



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

MODELOVÁNÍ LINEÁRNÍCH SNÍMAČŮ POLOHY OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

MODELING OF LINEAR POSITION SENSORS FOR MACHINE TOOLS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Zdeněk Baďura

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dominik Hermanský, Ph.D.

BRNO 2024



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Technische Universität Chemnitz

Fakultät für Maschinenbau

Bachelorarbeit

Thema: Modellierung der Längenmessgeräte von
Werkzeugmaschinen

Vorgelegt von: Zdeněk Baďura
geboren am 13. 10. 1996

Studiengang: Maschinenbau

Berufsfeld: Längenmessgeräte

Betreuer: Ing. Dominik Hermanský, Ph.D.

Abgabe: 19. 7. 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Zdeněk Baďura**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Výrobní technika
Vedoucí práce: **Ing. Dominik Hermanský, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

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

Modelování lineárních snímačů polohy obráběcích strojů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Teplotní chyby, které způsobují teplotní deformace, jsou jedním z hlavních faktorů ovlivňujících přesnost obráběcích strojů. Tyto negativní vlivy působí také na lineární enkodéry využívané v obráběcích strojích. Proto můžeme říct, že termo-elastické deformace vznikající v důsledku změn okolní teploty se budou promítat do výsledné přesnosti stroje. Kompenzace tepelných chyb je považována za vhodnější, účinnější a ekonomičtější způsob ve srovnání se způsoby jako je udržování konstantní teploty celého stroje. Součástí bakalářské práce je vytvořit dílčí model v lineárním enkodéru dle zadání a provést potřebné simulace, které budou dále využity pro návrh simulačního modelu lineárního enkodéru.

Cíle bakalářské práce:

Současný stav poznání (rešerše) v oblasti modelování termo elastických deformací.
Systémový rozbor problematiky (lineární enkodér).
Návrh experimentu teplotního zatěžování lineárního enkodéru.
Sestavení simulačního modelu v příslušném SW.
Zhodnocení výsledků získaných ze simulace.
Závěr a zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené literatury:

TLUSTY, George. Manufacturing processes and equipment. Prenice-Hall, Inc., 2000. ISBN 0-201-49865-0.

MAREK, J. a kol. Konstrukce CNC obráběcích strojů VI. Čtvrté vydání. Praha: MM publishing, s. r. o., 2018. ISBN- 978-80-606310-8-3.

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš (ed.). Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

GURAIUSKIS, Donatas, Arturas KILIKIIVIČIUS, Sergejus BORODINAS a Albinas KASPARAITIS.
Analysis of geometric and thermal errors of linear encoder for real-time compensation. Sensors
and Actuators A: Physical [online]. 296, 145-154. ISSN 09244247.

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

Aufgabenstellung Bachelorarbeit

Für Herrn Zdeněk Baďura

Thema: Modellierung der Längenmessgeräte von Werkzeugmaschinen

Aufgabenstellung:

Temperaturfehler, die zu thermischen Verformungen führen, sind einer der Hauptfaktoren, die die Genauigkeit von Werkzeugmaschinen beeinträchtigen. Diese negativen Einflüsse betreffen auch die in Werkzeugmaschinen verwendeten Längenmessgeräte. Daher kann man sagen, dass thermoelastische Verformungen aufgrund von Änderungen der Umgebungstemperatur die Endgenauigkeit der Maschine beeinträchtigen. Die thermische Fehlerkompensation gilt als geeignetere, effizientere und wirtschaftlichere Methode im Vergleich zu Methoden wie der Aufrechterhaltung einer konstanten Temperatur in der gesamten Maschine. Der Teil der Bachelorarbeit besteht darin, ein Teilmodell des linearen Messgeräts gemäß der Aufgabenstellung zu erstellen und die notwendigen Simulationen durchzuführen, die dann für den Entwurf des Simulationsmodells des linearen Messgeräts verwendet werden.

Schwerpunkte der Arbeit

Aktueller Wissensstand (Forschung) auf dem Gebiet der Modellierung thermoelastischer Verformungen.

Systemanalyse des Problems (lineares Messgerät).

Entwurf eines thermischen Belastungsexperiments für ein lineares Messgerät.

Konstruktion eines Simulationsmodells in geeigneter Software.

Auswertung der aus der Simulation gewonnenen Ergebnisse.

