Hilfe eines Schaftes. Die Performance bzw. Genauigkeit des Messtasters sind direkt durch die Eigenschaften der Kugel beeinflusst. Dies kann z. B. die falsche Geometrie der Kugel, ihre falsche Platzierung oder eine ungeeignete Schaftgestaltung sein, die eine übermäßige Auslenkung während der Messung zulässt. [10] Mögliche Materialien, aus denen der Tastkugel hergestellt wird, sind:

- **Rubin** ist eines der härtesten Materialien. Im Falle von synthetischem Rubin ist es Aluminiumoxid. Rubinkugeln haben eine glatte Oberfläche, sind druckfest und haben eine hohe Beständigkeit gegen mechanische Beschädigungen. Er erfüllt die meisten industriellen Anforderungen und wird für die meisten Operationen verwendet. [11]
- **Siliziumnitrid**, ein sehr hartes, verschleißfestes Material, das zu präzisen Kugelformen bearbeitet werden kann. Es eignet sich besonders für das Abtasten von Aluminium, da es keinen adhäsiven Abrieb gibt, aber beim Abtasten von Stahl kommt es zu erheblichem Verschleiß. [11]
- **Zirkoniumdioxid** ist ein sehr hartes keramisches Material, das in seiner Härte und Verschleißfestigkeit den Eigenschaften von Rubin nahekommt. Es ist daher für Scananwendungen geeignet. [11]

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Form des Tasters. Die Verwendung bestimmter Typen hängt hauptsächlich von der Messanwendung ab. Mögliche Typen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

- **Der kugelförmige** Tastereinsatz ist der einfachste und am weitesten verbreitete Tastereinsatztyp, da er für die meisten Arbeitsgänge verwendet werden kann. Wie bereits erwähnt, kann der Tastereinsatz mit Kugeln aus verschiedenen Materialien ausgestattet sein. [12]
- **Der zylindrische** Taststift wird nur in bestimmten Situationen eingesetzt. Er eignet sich besonders zum Messen von Bohrungen in Blechen, Pressteilen und dünnen Werkstücken. Eine weitere Einsatzmöglichkeit ist das Messen von Gewinden und die Lage der Mitte von Gewindebohrungen. [12]
- **Disc-Taster**, dieser Taster besteht aus einer Kugel und wird zum Abtasten von Nuten und Rillen in Bohrungen verwendet, bei denen die Verwendung eines herkömmlichen Kugeltasters nicht möglich ist. [12]

Werkstücktaster werden im gesamten Produktionsprozess eingesetzt. Sie haben ihre Anwendung beim Einrichten des Werkstücks und bei der Bestimmung der Nullpunkte für die folgenden Operationen, während des Bearbeitungsprozesses. Wenn es möglich ist, eine kontinuierliche Maßkontrolle im finalen Teil der Produktion durchzuführen, wenn die Maße des gefertigten Teils mit einem Werkstücktaster diagnostiziert werden können. [3] Alle diese Verfahren bestehen darin, dass die Punkte abgetastet und anschließend mit einer Linie oder Kurve verschachtelt werden. Messzyklen sind allgemeine Unterprogramme zur Lösung gegebener Messaufgaben, sie können über Parameter an die gegebenen Anforderungen angepasst werden. Für die Zwecke dieser Arbeit und die Messung der Länge des Endmaßes wurden zwei SIEMENS-Zyklen verwendet, nämlich Zyklus 978 und Zyklus 977. Der Zyklus 978 dient zur Ermittlung der Kante, siehe Abb. 2. Es ist daher möglich, die Positionen der Kanten des Endmaßes zu bestimmen und dann seine Länge zu berechnen.

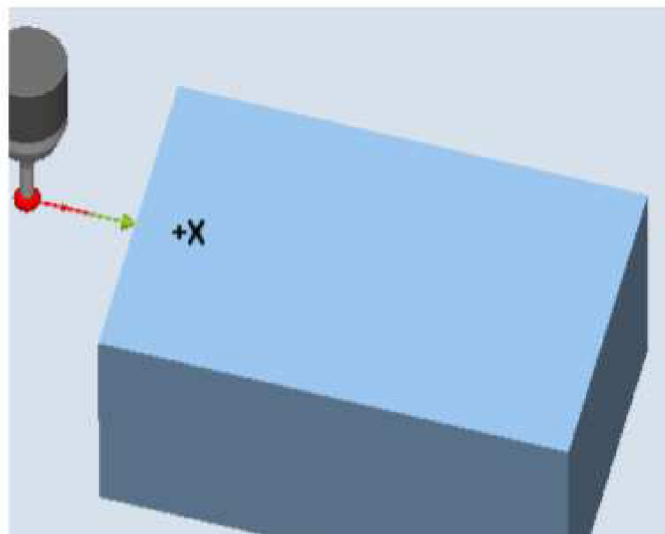


Abb. 2 Zyklus 978, Kantenbestimmung [14]

Im Falle des Zyklus 977 ist es ein Tool zum Messen einer Bohrung, Welle, Rille oder Rippe, siehe Abb. 3. Ausgehend von der gewählten Messachse und dem Beginn der Messung ermittelt das System zwei Punkte an gegenüberliegenden Kanten und berechnet die Breite der Rippe, in diesem Fall die Länge des Endmaßes.

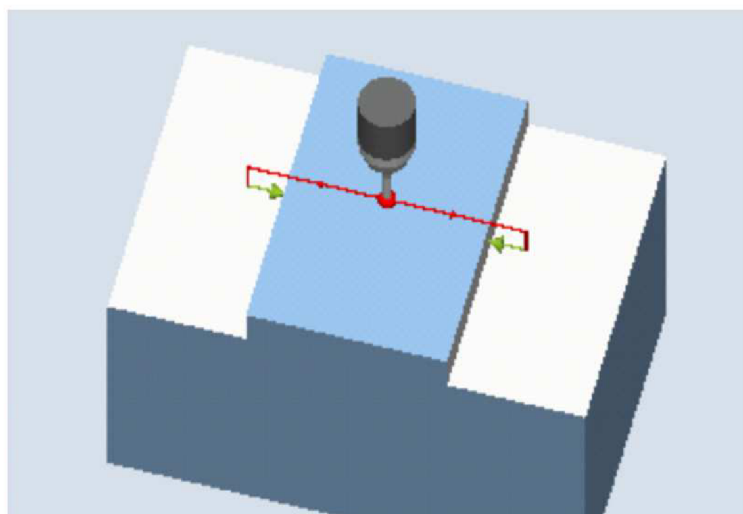


Abb. 3 Zyklus 977, Bestimmung der Einheitslänge

9.2.2 Geometrische Genauigkeit der Maschine

Durch das kontinuierliche Wachstum der industriellen Produktion wachsen auch die Anforderungen an die Parameter der bearbeiteten Bauteile und damit an die Bearbeitungszentren selbst. In den meisten Fällen sind dies Anforderungen an die Produktivität und Qualität der Arbeit. Den größten Einfluss auf diese Anforderungen hat der mechanische Teil der Maschine. Jede lineare Achse hat 6 Freiheitsgrade, gemäß der Norm ČSN ISO 230-1. Dies beeinflusst die geometrische Gesamtgenauigkeit der Maschine. Eine typische dreiachsige CNC-Werkzeugmaschine kann daher bis zu 21 geometrische Fehler aufweisen, siehe Abb. 4. Diese Fehler sind:

- 3x3 Translationsfehler (linearer Vorschub)
- 3x3 Winkelfehler
- 3 Rechtwinkligkeitsfehler zwischen einzelnen Achsen (X-Y, X-Z, Y-Z)

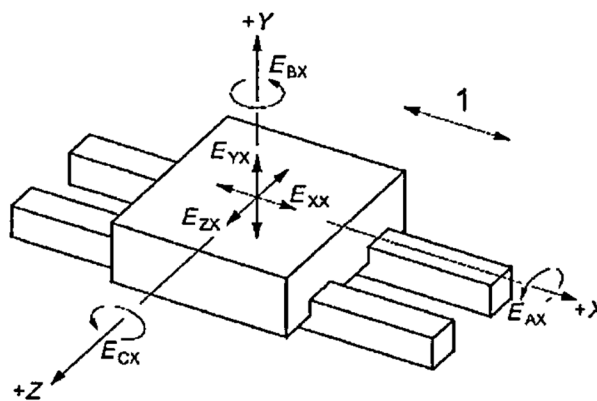


Abb. 4 Freiheitsgrade der linearen X-Achse, nach ISO 230-1 [15]

Für eine Beschreibung der einzelnen Fehler für die lineare X-Achse, siehe Tabelle 2

Tabelle 2 Fehlerbeschreibung für die lineare X-Achse [15]

EXX – Positionierungsfehler	EAX – Winkelfehler des Kippens um die X-Achse
EXY – Geradheitsfehler in Richtung der Y-Achse	EBX – Winkelfehler des Kippens um die Y-Achse
EXZ – Geradheitsfehler in Richtung der Z-Achse	ECX – Winkelfehler des Kippens um die Z-Achse

Die Genauigkeit von Produktionsmaschinen wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Fehlerquellen beschrieben, die die Genauigkeit der relativen Position des Werkzeugs beeinflussen.

- Kinematische Fehler werden durch die unvollkommene Form von Funktionskomponenten und deren Position zueinander verursacht. Im Laufe der Zeit können sie verschleifen und dadurch kinematische Fehler verändern.
- Thermomechanische Fehler, diese werden durch die bei der Bearbeitung entstehende Wärme verursacht. Sie wirken sich direkt auf die Funktionsteile der Maschine aus. Auch Schwankungen der äußeren Umgebungstemperatur wirken sich auf die Maschine aus. Diese Temperaturänderungen führen dann zu einer Ausdehnung und Kontraktion der Funktionsteile der Maschine.

- Statische Belastung ist eine weitere Fehlerquelle. Es ist nicht möglich, dass die Maschine vollkommen starr ist, und aufgrund der statischen Belastung durch das Gewicht der Maschine selbst oder des Werkstücks treten Durchbiegungen der Teile der Maschine auf.
- Dynamische Belastungen werden während der Bearbeitung vom Werkzeug erzeugt, es können aber auch Kräfte sein, die durch Beschleunigung oder Verzögerung bei Vorschüben entstehen, sowie Vibrationen, die während des Betriebs erzeugt werden. [16]

Die Messung der Genauigkeit von Werkzeugmaschinen kann auf unterschiedliche Weise durchgeführt werden, wobei verschiedene Vorrichtungen und Geräte mit unterschiedlichen Einstellungen verwendet werden. Im folgenden Abschnitt werden die Messmethoden beschrieben, die bei den Versuchen verwendet wurden. Die Messdaten der geometrischen Genauigkeit müssen nicht nur als Indikator für den Maschinenzustand dienen. Sie können auch zur Verbesserung der Genauigkeit verwendet werden. Dies könnte mit Hilfe einer elektronischen Kompensation realisiert werden, die in die Maschinensoftware eingegeben werden kann. Diese Möglichkeit ist heute Bestandteil der meisten CNC-Werkzeugmaschinen. [15]

Für ein Beispiel der geometrischen Kompensation, siehe Abb. 5. In diesem Fall handelt es sich um die Herstellung eines Lochs, im Idealfall wird es ohne Abweichungen hergestellt (von links), das mittlere Bild zeigt die geometrischen Fehler der Maschine und wie sie sich auf die endgültige Form auswirken, wodurch die Auswirkungen der geometrischen Fehler gemildert werden (rechtes Bild).

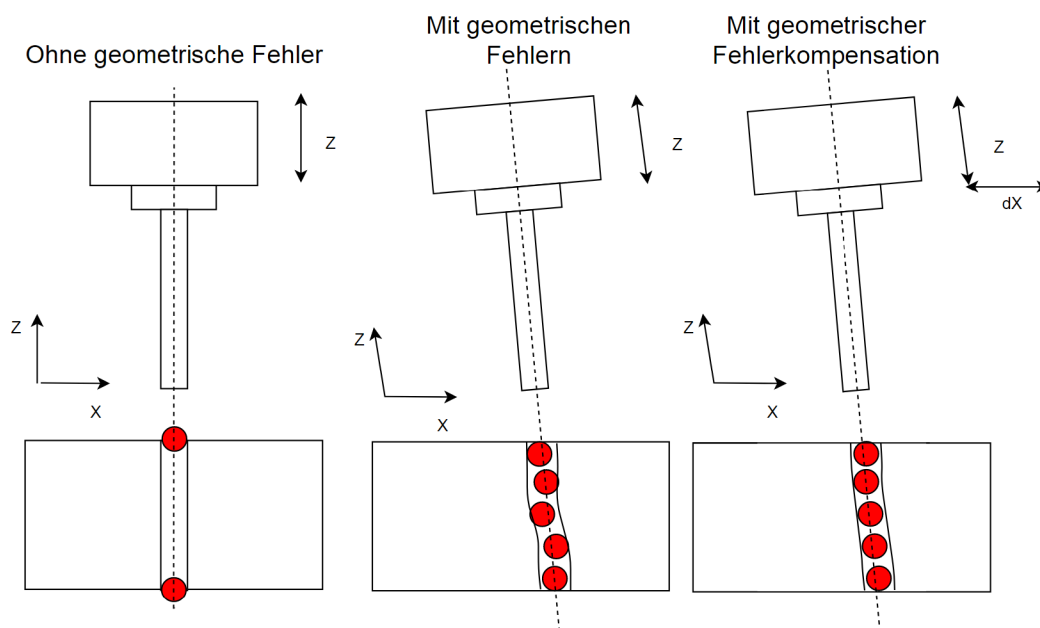


Abb. 5 Schematische Darstellung des allgemeinen Prinzips der Kompensation, entnommen aus [15], modifiziert

Positioniergenauigkeit, es ist die Genauigkeit und Wiederholbarkeit des Anfahrens der gewünschten Koordinate auf der Linearachse. Die Prüfung kann z.B. nach ČSN ISO 230-2 oder VDI / DGQ 3441 durchgeführt werden. Für die Messung selbst wurde ein Renishaw XL-80-Gerät mit einer linearen Messgenauigkeit von $\pm 0,5$ ppm in Kombination mit einer XC-80-

Einheit zur Kompensation von Umwelteinflüssen wie Temperatur, Feuchtigkeit und Umgebungsluftdruck sowie der Temperatur der Maschine selbst verwendet. Es ist dann möglich, die Abweichung von diesen Werten zu berechnen. Die gesamte Messung wird im unbelasteten Zustand, in einer geeigneten thermischen Umgebung durchgeführt. Die Daten werden anschließend mit der Software CARTO verarbeitet. Dabei handelt es sich um ein frei verfügbares Produkt von Renishaw. Mit diesem Programm werden die Messwerte angezeigt und die Kompensationswerte nach den gewählten Normen ermittelt, die dann als ENC-Kompensation in die Maschinensteuerung eingegeben werden können.