Schlussfolgerung und Bewertung der erzielten Ergebnisse.

Die Bachelorarbeit ist als Einzelarbeit abzugeben. Die Schwerpunkte können in Absprache mit dem Betreuer an den Arbeitsstand bzw. An die notwendigen Schritte individuell angepasst werden.

Die Arbeit ist unter der Berücksichtigung der Arbeitshinweise zum Erstellen studentischer wissenschaftlicher Arbeiten der Professur Produktionssysteme und -prozesse zu verfassen.

Beginn: 15. 04. 2024

Abgabe: 19. 7. 2024

Betreuer: Ing. Dominik Hermanský, Ph.D.

BIBLIOGRAFICKÝ ZÁZNAM A ABSTRAKT

BAĎURA, Zdeněk. Modelování lineárních snímačů polohy obráběcích strojů. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/161418>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Dominik Hermanský.

Klíčová slova:

Lineární snímač polohy, lineární enkodér, Heidenhain, simulace, kompenzace teplotní roztažnosti

Bakalářská práce se věnuje návrhu simulace teplotního namáhání lineárního snímače polohy Heidenhain LS 487. Délková roztažnost způsobená změnou teploty má negativní vliv na přesnost odměřování polohy a na přesnost výroby. Využitím simulace lze predikovat šíření tepla po těle snímače polohy, což umožňuje snížit nepřesnosti.

V rámci bakalářské práce byla provedena rešerše na způsoby odměřování polohy, počítačový software a na šíření tepla. Následně byla vytvořena simulace teplotního namáhání lineárního snímače polohy, která by měla popisovat namáhání snímače při skutečném měření. Po vytvoření simulace byly porovnány naměřené hodnoty s těmi ze simulace. Byla navržena opatření pro minimalizování vnějších vlivů během měření. V závěru byly zhodnoceny výsledky této bakalářské práce.

BIBLIOGRAPHISCHE BESCHREIBUNG UND KURZREFERAT

Německy/Deutsch

Badůra, Zdeněk

Modellierung der Längenmessgeräte von Werkzeugmaschinen

Bachelorarbeit an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz,
Professur Produktionssysteme und -prozesse, Chemnitz, 2024

Schlagwörter:

Linearer Positionssensor, Längenmessgerät, Heidenhain, Simulation, Wärmeausdehnungskompensation

Die Bachelorarbeit beschäftigt sich mit dem Entwurf einer Simulation zur thermischen Belastung des linearen Positionssensors Heidenhain LS 487. Die Längenänderung aufgrund von Temperaturschwankungen beeinflusst die Genauigkeit der Positionsbestimmung und die Präzision der Fertigung negativ. Durch die Simulation kann die Wärmeausbreitung im Sensor vorhergesagt werden, was dazu beiträgt, Ungenauigkeiten zu minimieren.

Im Rahmen der Bachelorarbeit wurden Untersuchungen zu verschiedenen Positionsmessmethoden, Computersoftware und zur Wärmeausbreitung durchgeführt. Anschließend wurde eine Simulation zur thermischen Belastung des linearen Positionssensors erstellt, die das Verhalten des Sensors unter realen Messbedingungen beschreibt. Die gemessenen Werte wurden mit den simulierten Werten verglichen. Zudem wurden Maßnahmen zur Minimierung äußerer Einflüsse während der Messung vorgeschlagen. Abschließend wurden die Ergebnisse dieser Arbeit bewertet.

ABSTRACT

Anglicky/English

Badůra, Zdeněk

Modeling of linear position sensors for machine tools

Bachelor thesis at the Faculty of Mechanical Engineering; Chemnitz University of Technology; Institute of Production Systems and Processes, Chemnitz, 2024

Keywords:

Linear position sensor, linear encoder, Heidenhain, simulation, thermal expansion compensation

The bachelor's thesis focuses on designing a simulation for the thermal stress of the linear position sensor Heidenhain LS 487. The length expansion caused by temperature changes negatively affects the accuracy of position measurement and manufacturing precision. By using the simulation, heat propagation within the sensor body can be predicted, allowing for the reduction of inaccuracies.