Die Genauigkeit der Kreisinterpolation und deren Auswertung wird z.B. durch die Norm ČSN ISO 230-4 beschrieben. Die Messung dient zur Auswertung der Fähigkeit der Maschine, Kreisbahnen mit einem bestimmten Durchmesser zu interpolieren, wobei Fehler dazu führen, dass der Radius des Kreises von dem programmierten Kreis abweicht. Im Falle einer Vertikalfräsmaschine handelt es sich also um eine Kombination aus der Bewegung zweier Linearachsen. Es können z.B. Geradheits-, Spiel-, Umkehrspitzen oder Rechtwinkligkeitsfehler auftreten. Um diese zu messen, kann zum Beispiel ein Double Ballbar verwendet werden. Es ist ein Messgerät, das aus drei Teilen besteht. Als Basis dienen zwei Magnethalter, von denen einer auf der Maschinenspindel und der andere auf dem Maschinentisch angebracht ist. Zwischen diesen Basen wird dann ein Linearsensor eingesetzt. Aus den gemessenen Daten wird der Gesamtwert der Genauigkeit, nämlich die Rundheit, mit der Software Ballbar 20 nach der gewählten Norm berechnet. Die Werte können dann als CEC-Kompensation in die Maschinensteuerung eingegeben werden.

Die volumetrische Messung ist eine komplexe Diagnose der Maschinengeometrie. In dem ausgewählten Bereich, im Falle eines 3-Achsen-Bearbeitungszentrums, ist es möglich, alle 21 Fehler zu messen und anschließend zu kompensieren. Diese Abweichungen können mit einem LaserTRACE-Gerät (weiter LTc) gemessen werden. Das Messprinzip basiert auf der Multilateration. Dabei wird die Position des Objekts im Raum aus den vier gemessenen Längen, die von definierten Positionen aus aufgenommen wurden, mit Hilfe eines Laserstrahls bestimmt. Der auf dem Arbeitstisch der Maschine befindliche LTc sendet einen Strahl aus, der in den Reflektor gerichtet wird. Der Reflektor befindet sich in der Maschinenspindel. Die Fehler werden dann durch eine Vektorkarte der Abweichungen dargestellt.

9.3 Präzisierung der Aufgabestellung

Das Ziel der Messung war es, die Messtoleranz der Maschine zu bestimmen und wie die einzelnen elektronischen Kompensationen die Messtoleranz beeinflussen. Die abschließende Messung fand nur in einer Achse statt. Die möglichen Achsen waren X und Y, da es möglich war, die Position mit der entsprechenden Vorrichtung zu kompensieren. Zunächst wurde eine Sondiermessung durchgeführt, die zeigen sollte, welche geometrischen Fehler in die Messung eingehen, ob sie konstant sind und die Hauptmessung beeinflussen können. Anhand der aus der Vormessung gewonnenen Daten wurde die Achse ausgewählt, in der die Hauptmessung durchgeführt wurde. Die Hauptmessung bestand aus mehreren Maschinenkonfigurationen in zwei verschiedenen Höhen der Z-Achse, siehe Tabelle 3.

Tabelle 3 Konfiguration der Einzelmessungen der Hauptmessung

Konfiguration der Maschine	Höhe in der Z-Achse vom Tisch	
	Z = 55 mm	Z = 195 mm
Keine Kompensation	X	X
ENC-Kompensation	X	X
ENC + CEC Kompensation	X	X
Volumetrische Kompensation	X	X

Die einzelnen Maschinenkonfigurationen wurden aufgrund der vorhandenen Ausstattung ausgewählt. Es wäre jedoch möglich, z. B. nur mit aktiver Rechtwinkligkeitskompensation CEC zu messen, es wurde jedoch angenommen, dass die Rechtwinkligkeitskompensation selbst keinen Einfluss auf die gegebene Art der Messung hat. Verschiedene Höhen Z wurden gewählt, um die Abhängigkeit der Messung von der Höhe zu beurteilen, ob signifikante Änderungen auftreten oder nicht. Der VDA 5-Standard wurde für die Auswertung vor allem wegen seiner Einfachheit und leichten Anwendbarkeit gewählt. Die VDA 5-Norm schreibt eine Mindestanzahl von 25 Maßen vor, um die Messtoleranz zu bestimmen. Insgesamt wurden jeweils 30 Dimensionen gemessen. Diese Anzahl wurde in Abhängigkeit von dem möglichen Verlust einiger Daten aufgrund ihrer Übertragung an externe Geräte über das interne Wi-Fi-Netzwerk gewählt.

Die Versuche wurden auf einer dreiachsigen Fräsmaschine MCV 754 QUICK von Kovosvit Mas durchgeführt. Die MCV-Baureihe ist auf einem C-förmigen Gestell aufgebaut, siehe Abb. 6. Technische Daten der Maschine, siehe Tabelle 4

Tabelle 4 Technische Daten MCV 754 QUICK [2]

<i>1. Maschinenbett</i>
<i>2. Aufspannfläche des Tisches 1 000×500</i>
<i>3. Linear-Wälzführung - X-Achse – Länge 754 mm</i>
<i>4. Linear-Wälzführung – Y-Achse – Länge 500 mm</i>
<i>5. Linear-Wälzführung – Z Achse – Länge 550 mm</i>
<i>6. Max. Tischbelastung - 400 kg</i>
<i>7. Spindelstock</i>

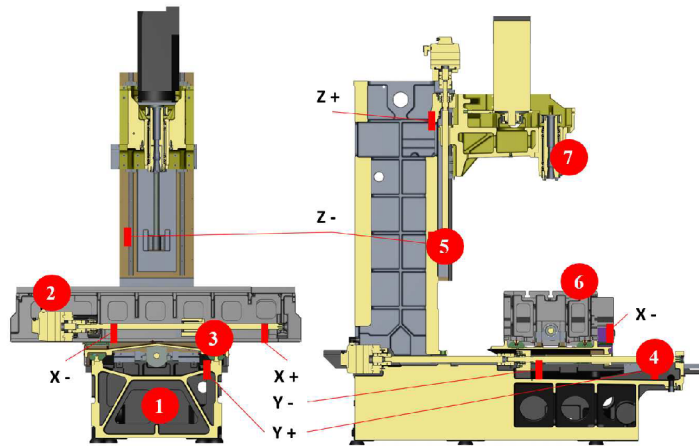


Abb. 6 Grundkonzept des MCV 754 QUICK [2]

9.4 Experimenteller Teil

In diesem Kapitel werden die einzelnen Iterationen der Messungen beschrieben, die bei den Tests am MCV QUICK 754 mit den zuvor genannten Geräten und zur Verifizierung der oben genannten Ziele durchgeführt wurden.

Die Messwerte erhalten Sie von der Maschine in Form einer Textdatei mit der Position der Berührung des Messtasters mit dem Endmaß, mit den Koordinaten X, Y, Z, bei Verwendung von Zyklus 978. Der erste Schritt besteht darin, den Vektor der gemessenen Längen zu bestimmen. Es wurden verschiedene Möglichkeiten der Berechnung getestet, um den Messfehler aufgrund des Endmaßeinstellfehlers zu reduzieren. Die Optionen können die folgenden sein:

- Methode für den Abstand zwischen zwei Punkten, siehe Abb. 7

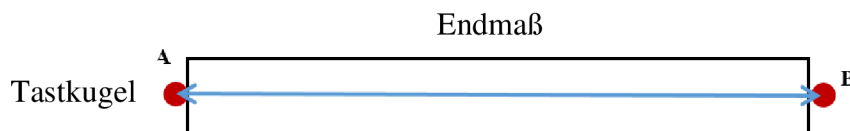


Abb. 7 Abstandsmethode mit zwei Punkten

- Methode für den Abstand zwischen Punkt und Linie, siehe Abb. 8

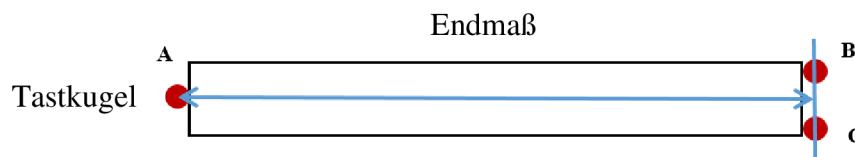


Abb. 8 Abstandsmethode mit Punkt und Linie

- Methode für den Abstand zwischen Punkt und Ebene, siehe Abb. 9

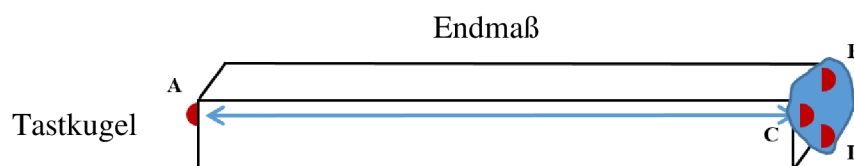


Abb. 9 Abstandsmethode mit Punkt und Ebene

Die Toleranzen werden nach den in VDI 5 angegebenen Verfahren berechnet. Die resultierende Toleranz gibt die Gesamtgröße des Toleranzfeldes an, siehe Abb. 10. Zur Berechnung der Toleranzfelder für einzelne Maschinenkonfigurationen wurde im Rahmen der Ausarbeitung der Diplomarbeit eine Anwendung in der Matlab-Umgebung erstellt, die eine schnelle Berechnung von Toleranzen und anderen Parametern ermöglicht.

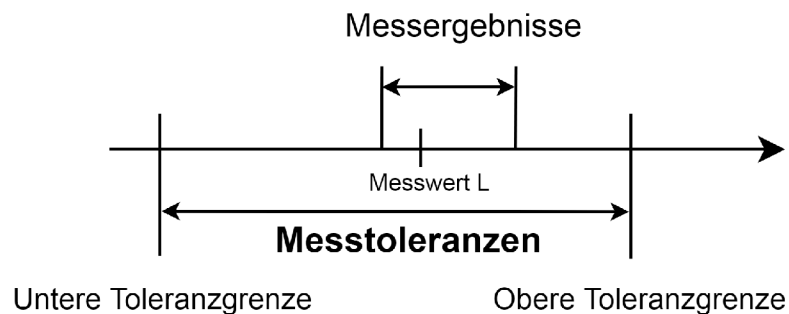


Abb. 10 Anzeige des Messtoleranzintervalls, entnommen aus [26], modifiziert

9.4.1 Messungen auf der X-Achse

Die Messung in der x-Achse wurde mit einem Endmaß (Johansson-Maß) mit einer kalibrierten Länge von 500,00256 mm in zwei Z-Höhen mit Zyklus 978 durchgeführt, siehe Kapitel 9.2.1. Auf jeder Seite wurden zwei Punktesätze mit 30 Wiederholungen an der Ober- und Unterkante des Endmaßes gemessen, siehe Abb. 11. Die Messung wurde in drei verschiedenen Maschineneinstellungen durchgeführt, ohne Kompensationen, mit Positionskompensation und mit Positions- und Rechtwinkligkeitskompensation.

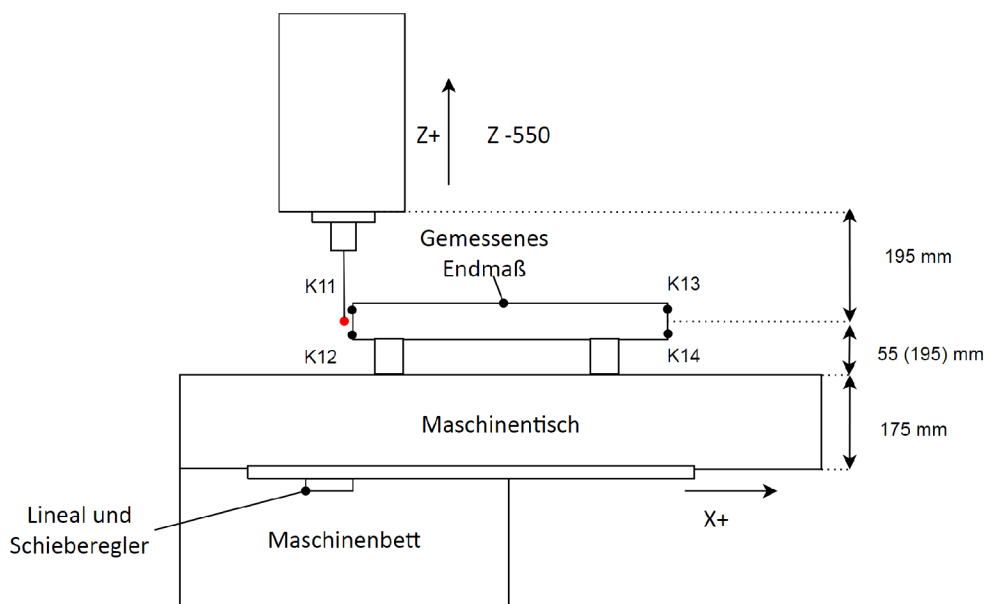


Abb. 11 Schema der Einstellung des Endmaßes für die Messung in der x-Achse

Die gemessenen Punkte wurden verarbeitet, die Längen zwischen zwei Punkten und zwischen einem Punkt und einer Linie wurden berechnet. Aus diesen Daten wurden dann mit der Anwendung die Messtoleranzen für die einzelnen Konfigurationen berechnet, die nach den in der VDI-Norm angegebenen Verfahren entwickelt wurden. Die Ergebnisse sind grafisch in Abb. 12.