Within the scope of the bachelor's thesis, research was conducted on methods of position measurement, computer software, and heat propagation. Subsequently, a simulation of the thermal stress on the linear position sensor was created, aiming to describe the sensor's behavior under real measurement conditions. The measured values were then compared with those from the simulation. Measures to minimize external influences during measurement were proposed. Finally, the results of this bachelor's thesis were evaluated.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je mým vlastním dílem, byla zpracována pod vedením přidělených vedoucích a na základě literatury uvedené v seznamu použitých zdrojů.

Německy/Deutsch

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche gekennzeichnet.

Anglicky/English

I hereby declare that the thesis submitted is my own unaided work. All sources used are acknowledged as references.

V Brně dne 16. 7. 2024

.....

Zdeněk Baďura

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat panu doc. Ing., Dipl.-Ing Michal Holub Ph.D. za cenné a podnětné rady při psaní bakalářské práce.

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Dominik Hermanský, Ph.D. za vedení této bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Dr.-Ing. Thomas Hänel za nápomocnost a velkorysost během studijního pobytu na TU Chemnitz.

Na závěr bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za veškerou podporu.

Obsah

1	Úvod.....	22
2	Současný stav poznání	23
2.1	Lineární a úhlové snímače	24
2.2	Zapouzdřené a otevřené lineární snímače.....	26
2.3	Přímé a nepřímé měření polohy	27
2.4	Absolutní a relativní měření polohy	28
2.5	Analogové a digitální snímače.....	30
2.6	Rozdělení enkodérů dle fyzikálního principu	32
2.7	Modelování v softwarových programech	38
2.8	Shrnutí.....	39
3	Teplotní roztažnost	40
3.1	Důsledky teplotní roztažnosti	40
3.2	Kompenzace vlivu teplotní roztažnosti.....	41
3.3	Způsob šíření tepla.....	42
3.4	Materiály lineárních enkodérů	42
4	Návrh simulace teplotní roztažnosti lineárního enkodéru	44
4.1	Popis enkodéru Heidenhain LS 487.....	44
4.2	Teplotní snímače.....	46
4.3	Tvorba CAD modelu	47
4.4	Okrajové podmínky	48
4.5	Tvorba modelu v programu Ansys Workbench.....	48
4.6	Výsledky simulace	51
4.7	Srovnání výsledků simulace s měřením.....	52
4.8	Shrnutí.....	56
5	Diskuse.....	57

6	Závěr	59
7	Zusammenfassung der Bachelorarbeit in der deutschen Sprache.....	61
7.1	Einleitung.....	61
7.2	Stand der Technik	61
7.2.1	Unterteilung der Längenmessgeräte nach Bewegungsart.....	62
7.2.2	Gekapselte und offene lineare Sensoren	64
7.2.3	Direkte und indirekte Positionsmessung.....	65
7.2.4	Absolute und relative Positionsmessung	65
7.2.5	Analoge und digitale Längenmessgeräte	66
7.2.6	Austeilung der Längenmessgeräte nach dem physikalischen Prinzip	68
7.2.7	Modellierung in Computer Software	72
7.3	Thermische Ausdehnung	72
7.3.1	Auswirkungen der thermischen Ausdehnung	73
7.3.2	Kompensation der Auswirkungen der thermischen Ausdehnung.....	74
7.3.3	Wärmeübertragung	75
7.3.4	Materialien der Längenmessgeräte	75
7.4	Entwurf einer thermischen Ausdehnungssimulation	76
7.4.1	Beschreibung vom Längenmessgerät Heidenhain LS 487	76
7.4.2	Temperatursensoren.....	79
7.4.3	Erstellung des CAD-Modells.....	79
7.4.4	Randbedingungen	80
7.4.5	Erstellung eines Modells in Ansys Workbench	81
7.4.6	Ergebnisse der Simulation	84
7.4.7	Ergebnisvergleich der Simulation und der Messung	85
7.5	Diskussion.....	90
7.6	Zusammenfassung	91

Seznam použitých zdrojů.....	94
Seznam použitých obrázků	100
Seznam použitých tabulek	102

1 Úvod

Enkodér je komunikační zařízení, které kontroluje pohyb zařízení. Převádí rotační nebo lineární pohyb na analogový nebo digitální signál. Udává aktuální pozici motoru nebo jiných pohybujících se součástí. Snímače se používají v celé řadě strojů – ve výrobních strojích, v automobilech, v počítačích atd. Využitím snímačů se dosahuje vyšší přesnosti a efektivity strojů. Jedná se o velmi přesně fungující zařízení, ale i přesto je zapotřebí pokračovat ve vývoji, aby se dosáhlo ještě vyšší přesnosti a efektivity při výrobě.