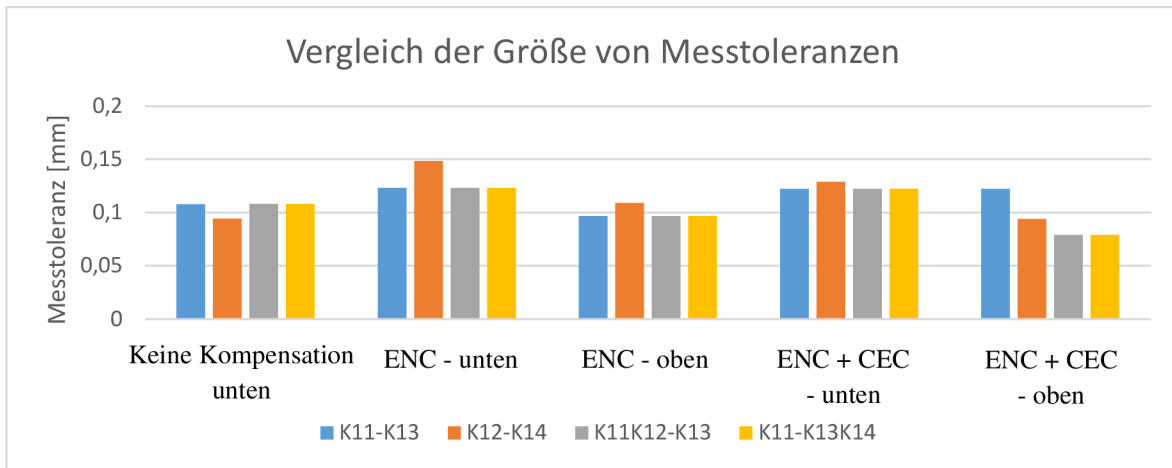


Abb. 12 Grafische Auswertung der Messtoleranz für die X-Achse

Es ist zu erkennen, dass die Messung mit einer Linie und einem Punkt, im Gegensatz zu der üblicherweise verwendeten Punkt und Punkt Methode, keine signifikante Änderung bringt, daher wird aufgrund der zeitaufwendigen Messung die Punkt und Ebene Methode nicht getestet und in der Folge werden diese beiden Methoden nicht für weitere Messungen verwendet. Außerdem kommt eine weitere Variable in die Messung, die resultierenden Mindesttoleranzen erhöhen sich bei aktiven Kompensationen. Dies war entgegen der ursprünglichen Annahme, dass aktive Kompensationen die Messungen verfeinern sollten. Zugleich sind die erhaltenen Toleranzen nicht konstant. Aus diesem Grund werden weitere experimentelle Messungen folgen, um diese Variable zu identifizieren oder zu versuchen, ein Modell des Verhaltens der Maschine aus den gemessenen Daten zu erstellen.

9.4.2 Untersuchende Messung des Maschinenverhaltens

Der erste Schritt war die Diagnose eines bestimmten Geräts. Ziel war es, die am MCV QUICK 754 gefundenen Geometriefehler zu ermitteln. Anhand der Messdaten konnte dann ermittelt werden, was der eigentlichen Messung vorausgehen muss, aber auch zum Beispiel, welche Achse für die Messung besser geeignet ist.

Einer der Faktoren, der einen erheblichen Einfluss auf die Messwerte haben kann, ist die Temperatur der Maschine. Wenn die Messung an einer unvorbereiteten Maschine durchgeführt wird, werden Teile der Maschine während der Messung erwärmt und ihre geometrischen Eigenschaften ändern sich. In der Regel ist an der Maschine eine Temperaturtoleranz von ± 1 °C angegeben. Im Falle der Messung kann selbst diese Erwärmung der Maschine die Ergebnisse beeinflussen. Um den Effekt der Erwärmung der Maschine zu minimieren, wurde beschlossen, die Maschine vor jeder Messung auf die Arbeitstemperatur zu temperieren. Dies geschieht, indem der Heizzyklus ca. 30 Minuten vor Beginn der Messung gestartet wird. In Abb. 9 ist zu sehen, wie sich die Maschine aufheizt und sich die Temperaturen für die anschließende Messung stabilisieren.

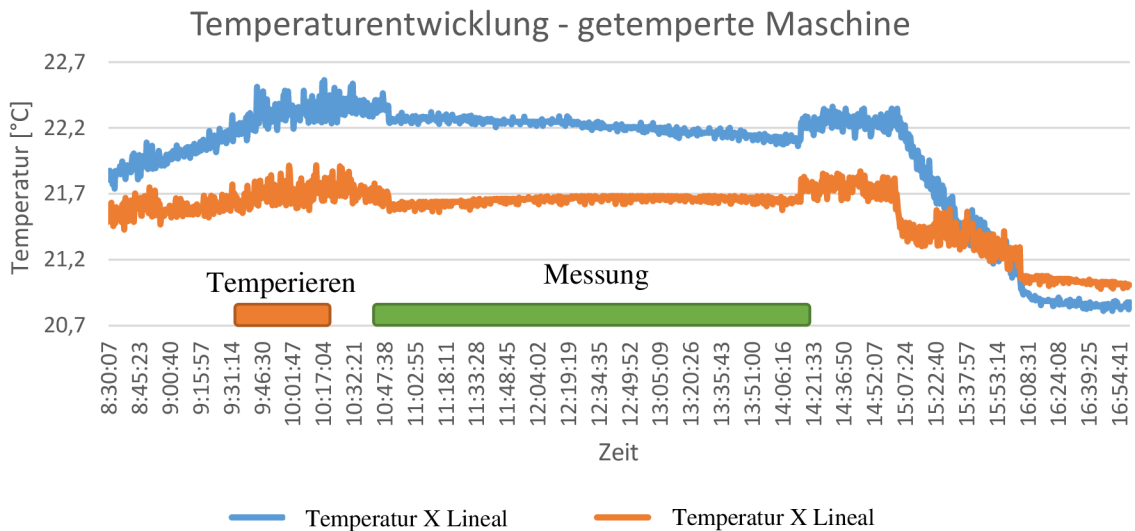


Abb. 13 Aufwärmen der Maschine und Stabilisierung auf Arbeitstemperatur

Die Rechtwinkligkeit der Z-Achse zum Kreuztisch wurde mit einem Granitblock und einer Messuhr mit einer Auflösung von $1\ \mu\text{m}$ gemessen. Die Messung ergab einen Rechtwinkligkeitsfehler der Z-Achse von ca. $148\ \mu\text{m}/\text{m}$. Dieser Wert wurde aus den Messergebnissen ermittelt, siehe Abb. 14. Die Achsauslenkung kann z. B. durch eine unsymmetrische Belastung aus dem Werkzeugmagazin verursacht werden. Die Messung zeigt aber auch, dass der Fehler der Rechtwinkligkeit der Z-Achse zur X-Achse nicht konstant ist. Dies wird höchstwahrscheinlich durch das Kippen des Kreuztisches unter seinem Eigengewicht verursacht. Dies wurde durch eine Messung mit einer digitalen Präzisionswasserwaage bestätigt.

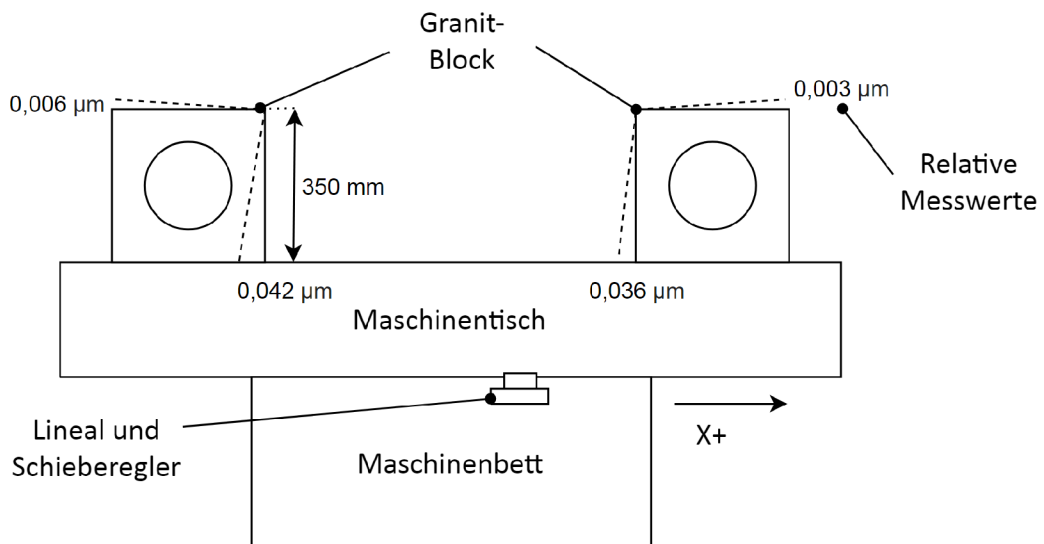


Abb. 14 Grafische Darstellung des Ergebnisses der Rechtwinkligkeitsmessung in der XZ-Ebene

9.4.3 Messungen auf der Y-Achse

Bei den Messungen in der Y-Achse konnte aufgrund der Größe des Arbeitsraums ein Endmaß mit einer maximalen Länge von 400 mm verwendet werden. Die Messung wurde ohne Kompensationen, mit aktivierter Positionskompensation, mit aktiver Positions- und Rechtwinkligkeitskompensation und volumetrischer Kompensation durchgeführt. Es wurden zwei Sätze von Messungen in Abhängigkeit von der Höhe in der Z-Achse durchgeführt, nämlich 55 und 195 mm, siehe Abb. 15.

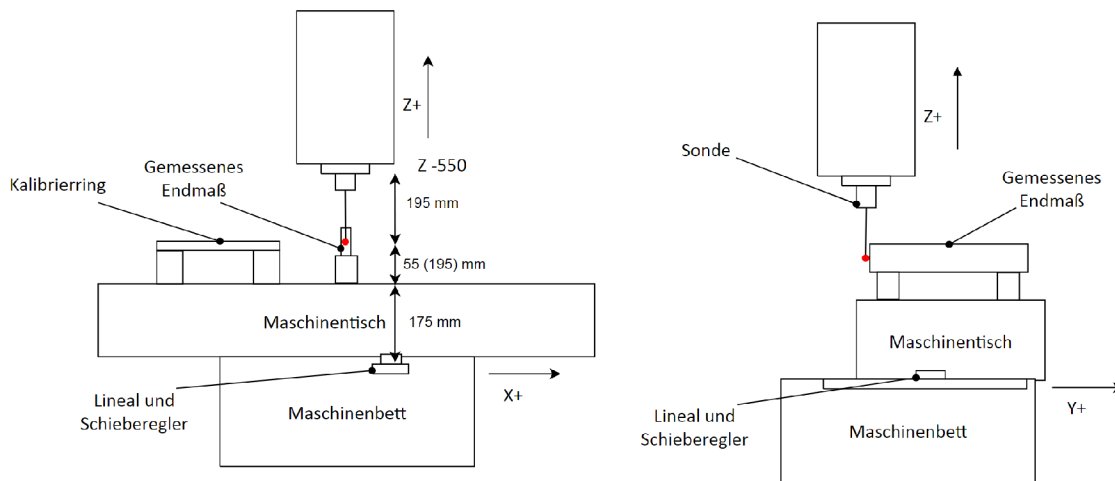


Abb. 15 Schema der Einstellung des Endmaßes, Kalibrierring, Dimensionen

Messergebnisse vor und nach elektronischer Y-Achsen-Positionskompensation. Getestetes Intervall von $y = 10$ mm bis $x = 490$ mm Schrittweite war 48 mm. In Abb. 16 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt. Die rote Kurve stellt die Positionsabweichungen vor der Positionskompensation dar und anschließend die grüne Kurve die Abweichung nach der Positionskompensation. Bei einigen Positionen wurde die Positioniergenauigkeit um ca. $8 \mu\text{m}$ verbessert.