Existuje několik způsobů dělení enkodérů. Nejzákladnějším rozdělením je, jestli se zjišťuje lineární, nebo úhlové posunutí. Další způsob rozdělení enkodérů je na absolutní a inkrementální snímače, dle způsobu odměřování (přímé a nepřímé) rozdělení dle typu konstrukce (otevřené a zapouzdřené), dle spojitosti signálu a dle fyzikálního principu – využívají změny elektrického odporu, kapacity, indukčnosti, magnetické, optické vlastnosti atd.

[1]

Přesnost enkodérů je závislá na zvolené technologii a na způsobu používání. Pohybuje se v rozmezí stovek mikrometrů až jednotek nanometrů.

Díky známé pozici lze dodatečným výpočtem vypočítat rychlost, zrychlení a jerk (změnu zrychlení) enkodérů. Lze také nastavit maximální možnou rychlost a zrychlení, aby se zamezilo poškození stroje.

2 Současný stav poznání

Snímače polohy nachází široké uplatnění v mnoha moderních technologiích. Využívají se v průmyslové automatizaci, kde slouží k přesnější a rychlejší výrobě. V automobilovém průmyslu se používají např. pro přesné řízení motoru nebo na montážních linkách zajišťují přesný pohyb dílů a jejich polohování. Ve zdravotnictví poskytují zpětnou vazbu při jemných operacích. Další využití snímačů polohy lze najít v leteckém a obranném průmyslu, tiskárnách nebo v textilních strojích. Jejich využíváním lze dosáhnout efektivnější a v důsledku levnější výroby.

Počátky vývoje snímačů polohy sahají až do dvacátých let 20. století. Významným milníkem se ale stal až počátek šedesátých let 20. století, kdy společnost Heidenhain vyvinula snímač nazývaný DOM (Digital Optical Measuring instrument). V roce 1969 vyvinul Bill Watt, zakladatel společnosti Encoder Products Company (EPC), představil Model 711 Cube Encoder, který se začal používat pro svou všestrannost. [2], [3]

Snímače polohy vyvíjí velké množství firem. Mezi nejvýznamnější výrobce se řadí firmy Heidenhain, Renishaw, Mitutoyo, ifm electronic, Dynapar, Maxon a další. [4]

Navzdory vysoké přesnosti snímačů polohy existuje celá řada faktorů, která ovlivňuje jejich přesnost – např. kvalita uložení, znečištění čtecího zařízení, digitální šum, teplotní roztažnost a další. Teplotní roztažnost může být způsobená změnou okolní teploty, mechanickým namáháním snímače při pohybu nebo šířením tepla z výrobního stroje do těla snímače polohy. Vlivu teplotní roztažnosti se více věnují následující publikace: [5], [6], [7]

2.1 Lineární a úhlové snímače

Enkodéry se dělí na lineární a úhlové (rotační) snímače. Každý z těchto druhů je vhodný pro jiné aplikace.

Lineární snímače

Lineární snímače reagují na pohyb po dráze. Snímač je instalován nad pravítkem. V případě pohybu odečítá snímač polohu z pravítka a dává informace o aktuální poloze. Změna polohy za jednotku času umožňuje dopočítat zrychlení a rychlost pohybu. Odečítání polohy je možné různými technologickými způsoby dle druhu enkodéru. Lineární snímače umožňují bezkontaktní snímání pohybu jako absolutní hodnoty pozice. Bezkontaktní provedení umožňuje nepoužití ložisek, spojek, kluzných vedení a těsnění v rámci konstrukce. Jejich absence má pozitivní vliv na menší poruchovost snímačů vlivem omezení rázů a vibrací. Lineární snímače mohou být zkonstruovány jako zapouzdřené, ale i otevřené snímače. Vhodný druh snímače je závislý na okolním prostředí stroje – v případě možného poškození snímače vnějšími nečistotami je vhodné zvolit zapouzdřený snímač.