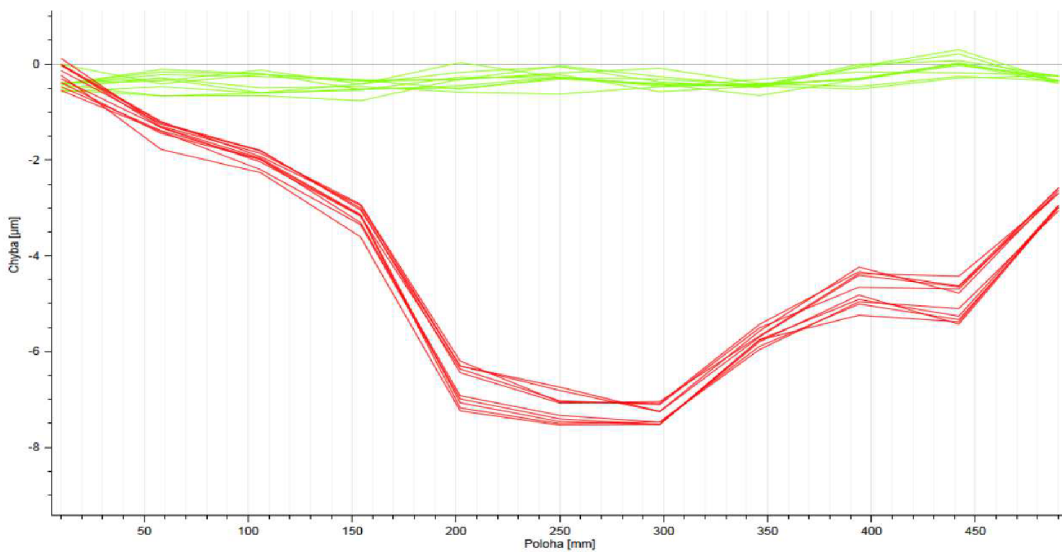


Abb. 16 Vergleich der Positionierungsgenauigkeit der Y-Achse vor (rot) und nach (grün) der Kompensation

Der Rechtwinkligkeitsfehler der Achsen in der YZ-Ebene wurde mit einem Double Ballbar gemessen. Der Fehler der Rechtwinkligkeit der Y-Achse zur Z-Achse beträgt ca. $52 \mu\text{m/m}$. Basierend auf den gemessenen Daten konnten Kompensationskonstanten generiert und in das System eingegeben werden. Verifikationsmessungen ergaben einen Fehler in der Rechtwinkligkeit von $1,9 \mu\text{m/m}$.

Die volumetrische Kompensation bestand aus Diagnose- und Verifikationsmessungen mit einem LTC-Gerät von ETALON. In diesem Fall wurden alle 21 geometrischen Fehler kompensiert. In Abb. 17 ist eine grafische Auswertung der geometrischen Genauigkeit vor der Einführung von Kompensationen, und Abb. 18 zeigt eine grafische Auswertung der geometrischen Genauigkeit nach Aktivierung der volumetrischen Kompensation.

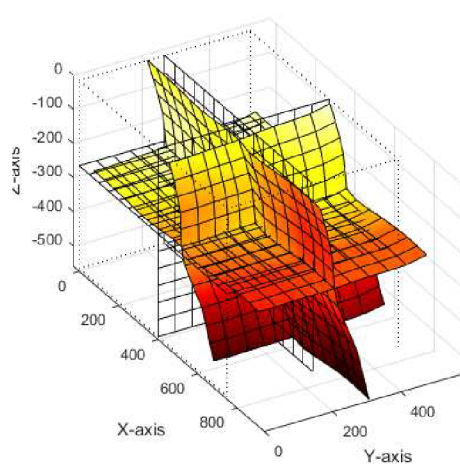


Abb. 17 Kalibrierungsmessung für die volumetrische Kompensation

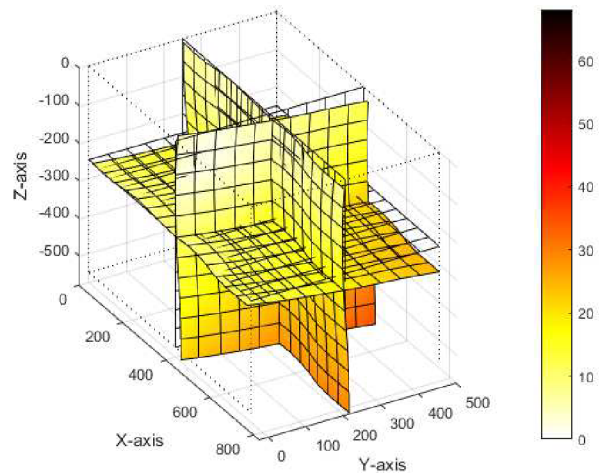


Abb. 18 Verifikationsmessung nach volumetrischer Kompensation

Die Messung wurde mit Zyklus 977 und Endmaß mit einer kalibrierten Länge von $399,99908 \text{ mm}$ durchgeführt. Die Messdaten wurden verarbeitet und die gemessenen Messtoleranzen wurden berechnet. Die Daten sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5 Messdaten in der Y-Achse, Endmaß = 399,99908 mm

Konfiguration	Mittelwert [mm]	Standard- abweichung [μm]	Abweichung zwischen gemessener und kalibrierter Länge [μm]	Messtoleranzen [mm]
Keine Kompensation $z=55\text{ mm}$	400,00538	0,211093	6,303057	0,098729
Keine Kompensation $z=195\text{ mm}$	400,0088	0,235729	9,741981	0,15115256
ENC – $z=55\text{ mm}$	400,00218	0,266465	3,104352	0,051333
ENC – $z=195\text{ mm}$	400,00231	0,322875	3,236655	0,053235
ENC a CEC – $z=55\text{ mm}$	400,00193	0,358262	2,85313	0,047753
ENC a CEC – $z=195\text{ mm}$	400,00244	0,175898	3,363018	0,0550606
Volumetrische Komp. $z=55\text{ mm}$	400,00515	0,213682	6,076943	0,095417
Volumetrische Komp. $z=195\text{ mm}$	400,00445	0,158085	5,37097	0,084786

Bei Werten ohne Kompensationen wurde ein relativ großer Unterschied der Werte in den einzelnen Höhen gemessen. Dies kann an der Art der Messung liegen, da nach der Ermittlung aller Kompensationskonstanten die Messung für die einzelnen Konfigurationen unten durchgeführt wurde und anschließend das Endmaß mit dem Kalibrierring in die obere Position versetzt wurde, wo die Messung erneut für alle Konfigurationen durchgeführt wurde. Diese Vorgehensweise wurde aufgrund des Zeitaufwands für die Justierung des Endmaßes gewählt.

Bei der aktiven Lagekompensation wurde die Messtoleranz verbessert, wobei für beide Messhöhen nach VDA 5-Norm die Messtoleranz ca. 0,052 mm beträgt. Die aktive Positions- und Rechtwinkligkeitskompensation bringt keine signifikante Verbesserung im Vergleich zur aktiven Positionskompensation allein.

Bei der volumetrischen Kompensation ist wiederum eine Verbesserung der erreichten Messtoleranz, gegenüber der ursprünglichen unkompensierten Maschine, zu beobachten. Nach VDA 5 wurde eine Messtoleranz von ca. 0,09 mm und es wurde für beide Höhen erreicht.

Die Positionskompensation hat den größten Einfluss auf die erreichte Messtoleranz. Dies wurde vor allem dadurch erreicht, dass die Kompensation selbst an den Positionen durchgeführt wurde, an denen auch die Messung selbst stattfand, wodurch einige andere Fehler eliminiert wurden. Im Falle der volumetrischen Kompensation ist ebenfalls eine Verringerung des Toleranzfeldes zu beobachten. Aus den Tabellen ist jedoch nicht ersichtlich, dass diese Kompensation für einen großen Teil des Arbeitsraums eingestellt ist, so dass die Ergebnisse für jede Messposition ähnlich sein sollten, während dies im Falle der Positionskompensation nicht ganz möglich ist und die Messwerte je nach Lage des Endmaßes im Arbeitsraum variieren können.

9.4.4 Vergleich der angewandten Kompensationen für die Y-Achse

Tabelle 6 fasst die Unterschiede in den gemessenen Dimensionen bei Verwendung bestimmter Kompensationen zusammen.

Tabelle 6 Zusammenfassung der Kompensationswerte und die Auswirkung auf die gemessene Länge des Endmaßes

	Z = 55 mm	Z = 195 mm	Rechtwinkligkeit YZ	ENC- Positionierung
Standardmäßig gemessene Länge	400,011679	400,013226		
Keine Kompensation	0	0	46,2 µm/m	8,3 µm/0,5 m
ENC	-0,005022	-0,005246	46,2 µm/m	1 µm/0,5 m
CEC a ENC	-0,00344	-0,006495	0,5 µm/m	1 µm/0,5 m

Bei der Positionskompensation wird das Lineal in der Y-Achse "verlängert", dargestellt in Abb. 19. Die Abbildung zeigt, welche Ungenauigkeiten die Maschine beim Ablesen vom Lineal macht, wenn es nicht kompensiert ist, Daten aus Abb. 16. Wenn die Messung des ersten Punktes des Normals im Bereich $y = 50$ mm erfolgt, berührt der Taster das Normal an der Koordinate $y_{r1} = 49,998$ mm, während die Steuerung auswertet, dass es sich an der Koordinate $y_{s1} = 50$ mm befindet. Ähnlich verhält es sich im Bereich $y = 450$ mm, wenn sich die Maschine an der realen Position $y_{r2} = 449,993$ mm befindet, die Steuerung aber auswertet, dass sie sich an der Koordinate $y_{s2} = 450$ mm befindet. Wenn anschließend die Länge des Endmaßes aus den realen und kompensierten Koordinaten berechnet wird, ist die reale Länge um $5 \mu\text{m}$ größer als bei den Messwerten.

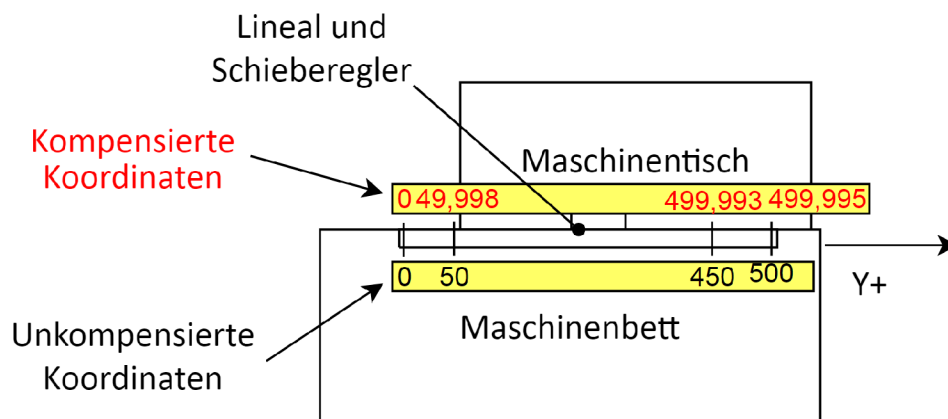


Abb. 19 Veranschaulichung der Lineal-"Verlängerung" durch die Positionskompensation

Bei Verwendung der Rechtwinkligkeitskompensation, die einfach für die YZ-Ebene gemäß Gleichung 21 funktioniert.

$$y = y_r + y_k \quad y_k = f(z) \quad 21$$

Dabei ist y die Position, auf die die Maschine positioniert werden soll, diese wird durch den Wert von y_r bestimmt, der die reale Position des Arbeitstisches darstellt, und y_k ist der Kompensationswert. Der Kompensationswert selbst ergibt sich aus einer Kompensationsfunktion, die direkt von der Position z abhängt. Das heißt, wenn z konstant ist, ändert sich die Position y nicht, so dass die Kompensationen nicht wirksam werden. Daher ändert sich bei der Kompensation der Rechtwinkligkeit für die Höhe $z = 55$ mm die Position durch die Rechtwinkligkeitskompensation nicht und die Änderung der Endmaßlänge wird nur durch Fehlerfaktoren beeinflusst. Dies ist im Fall der Höhe $z = 195$ mm zu beobachten, wo sich die Länge um ca. $2 \mu\text{m}$ ändert. Dies kann durch mehrere Faktoren verursacht werden. Diese Faktoren können z. B. die Auflösung des Lineals, die Ungenauigkeit der Tastkopferkennung, die Wiederholbarkeit der Annäherung, die Messung wird auch durch die Rechtwinkligkeit und Geradheit des gesamten Geräts beeinflusst, oder die nicht konstante Umgebung, in der die Messung durchgeführt wurde, sein.

9.5 Diskussion der erzielten Ergebnisse

Zunächst wurden Messungen einschließlich Positions- und Rechtwinkligkeitskompensationen durchgeführt, um die Genauigkeit des Messverfahrens auf der X-Achse zu ermitteln. Es stellte sich jedoch heraus, dass zwar der Positionierfehler von $20 \mu\text{m}$ auf $2 \mu\text{m}$ reduziert werden konnte, jedoch keine bessere Messtoleranz erreicht wurde. Das bedeutet, dass die Einführung der Kompensationen selbst nicht direkt zu einer Verbesserung der Maschinengeometrie und damit zu einer Erhöhung der Messgenauigkeit führt. In diesem Fall ist es wichtig, das Gesamtverhalten der Maschine zu kennen.

Anschließend wurde eine Untersuchungsmessung durchgeführt, die ergab, dass es aufgrund der spezifischen Konstruktion der Maschine zu einer Durchbiegung des Tisches unter seinem Eigengewicht in der X-Achse kommt. Dies bedeutet, dass diese Achse für die Messung im gewählten Bereich nicht geeignet ist. Für die weitere Messung wurde eine andere Möglichkeit gewählt, nämlich die Messung in der Y-Achse. In dieser Achse sollte es keine Durchbiegung des Tisches geben, da die Führung über ihre gesamte Länge gleichmäßig abgestützt ist. Aufgrund der Größe der Achse konnte jedoch nur ein Endmaß von 400 mm verwendet werden. Die Messungen bestätigten diese Theorie, als sich bei der Positionskompensation die Messtoleranz um etwa die Hälfte reduzierte.

Der Parameter, der die Messergebnisse beeinflussen könnte und als nicht signifikant angesehen wurde, war die Endmaßtemperatur. Genauer gesagt, die Differenz zwischen der Endmaßtemperatur und der Temperatur, auf die die Maschine kalibriert wurde. Während der Positionskompensation betrug die Materialtemperatur $22,3 \text{ }^\circ\text{C}$, auf die die Maschine kompensiert wurde. Zusätzliche Messungen ergaben, dass sich das Endmaß durch die Wärme, die von der Lampe, die den Arbeitsraum beleuchtet, erzeugt wird, um etwa $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ erwärmt. Dies führt zu seiner Dehnung, bei einer theoretischen thermischen Ausdehnung des Endmaßes von $12 \mu\text{m/m-K}$, von $399,99908$ mm auf $400,000224$ mm. Dadurch ändern sich z. B. die Ergebnisse für die Lage- und Rechtwinkligkeitskompensation in der unteren Position, die resultierende Messtoleranz ändert sich von $0,047753$ mm auf $0,032299$ mm.

Bei diesen Dimensionen wird die Messung stark von der Temperatur der Maschine sowie von der Umgebung, in der die Messung durchgeführt wird, beeinflusst. Das heißt nicht, dass es extreme Temperaturschwankungen gab, aber auch eine Änderung von $1 \text{ }^\circ\text{C}$ spielt eine

entscheidende Rolle. Würde man die Temperatur des Endmaßes während der Messung messen, könnte man nachträglich seine tatsächliche Länge korrigieren und so noch geringere Messtoleranzen erreichen, ohne einen thermisch stabilen Arbeitsplatz zu verwenden. Diese Aussage stützt sich auch auf die Tatsache, dass die Messwerte in der Y-Achse immer höher sind als die Länge des kalibrierten Endmaßes, sowie die Varianz der Messung um eine Größenordnung geringer ist.

Was die Verwendung der einzelnen Kompensationen betrifft, so hat jede ihre Vor- und Nachteile. Die Positionskompensation selbst ist nicht zeitaufwändig und kann die Genauigkeit der Maschine in gewisser Weise deutlich verbessern, ist aber nur auf eine bestimmte Achse anwendbar. Das Gleiche gilt für die Rechtwinkligkeitskompensation, die gleichzeitig aktiviert werden kann. Schließlich die volumetrische Kompensation. Dies ist eine Methode, die zeitaufwendiger ist, um Kompensationswerte zu bestimmen und zu implementieren, da der größte Teil des Arbeitsraums gemessen wird, aber sie hat den Vorteil, dass es möglich ist, Messungen in allen Achsen beliebig im Raum durchzuführen und die gleichen Ergebnisse zu erwarten sind.

9.6 Zusammenfassung

Die gesamte Arbeit ist in mehrere Teile gegliedert. Die Einleitung ist der Beschreibung des aktuellen Stands der Technik gewidmet, damit der Leser mit der Technik der Werkstücktaster und der Anwendung der elektronischen Kompensation vertraut ist. Es folgt eine Beschreibung der Technik, die für den praktischen Teil der Arbeit verwendet wurde.

Es folgt der eigentliche Teil der Arbeit. Zunächst wurden Messverfahren ermittelt, um die Eignung von Messungen auf dem Bearbeitungszentrum mit einem Werkstücktaster zu überprüfen, damit die einzelnen Messungen identisch sein können, sowie damit sie in der gleichen Reihenfolge wiederholt werden können.

Erste Messungen in der X-Achse zeigten jedoch, dass nur eine elektronische Kompensation ohne Verständnis für die Funktionsweise einer bestimmten Maschine nicht ausreicht, und obwohl das Messgerät eine höhere Positioniergenauigkeit zeigte, waren die endgültigen Messtoleranzergebnisse schlechter. Aufgrund der anschließenden Untersuchung der Maschine wurde die Messung in der Y-Achse durchgeführt, die bereits das erwartete Verhalten zeigte, d.h. die Verwendung entsprechender Kompensationen wirkt sich auf die Größe des Toleranzfeldes der Messung aus und es war möglich, dieses zu halbieren, obwohl keine Endmaßtemperaturkompensation beteiligt war.

Man kann sagen, dass die Messung davon abhängig wird, dass sie nicht in einem temperaturgeregelten Raum durchgeführt wird. Dies ist jedoch in manchen Fällen kostspielig oder unrealistisch. Es wäre jedoch möglich, ein Modell zu erstellen, bei dem die Länge des Endmaßes online in Abhängigkeit von seiner Temperatur sowie der Größe des Werkstücks während der Messung kompensiert wird.

Die Weiterentwicklung dieser Verfahren könnte das Thema einer weiteren Arbeit sein. Es wäre sinnvoll, die Messtoleranz durch eine Regressionsfunktion zu ergänzen, die die Genauigkeit der Messung über den gesamten Achsbereich mit Hilfe von Mehrfachmessblockmessungen beschreibt. Anschließend wäre es sinnvoll, den gesamten Mess- und Auswerteprozess zu automatisieren, ohne den Einsatz von externer Technik. Dazu wäre es notwendig, eine Software zu entwickeln, die direkt auf die SIEMENS-Steuerung

angewendet werden kann. Mit dieser Anwendung würde dann die Datenerfassung und anschließende Auswertung der Messtoleranz direkt an der Maschine erfolgen, und der gesamte Prozess wäre für den normalen Anwender wesentlich übersichtlicher und gleichzeitig würde der gesamte Prozess deutlich beschleunigt werden.

10 Bibliografie

- [1] ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. 1. vyd. Praha: Grada, 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.
- [2] Mcv-754-quick. *Kovosvit.cz* [online]. Sezimovo Ústí: KOVOSVIT MAS, 2016 [cit. 2021-01-06]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/mcv-754-quick-p3.html#zakladni-koncepce>
- [3] *Dotykové sondy pro obráběcí stroje Heidenhain* [online]. 1. vyd. Česká Republika: Dr. Johannes Heidenhain GmbH, 2019 [cit. 2021-01-09]. ISBN 1113984-C2. Dostupné z: https://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/1113984-C2_Dotykov%C3%A9_sondy_cs.pdf
- [4] Renishaw Technologie obrobkových sond. *Renishaw* [online]. Brno: 2001-2021 Renishaw plc, 2021 [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/technologie-obrobkovych-sond--32933>
- [5] Touch Probe Heidenhain TS 750. *Heidenhain* [online]. CZECH REPUBLIC: Heidenhain, 2021 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: https://www.heidenhain.com/fileadmin/pdf/en/01_Products/Produktinformationen/PI_TS750_TS150_ID1314451_en.pdf
- [6] Touch Probe Heidenhain TS 740. *Heidenhain* [online]. CZECH REPUBLIC: Heidenhain, 2021 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: https://www.heidenhain.cz/cs_CZ/produkty/dotykovye-sondy/workpiece-measurement/ts-460ts-642-ts-740/
- [7] Touch Probe Renishaw OPM60. *Renishaw* [online]. Renishaw plc, 2021 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://resources.renishaw.com/download.aspx?lang=en&data=53351&btn=1>
- [8] Obrobková sonda OMP400. *Renishaw* [online]. Brno: 2001-2021 Renishaw plc, 2021 [cit. 2021-01-12]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/omp400-high-accuracy-machine-probe--6089>
- [9] *Snímací systémy pro CNC obráběcí stroje*. *Renishaw* [online]. 1. vyd. Brno: Renishaw, 2014 [cit. 2021-01-09]. ISBN H-2000-3628-10. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/media/pdf/cs/652050b1403b4ea2927d69c8643876c6.pdf>
- [10] Doteky společnosti Renishaw. *Renishaw* [online]. Brno: 2001-2021 Renishaw plc, 2021 [cit. 2021-01-10]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/doteky-spolecnosti-renishaw--18675>
- [11] Materiály doteků. *Renishaw* [online]. Brno: 2001-2021 Renishaw plc, 2021 [cit. 2021-01-10]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/materialy-doteku--6423>
- [12] Typy doteků. *Renishaw* [online]. Brno: 2001-2021 Renishaw plc, 2021 [cit. 2021-01-10]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/typy-doteku--6627>
- [13] POLÁK, Josef. *Přehled středoškolské matematiky*. 10. vyd. Praha 4-Nusle: PROMETHEUS, 2015. ISBN 978-80-85849-78-3.
- [14] *SINUMERIK 840D sl / 828D Měřicí cykly*. 1. vyd. Německo: SINUMERIK, 2015. ISBN 6FC5398-4BP40-5UA3.

- [15] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0*. 1. vyd. Praha: MM publishing, 2018. MM speciál. ISBN 978-80-906310-8-3.
- [16] SCHWENKE, H., W. KNAPP, H. HAITJEMA, A. WECKENMANN, R. SCHMITT a F. DELBRESSINE. Geometric error measurement and compensation of machines—An update. *CIRP Annals*. 2008, **57**(2), 660-675. ISSN 0007-8506. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.008>
- [17] Interferometry explained. *Renishaw* [online]. Brno: 2001-2021 Renishaw plc, 2021 [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854>
- [18] *Renishaw xl-80* [online]. Singapore: Measurite.com, 2021 [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: <http://measurite.com.sg/product/renishaw-xl-80-laser-equipment-rental-service/>
- [19] QC20-W ballbar system. *Renishaw* [online]. Brno: 2001-2021 Renishaw plc, 2021 [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/qc20-w-ballbar-system--11075>
- [20] Lasertracer - Etalon. *Etalon products* [online]. Braunschweig: Hexagon DEU01 GmbH, 2021 [cit. 2021-01-20]. Dostupné z: <https://www.etalonproducts.com/en/products/lasertracer/>
- [21] Renishaw Ballbar help. In: *Renishaw* [online]. Brno: 2001-2021 Renishaw plc, 2021 [cit. 2021-01-20]. Dostupné z: [https://resources.renishaw.com/details/Manual:+QC20-W+ballbar+\(English\)\(138102\)\(33885\)](https://resources.renishaw.com/details/Manual:+QC20-W+ballbar+(English)(138102)(33885))
- [22] LTC - laser tracer. *Etalonproducts* [online]. Braunschweig: Hexagon, 2021 [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://www.etalonproducts.com/en/products/lasertracer/>
- [23] RAMESH, R, M.A MANNAN a A.N POO. Error compensation in machine tools — a review: Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors: Part I. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2000, **40**(9), 1235-1256. ISSN 0890-6955. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00009-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00009-2)
- [24] DOIRON, Ted a John BEERS. *The Gauge Block Handbook*. 1. vyd. Scotts Valley, Kalifornie, USA: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014. ISBN 978-1495431944. Dostupné také z: <https://www.nist.gov/system/files/documents/calibrations/mono180.pdf>
- [25] INCLINATION MEASURING INSTRUMENTS - WYLER. *Wylereg* [online]. PROMINENT, spol. s r.o., 2021 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: https://www.wylerag.com/fileadmin/pdf/catalogue2018/minicalalogue/Mini%20catalog%202018_edition_cz_eng.pdf
- [26] *VDA 5: Prüfprozesseignung, Eignung von Messsystemen, Mess- und Prüfprozessen, Erweiterte Messunsicherheit, Konformitätsbewertung*. 2. vyd. München: Hanser Verlag, 2011.
- [27] Grade 3 high accuracy styli. *Renishaw* [online]. 2001-2021 Renishaw plc, 2021 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/grade-3-high-accuracy-styli--6823>

- [28] Dotečky pro skenování. *Renishaw* [online]. Brno: 2001-2021 Renishaw plc, 2021 [cit. 2021-01-10]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/komplexni-nabidka--43723>

11 Seznam použitých zkratek, symbolů, obrázků a tabulek

11.1 Zkratky

CNC	Počítačem řízený obráběcí stroj
ENC	Elektronická kompenzace polohy
CEC	Elektronická kompenzace kolmosti
DBB	Double Ballbar
LI	Lase interferometr
LTC	Laser Tracer

11.2 Použité symboly

A	[mm]	Souřadnice naměřeného bodu
B	[mm]	Souřadnice naměřeného bodu
C	[mm]	Souřadnice naměřeného bodu
c_g	[-]	Koeficient měřicího systému
c_{gk}	[-]	Koeficient měřicího systému
D	[mm]	Souřadnice naměřeného bodu
D_w	[mm]	Průměr kuličky doteku
$D_w(\min)$	[mm]	Minimální průměr kuličky doteku
$D_w(\max)$	[mm]	Maximální průměr kuličky doteku
K	[-]	Počet měření
k_{cal}	[-]	Koeficient rozšíření
L	[mm]	Délka etalonu
L_{BB}	[mm]	Naměřená délka etalonu metodou Bod Bod
L_{BP}	[mm]	Naměřená délka etalonu metodou Bod Přímka
M	[-]	Matice koeficientů obecné rovnice roviny
N	[-]	Matice koeficientů obecné rovnice přímky
$Q_{MS_{max}}$	[%]	Mezní hodnota ukazatele vhodnosti
R	[mm]	Průměr dotyku
RE	[mm]	Rozlišovací schopnost stroje
R_C	[mm]	Poloměr opsané kružnice
R_P	[mm]	Poloměr vepsané kružnice
s_g	[mm]	Směrodatná odchylka
t	[mm]	Výška etalonu
T_{DW}	[mm]	Odchylka kulatosti tvaru
T_{cg}	[mm]	Tolerance měřicího systému
T_{cgk}	[mm]	Tolerance měřicího systému
TOL_{min}	[mm]	Tolerance měření
U	[-]	Směrový vector
u_{cal}	[mm]	Nejistota kalibrace
U_{cal}	[mm]	Koeficient rozšíření
u_{evr}	[mm]	Opakovatelnost měření
u_{RE}	[mm]	Rozlišení odměřovacího zařízení
u_{BI}	[mm]	Nejistota vychýlení

u_{MS}	[mm]	Kombinovaná nejistota měřicího systému
V_{DWS}	[mm]	Odchylka průměru kuličky doteku
x	[mm]	Zmenšení průměru dotyku
x_1	[mm]	První naměřená hodnota na ose X
x_2	[mm]	Druhá naměřená hodnota na ose X
x_g	[mm]	Aritmetický průměr
x_e	[mm]	Referenční délka kalibrovaného etalonu
α	[°]	Natočení etalonu
μ	[mm]	Chyba ustavení etalonu

11.3 Seznam obrázků

Obr. 1 Konstrukce obrobkové sondy, převzato z [2], upraveno.....	22
Obr. 2 Schéma fungování dotykové sondy s optickým senzorem [3].....	23
Obr. 3 Schéma fungování dotykové sondy s tlakovým senzorem [3].....	23
Obr. 4 Schéma vytvoření elektrického obvodu pro odporový senzor [4].....	24
Obr. 5 Schématické zobrazení použití technologie tenzometrů [4].....	24
Obr. 6 Systém provedení obrobkové sondy s optickým systémem [9].....	25
Obr. 7 Systém provedení obrobkové sondy s kabelovým systémem [9].....	26
Obr. 8 Kulový dotek s dříkem [10].....	27
Obr. 9 Válcový dotek během měřicí operace [10].....	27
Obr. 10 Diskový dotyk během měřicí operace [10].....	27
Obr. 11 Měření bodu dotekovou sondou, převzato z [2], upraveno.....	28
Obr. 12 Měření vnějšího kruhového segmentu [14].....	28
Obr. 13 Kompenzace šikmého ustavení obrobku na základě změření úhlu [3].....	29
Obr. 14 Cyklus 978, určení hrany [14].....	29
Obr. 15 Cyklus 977, určení délky útvaru [14].....	29
Obr. 16 Stupně volnosti lineární osy X, podle ISO 230-1 [15].....	30
Obr. 17 Konfigurace pro měření osy y.....	31
Obr. 18 Laser-interferometr XL-80 a kompenzační jednotka XC-80, společnosti Renishaw [18].....	32
Obr. 19 Měřicí zařízení QC20-W ballbar [19].....	32
Obr. 20 Měřicí zařízení Laser Tracer, převzato z [20], upraveno.....	33
Obr. 21 Chyba kolmosti os [21].....	34
Obr. 22 Axiální vůle – Backlash [21].....	35
Obr. 23 Konfigurace pro měření volumetrické přesnosti pomocí LTc [22].....	35
Obr. 24 Schématické znázornění obecného principu kompenzace, převzato z [15], upraveno.....	36
Obr. 25 Základní koncepce MCV 754 QUICK [2].....	38
Obr. 26 Obrobková sonda Renishaw OMP400 [8].....	39
Obr. 27 Johanssonovy měrky uložené v dřevěném boxu.....	40
Obr. 28 Digitální libela BlueLEVEL od firmy Wyler [25].....	40
Obr. 29 Diagram určení kompenzace polohy.....	41
Obr. 30 Diagram určení kompenzace kolmosti a polohy.....	42
Obr. 31 Diagram určení volumetrických kompenzací.....	43

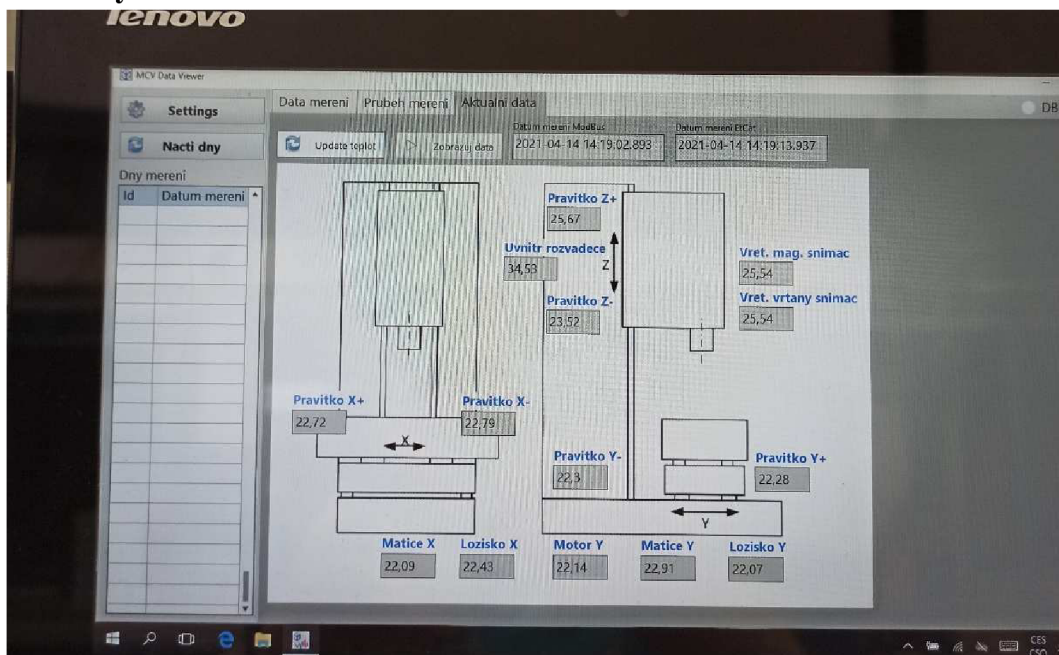
Obr. 32 Diagram postupu měření.....	45
Obr. 33 Chyba vzniklá nepřesným ustavením etalonu, pro osu x.....	46
Obr. 34 Vykreslení funkce závislosti prodloužení etalonu na chybě ustavení	47
Obr. 35 Ukázka vzniku chyby přenesené sondou, pro osu x	47
Obr. 36 Vykreslení funkce závislosti chyby přenesené sondou.....	48
Obr. 37 Metoda vzdálenosti pomocí dvou bodů	48
Obr. 38 Metoda vzdálenosti pomocí bodu a přímky	48
Obr. 39 Metoda vzdálenosti pomocí bodu a roviny	49
Obr. 40 Důležité vlivy na nejistotu výsledků měření, převzato z [26], upraveno.....	50
Obr. 41 Zobrazení intervalu tolerance měření, převzato z [26], upraveno	51
Obr. 42 Uživatelské rozhraní aplikace pro určování tolerance měření	52
Obr. 43 Objasnění hodnot krabicového grafu	53
Obr. 44 Schématické zobrazení ustavení etalonu pro měření v ose x.....	54
Obr. 45 Porovnání přesnosti polohování osy x před (červená) a po (zelená) kompenzaci	55
.....	
Obr. 46 Výsledky kalibrační diagnostiky v rovině xz.....	55
Obr. 47 Výsledky verifikačního měření v rovině xz.....	56
Obr. 48 Grafické vyhodnocení tolerance měření pro osu x	57
Obr. 49 Vývoj teploty stroje během měření.....	58
Obr. 50 Zahřátí stroje a ustálení na provozní teplotě	58
Obr. 51 Měření kolmosti osy z.....	59
Obr. 52 Grafické znázornění výsledku měření kolmosti v rovině xz	59
Obr. 53 Znázornění vlivu nesouměrného zatížení na kolmost os	60
Obr. 54 Výsledky měření naklápění křížového stolu pro osu x	60
Obr. 55 Kalibrace doteku na kalibračním kroužku	61
Obr. 56 Rozměrové tolerance dotyku od firmy Renishaw [27]	61
Obr. 57 Určení chyby doteku, doplnění Obr. 57 [27]	62
Obr. 58 Schéma ustavení etalonu, kalibračního kroužku, rozměry	63
Obr. 59 Porovnání přesnosti polohování osy y před (červená) a po (zelená) kompenzaci	63
.....	
Obr. 60 Výsledky kalibrační diagnostiky v rovině yz.....	64
Obr. 61 Výsledky verifikačního měření v rovině yz.....	64
Obr. 62 Porovnání přesnosti polohování osy y před (červená) a po (zelená) kompenzaci	66
.....	
Obr. 63 Výsledky kalibrační diagnostiky v rovině yz.....	66
Obr. 64 Výsledky verifikačního měření v rovině yz.....	67
Obr. 65 Kalibrační měření pro volumetrickou kompenzaci.....	67
Obr. 66 Verifikační měření po volumetrické kompenzaci.....	67
Obr. 67 Krabicový diagram naměřených dat	68
Obr. 68 Ilustrace prodloužení pravítka vlivem polohové kompenzace.....	70
Obr. 69 Ohřev etalonu vlivem osvětlení pracovního prostoru.....	71

11.4 Seznam tabulek

Tabulka 1.1 Srovnání parametrů vybraných obrobkových sond, délka dřívku 50 mm....	25
Tabulka 2.1 Popis chyb pro lineární osu X [15].....	30
Tabulka 4.1 Technická data MCV 754 QUICK [2]	38
Tabulka 4.2 Specifikace sondy Renishaw OMP400 [8].....	39
Tabulka 4.3 Deviace rozměru pro Johanssonovy měřky podle ISO 3650 [24].....	39
Tabulka 4.4 Technické parametry digitální libely BlueLEVEL od firmy Wyler [25] ...	40
Tabulka 5.1 Konfigurace jednotlivých měření	44
Tabulka 6.1 Vysvětlivky k Obr. 42	52
Tabulka 7.1 Naměřené délky etalonu s referenční délkou 500,025 mm	56
Tabulka 7.2 Dosažená tolerance měření v ose x pro různé konfigurace	56
Tabulka 7.3 Naměřené délky etalonu s referenční délkou 399,99908 mm	65
Tabulka 7.4 Parametry volumetrické kompenzace.....	67
Tabulka 7.5 Naměřená data pro opakované měření v ose y, etalon = 399,99908 mm...	68
Tabulka 7.6 Shrnutí hodnot kompenzací a vlivu na naměřenou délku etalonu.....	69

12 Přílohy

12.1 Obrázky z měření



Obr. 16.1.1 – Temperování stroje



Obr. 16.1.2 Ustavení měřícího zařízení LTC

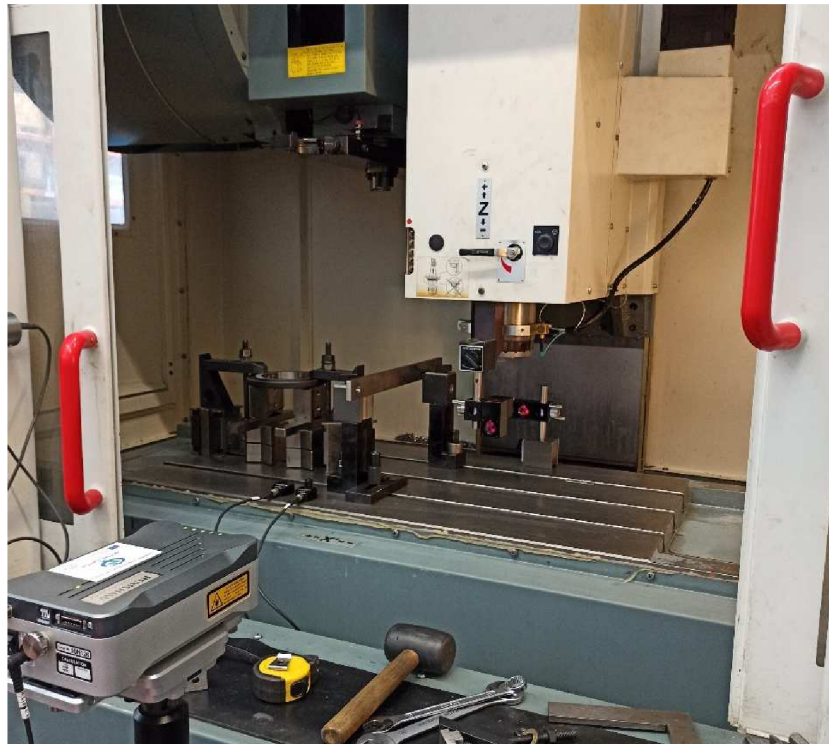


Obr. 16.1.3 Ustavení odražečů a umístění snímačů okolí pro zařízení LTC

Values from the compensation tables (EEC)	
Measuring system 2	
Position [mm]	Correction
10.000	0.000
58.000	-0.001
106.000	-0.002
154.000	-0.003
202.000	-0.007
250.000	-0.007
298.000	-0.007
346.000	-0.005
394.000	-0.004
442.000	-0.005
490.000	-0.003

NC memory PROFIBUS/PROFINET Leadscrew error

Obr. 16.1.4 Zapsání kompenzační tabulky polohy do řídicího systému stroje



Obr. 16.1.5 Verifikační měření přesnosti polohování pro osu Y

Parameter	Value	Unit
32610[3] SMA_VELO_FFWEIGHT	1	cf
32610[4] SMA_VELO_FFWEIGHT	1	cf
32610[5] SMA_VELO_FFWEIGHT	1	cf
32620 SMA_FFWMODE	4	re
32630 SMA_FFWACTIVATIONMODE	0	re
32640[0] SMA_STIFFNESSCONTROLCONFIG	1	cf
32642[0] SMA_STIFFNESSCONTROLCONFIG	0	cf
32644[0] SMA_STIFFNESSDELAYTIME	0 s	po
32650 SMA_AXINERTIA	0.004447110349 kgm ²	cf
32652 SMA_AXMASS	0 kg	cf
32700[0] SMA_ENCCOMPENABLE	0	cf
32700[1] SMA_ENCCOMPENABLE	0	cf
32710 SMA_CECENABLE	1	cf
32711 SMA_CECSCALINGSYSTEMMETRIC	1 mm	cf
32720 SMA_CECMAXSUM	10 %	cf
32730 SMA_CECMAXVELO	1H	po
32750 SMA_TEMPCOMPTYPE	0.01	cf
32760 SMA_COMPADDVELOFACTOR	0.001125000000 s	cf
32800[0] SMA_EQUIVCURRCTRLTIME	0.0005 s	cf
32800[1] SMA_EQUIVCURRCTRLTIME	0.0005 s	cf
32800[2] SMA_EQUIVCURRCTRLTIME	0.0005 s	cf

Obr. 16.1.6 Deaktivování všech dostupných kompenzací

Axis machine data		AX2:Y11/SERVO_3.3:5	
32610[5]	\$MA_VELO_FFJ_WEIGHT	1	cf
32620	\$MA_FFJ_MODE	4	re
32630	\$MA_FFJ_ACTIVATION_MODE	0	re
32640[0]	\$MA_STIFFNESS_CONTROL_ENABLE	1	cf
32642[0]	\$MA_STIFFNESS_CONTROL_CONFIG	0	cf
32644[0]	\$MA_STIFFNESS_DELAY_TIME	0 s	po
32650	\$MA_AX_INERTIA	0.004529067177 kgm ²	cf
32652	\$MA_AX_MASS	0 kg	cf
32700[0]	\$MA_ENC_COMP_ENABLE	0	cf
32700[1]	\$MA_ENC_COMP_ENABLE	1	cf
32710	\$MA_CEC_ENABLE	1	cf
32711	\$MA_CEC_SCALING_SYSTEM_METRIC	1 mm	cf
32720	\$MA_CEC_MAX_SUM	10 %	cf
32730	\$MA_CEC_MAX_VELO	1H	po
32730	\$MA_TEMP_COMP_TYPE	0.01	cf
32750	\$MA_COMP_ADD_VELO_FACTOR	0.001125000000 s	cf
32760	\$MA_COMP_ADD_VELO_FACTOR	0.0005 s	cf
32800[0]	\$MA_EQUIV_CURRACTL_TIME	0.0005 s	cf
32800[1]	\$MA_EQUIV_CURRACTL_TIME	0.0005 s	cf
32800[2]	\$MA_EQUIV_CURRACTL_TIME	0.0005 s	cf
32800[3]	\$MA_EQUIV_CURRACTL_TIME	0.0005 s	cf
32800[4]	\$MA_EQUIV_CURRACTL_TIME	0.0005 s	cf

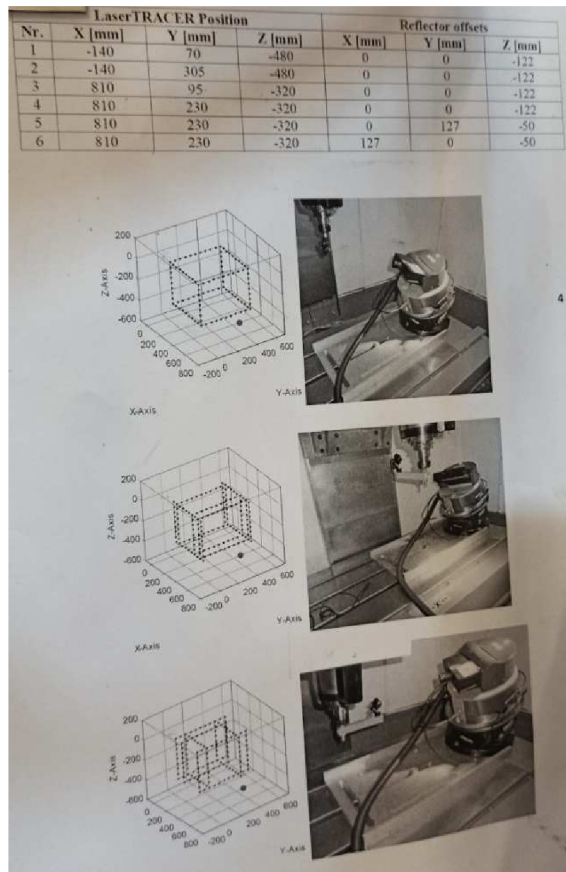
Encoder/spindle error compensation.

General MD	Channel MD	Axis MD	User views	Control Unit parameter	Infeed parameter
------------	------------	---------	------------	------------------------	------------------

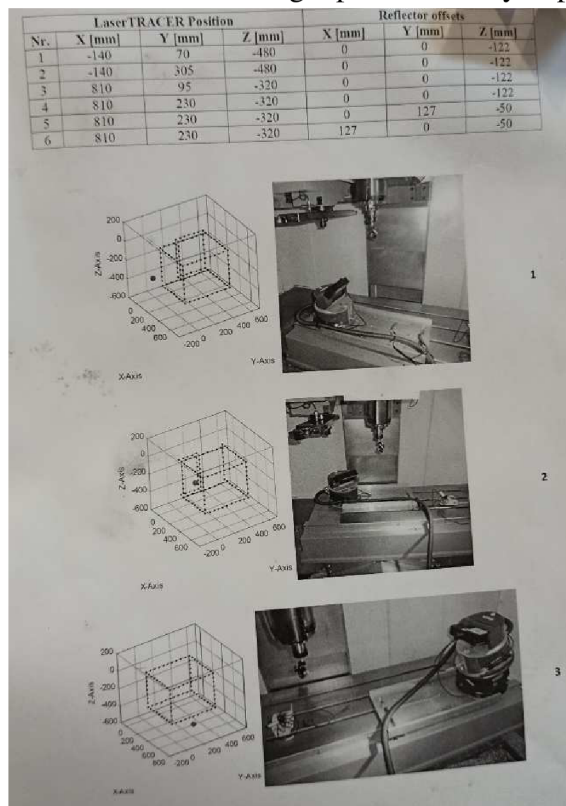
Obr. 16.1.7 Aktivace kompenzací ENC



Obr. 16.1.8 Měření kolmosti pomocí Double Ballbar zařízení



Obr. 16.1.9 Nastavení měřicí strategie podle ověřených postupů, část 1



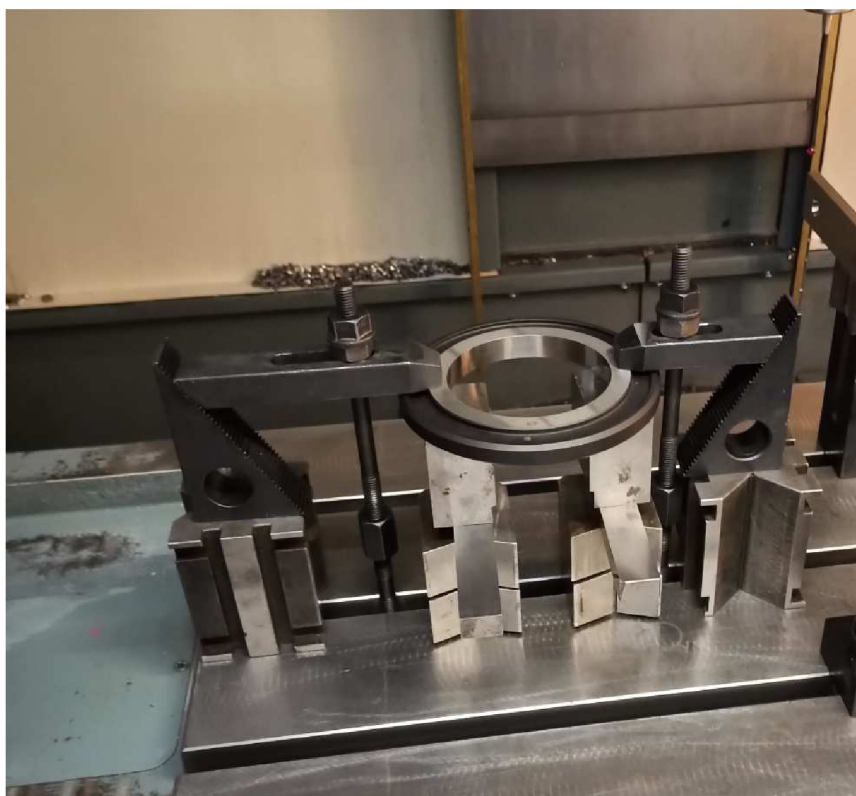
Obr. 16.1.10 Nastavení měřicí strategie podle ověřených postupů, část 2



Obr. 16.1.11 Kalibrační měření volumetrické přesnosti stroje



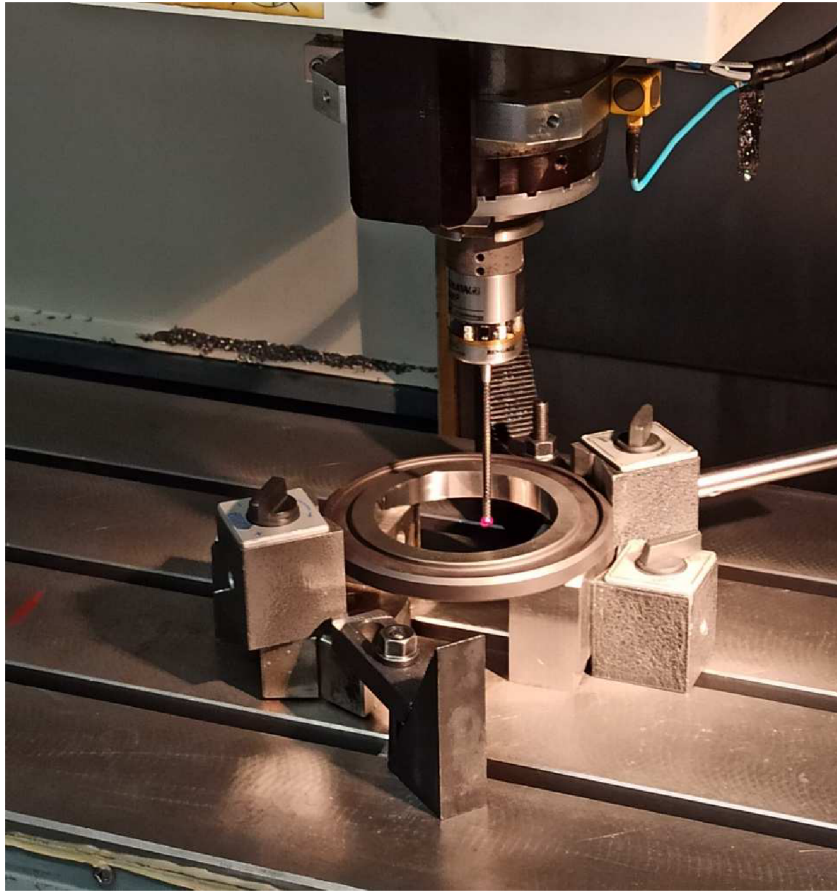
Obr. 16.1.12 Verifikační měření volumetrické přesnosti stroje



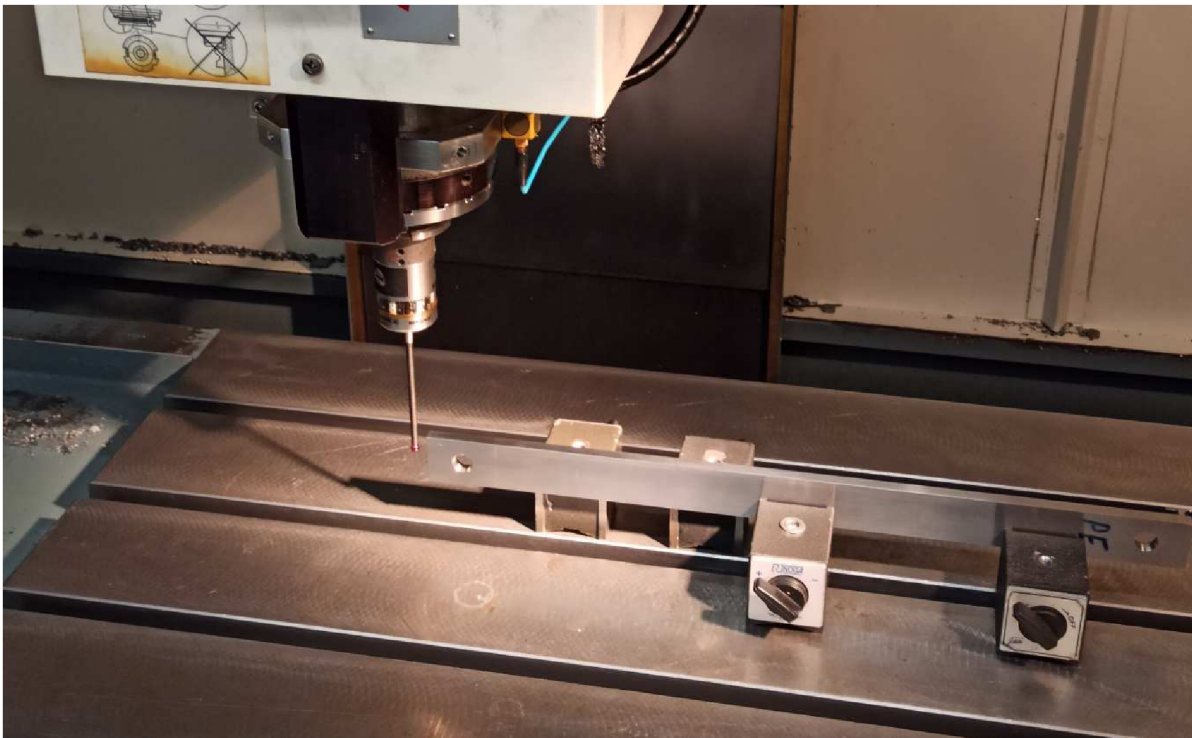
Obr. 16.1.13 Ustavení kalibračního kroužku do výšky, kde bude probíhat měření



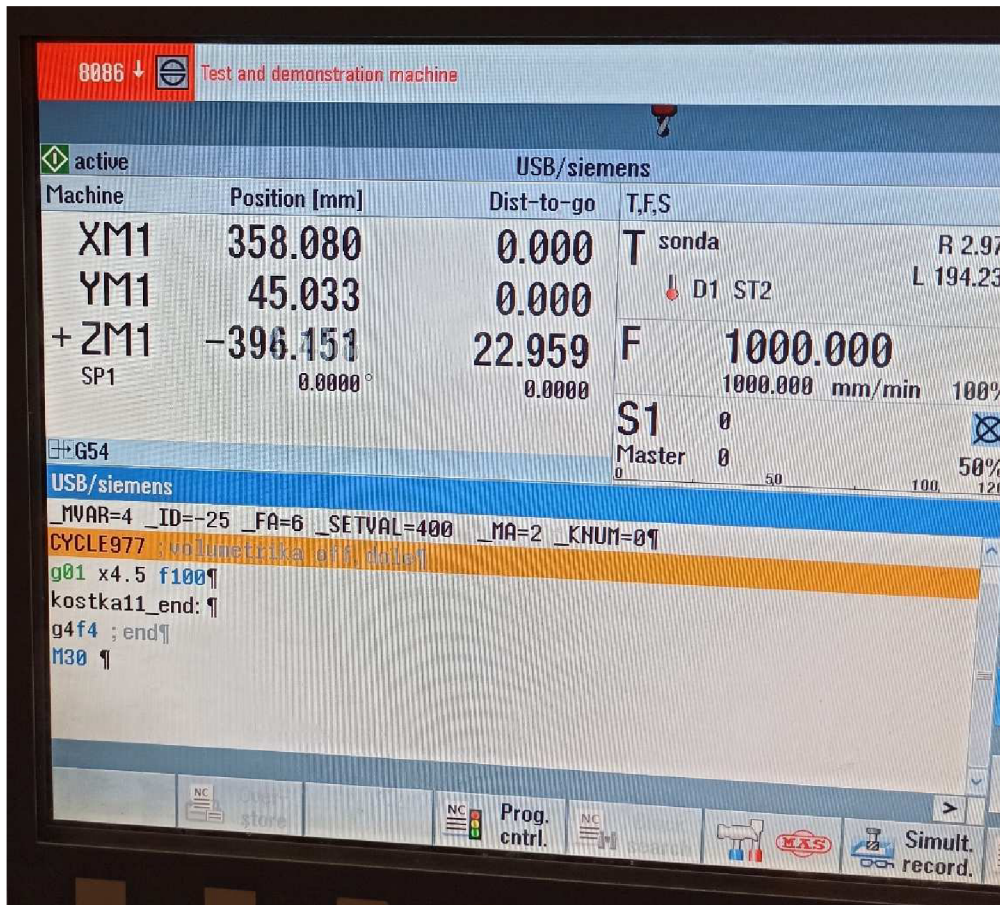
Obr. 16.1.14 Ustavení etalonu pomocí číselníkového úchytkoměru



Obr. 16.1.15 Kalibrace průměru doteku v dané konfiguraci stroje



Obr. 16.1.16 Manuální nastavení pracovního offsetu stroje



Obr. 16.1.17 Spuštění cyklu 977 pro měření délky etalonu

12.2 Kalibrační list etalonů



Český metrologický institut

Okružní 31, 638 00 Brno

tel. +420 545 555 111

www.cmi.cz



Kalibrační laboratoř č. 2202, akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s. podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018

Pracoviště: Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno
Oddělení primární nanometrologie a technické délky, tel. +420 545 555 111

KALIBRAČNÍ LIST

6014-KL-M0039-20

Datum vystavení: 14. května 2020

List 1 ze 2 listů

Zákazník: Vysoké učení technické v Brně, Antonínská 548/1, 602 00 Brno

Provozovna: Fakulta strojního inženýrství
Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Technická 2896/2, 619 00 Brno

Měřidlo: koncové měrky

Materiál: ocel

Počet kusů: 8

Výrobce: neuveden

Rozsah: (125 ÷ 500) mm

Identifikační číslo: 43188 (49Jg)

Sekundární řád: 4.

Výsledky kalibrace byly získány za podmínek a s použitím postupu uvedených v tomto kalibračním listě a vztahují se pouze k době a místu provedení kalibrace.

Datum kalibrace: 4. – 14. 5. 2020

Kalibraci provedla:

Zdeňka Macháčková



Zástupce vedoucího oddělení:

Ing. Václav Duchoň

Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů.

Metrologická návaznost: Měření jsou metrologicky návazná na (mezi) národní etalony.

Kalibrační postup: 614 - MP - C033.

Podmínky prostředí: Teplota vzduchu v laboratoři (20±0,5) °C.

Místo kalibrace: Český metrologický institut, Okružní 31, 638 00 Brno

Výsledky kalibrace:

Tabulka naměřených hodnot:

L [mm]	Odchylka [μm]	Rozpětí délky [μm]
125	+0,47	0,51
150	+0,69	0,33
175	+0,02	0,17
200	+1,95	0,21
250	0,90	0,05
300	+2,24	0,28
400	-0,92	0,18
500	+2,56	0,99

Konvenční hodnota délky = jmenovitá délka + odchylka s uvedeným znaménkem

Nejistota měření: $U = (0,2 + 2L) \mu\text{m}$ Ljmenovitá délka v metrech

Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02 M:2013.

Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu k , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu rozšíření $k = 2$.

Konec kalibračního listu.

Český metrologický institut
Oblastní inspektorát Brno
Okružní 31
638 00 Brno
2-

12.3 Matlab

12.3.1 Chyba ustavení etalonu

```
clc
close all
clear
format long
L=zeros(6,1);
L1 = 125000; % Reálná délka etalon o délce 125 mm
L2 = 150000;
L(3) = 200000;
L(4) = 300000;
L(5) = 400000;
L(6) = 500000;

R = 2988; % Poloměr použité kuličky na sondě

a = linspace(0,20,100); %
Chyba ustavení

X1 = sqrt((L1^2)-(a.^2))+a.^2./sqrt((L1.^2)-(a.^2)) %
Naměřená délka etalonu
X2 = sqrt((L2^2)-(a.^2))+a.^2./sqrt((L2.^2)-(a.^2))

Chyba1_1 = X1-L1
%Chyba vzniklá měřením uhlopříčky
Chyba1_2 = X2-L2

figure(1)
plot(a,Chyba1_1)
hold on
plot(a,Chyba1_2)
title('Chyba v závislosti na ustavení')
xlabel('Chyba v ustavení [μm]')
ylabel('Chyba vypočtené délky [μm]')

alfa1 = radtodeg(asin(a/L1))
alfa2 = radtodeg(asin(a/L2))

Chyba2_1 = 2*(R-cos(alfa1)*R)
%Chyba vzniklá sondou
Chyba2_2 = 2*(R-cos(alfa2)*R)

Chyba1 = abs(Chyba1_1-Chyba2_1);
Chyba2 = abs(Chyba1_2-Chyba2_2);
```

```

figure(2)
plot(a,Chyba1)
hold on
plot(a,Chyba2)
title('Chyba v závislosti na ustavení při zanesení chyby sondy')
xlabel('Chyba v ustavení [ $\mu\text{m}$ ]')
ylabel('Chyba vypočtené délky [ $\mu\text{m}$ ]')

```

12.3.2 Výpočet délek- přímk_a_bod rovina_bod

```

clc
clear
close all
format long

%Import dat z txt
K11 = importdata('.txt');
K12 = importdata('.txt');
K13 = importdata('.txt');
K14 = importdata('.txt');
K15 = importdata('.txt');
K16 = importdata('.txt');

P =length(K11);           %počet naměřených bodů

Namerene1 = zeros(P,3);   %Nulové matice pro naplnění
rozměry, úprava rozdílných délek vektorů
Namerene2 = zeros(P,3);
Namerene3 = zeros(P,3);
Namerene4 = zeros(P,3);
Namerene5 = zeros(P,3);
Namerene6 = zeros(P,3);

for i=1:P                 %plnění Matice naměřenými body z txt.
Namerene1(i,1)= K11(i,1);
Namerene2(i,1)= K12(i,1);
Namerene3(i,1)= K13(i,1);
Namerene4(i,1)= K14(i,1);
Namerene5(i,1)= K15(i,1);
Namerene6(i,1)= K16(i,1);
end

for m=1:P                 %plnění Matice hodnotami
potřebnými hodnotami pro OSA Y
Namerene1(m,2)= 0;
Namerene2(m,2)= 12;

```

```

Namerene3(m,2) = 0;
Namerene4(m,2) = 12;
Namerene5(m,2) = 6;
Namerene6(m,2) = 6;
end

for q=1:P %plnění Matice hodnotami
potřebnými hodnotami OSA Z
Namerene1(q,3) = 0;
Namerene2(q,3) = 0;
Namerene3(q,3) = 0;
Namerene4(q,3) = 0;
Namerene5(q,3) = 12;
Namerene6(q,3) = 12;
end
%Delka Bod Bod
DBB1= Namerene3(:,1) - Namerene1(:,1);

%Delka Bod Přímka
a1 = Namerene1 - Namerene2;
b1 = Namerene3 - Namerene2;
DBP1 = sqrt(sum(cross(a1,b1,2).^2,2)) ./
sqrt(sum(a1.^2,2));

%Delka Bod Rovina
u=Namerene2-Namerene1;
v=Namerene5-Namerene1;
w=cross(u,v); %vektorový součin

for c=1:P
w(c,4)=0-w(c,1)*Namerene1(c,1)-w(c,2)*Namerene1(c,2)-
w(c,3)*Namerene1(c,3); %koeficient d v obecné
rovnici roviny
DBR1(c) =
(w(c,1)*Namerene3(c,1)+w(c,2)*Namerene3(c,2)+w(c,3)*Namerene3(c,3)+w(c,4))/sqrt(w(c,1).^2+w(c,2).^2+w(c,3).^2);
end

```

12.3.3 Výpočet tolerance

```

clc
clear
close all
format long g

%Import dat z txt

DBB1 = importdata('.txt');

```



```

%-----
%Výpočet směrodatné odchylky BOD BOD 1
Cg_DBB1 = 1.33;
Xe_DBB1 = 500.0025;          %Referenční délka etalonu
Xm_DBB1 = Xe_DBB1;
RE_DBB1 = 0.002;           % Rozlišovací schopnost !
U_cal_DBB1 = 0.0008;       % Nejistota kalibrace
k_cal_DBB1 = 2;           % typicky oblast měřící techniky 2,
VDA 5 str 74

P_DBB1=length(DBB1)
Xg_DBB1 = sum(DBB1)/P_DBB1
Suma_k_odchylce_DBB1 = 0;

for b=1:P_DBB1
Suma_k_odchylce_DBB1 = Suma_k_odchylce_DBB1+(Xg_DBB1-
DBB1(b))^2
end

Sg_DBB1 = sqrt(Suma_k_odchylce_DBB1/(P_DBB1-1))
% Směrodatná odchylka
T_DBB1 = (Cg_DBB1*6*Sg_DBB1)/0.2

Cgk_DBB1 = 0;

while Cgk_DBB1<1.33
T_DBB1 = T_DBB1+0.0001;
Cgk_DBB1 = (0.1*T_DBB1-abs(Xg_DBB1-Xe_DBB1))/(3*Sg_DBB1);
end

u_evr_DBB1 = Sg_DBB1
u_bi_DBB1 = abs(Xg_DBB1-Xm_DBB1)/sqrt(3)
u_re_DBB1=0.5*RE_DBB1/sqrt(3)
u_cal_DBB1=U_cal_DBB1/k_cal_DBB1
vekt_DBB1=[u_evr_DBB1^2 u_re_DBB1^2];
u_ln_DBB1 = 0;
u_ms_DBB1=sqrt(u_cal_DBB1^2+max(vekt_DBB1)+u_bi_DBB1^2+u_l
n_DBB1^2)
Ums_DBB1=2*u_ms_DBB1
Qms_max_DBB1 = 15;
TOL_DBB1=2*Ums_DBB1/Qms_max_DBB1*100
Qms_DBB1=2*Ums_DBB1/T_DBB1*100          % Index způsobilosti

%-----DISPLAY-----

X_Xg_DBB1=['Aritmetický průměr ', num2str(Xg_DBB1), ' mm'];
disp(X_Xg_DBB1)

```

```
X_Sg_DBB1=['Směrodatná odchylka ',num2str(Sg_DBB1), '
mm'];
disp(X_Sg_DBB1)
X_T_DBB1=['Toleranční pole T ',num2str(T_DBB1), ' mm'];
disp(X_T_DBB1)
X_Cg_DBB1=['Index způsobilosti měřidla Cg
',num2str(Cg_DBB1)];
disp(X_Cg_DBB1)
X_Cgk_DBB1=['Index způsobilosti měřidla Cgk
',num2str(Cgk_DBB1)];
disp(X_Cgk_DBB1)
X_TOL_DBB1=['Minimální tolerance TOL ',num2str(TOL_DBB1),
' mm'];
disp(X_TOL_DBB1)
disp(' ')
```