Obr. 1: Lineární snímač polohy Heidenhain [8]

Úhlové snímače

Úhlové snímače (rotační enkodéry) jsou elektromechanická zařízení, která přeměňují rotační pohyb na digitální signály. Měří tak úhlové veličiny, jako jsou úhlové zrychlení, úhlová rychlost a úhlové natočení. Stejně tak je možné určit i rychlost, zrychlení a další veličiny díky známému úhlu stoupání závitu. V tom případě se jedná o nepřímé určování

polohy. Tyto snímače nacházejí využití ve výrobních strojích, strojích na zpracování dřeva, textilních strojích a v dalších technických aplikacích. [9], [10]



Obr. 2: Rotační snímač polohy Heidenhain [11]

Úhlové snímače jsou často používány v kombinaci s jinými typy snímačů, jako jsou gyroskopy, akcelerometry a magnetometry, aby poskytly komplexní přehled o pohybu a orientaci zařízení. Přesnost a spolehlivost může být ovlivněna různými faktory – vibracemi, teplotou, elektrickým šumem a dalšími. Při návrhu systémů využívajících úhlové snímače je nutné tyto faktory zohlednit, aby se dosáhlo vyšší přesnosti výroby. [12]

Úhlové snímače lze rozdělit do několika kategorií v závislosti na způsobu snímání. Optické snímače fungují na principu optického snímání, kde se mění poloha světelného paprsku. Infračervené snímače snímají změnu frekvence nebo odraz infračerveného paprsku. Ultrazvukové snímače mění čas dopadu ultrazvukového signálu. Radiové snímače mění frekvenci radiového signálu. U indukčních snímačů měřená veličina (vzdálenost) mění indukčnost cívky. Galvanometrické snímače fungují na principu zpracovávání Hallova jevu. [13]

Dále lze úhlové snímače rozdělit dle typu uložení. Snímače s vlastním uložením mají integrované ložisko, které umožňuje otáčení hřídele. Díky tomu je zatížení na hřídel menší, což zvyšuje přesnost a životnost snímače. U snímačů bez vlastního uložení je hřídel přímo spojen s měřicím mechanismem. Mezi výhody tohoto řešení jednoduchá konstrukce a nižší cena než u snímačů s vlastním uložením, ale může vyžadovat preciznější montáž a může být náchylnější k opotřebení.

2.2 Zapouzdřené a otevřené lineární snímače

V závislosti na typu konstrukce se lineární snímače vyskytují jako zapouzdřené a otevřené snímače. Každý typ má své výhody a nevýhody, což je činí vhodnými pro různé aplikace.

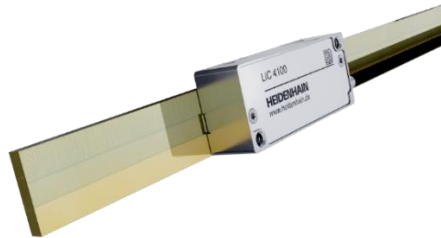
Zapouzdřené (uzavřené) lineární snímače jsou uloženy v např. hliníkovém pouzdru, které chrání měřítko, skenovací vozík a vodící dráhu před kontaminanty, jako je prach, třísky a stříkající voda. Jsou ideální pro aplikace vyžadující měření délky s vysokou přesností a rozlišením v náročných prostředích s kapalinami a částicemi ve vzduchu, jako jsou chladicí kapaliny, maziva a třísky. Jsou ideální pro provoz na obráběcích strojích. Snímače s velkoprofilovým pouzdrem vynikají svou odolností vůči vibracím a jsou vhodné pro měření na větší vzdálenost. Příkladem velkoprofilového zapouzdřeného snímače je Heidenhain LC 100 (Obr. 3). Naopak snímače s nízkoprofilovým pouzdrem jsou vhodné pro omezené vestavné rozměry, ale jsou omezeny měřením na menší vzdálenost. Nevýhodou zapouzdřených lineárních snímačů je jejich vyšší cena a složitější instalace než u otevřených snímačů. Také nemusí být vhodné pro aplikace, kde je vyžadována vyšší rychlost pohybu snímače.



Obr. 3: Zapouzdřený lineární snímač Heidenhain LC 100 [14]

Otevřené lineární enkodéry se skládají z měřítka nebo měřicí pásky a skenovací hlavy, které pracují bez mechanického kontaktu. Používají se v aplikacích vyžadujících velmi vysokou přesnost s měřenými hodnotami, jako je výrobní a měřicí zařízení pro polovodičový průmysl, měřicí stroje, obráběcí stroje s vysokou přesností a přímé pohony. Díky neexistujícímu mechanickému kontaktu mezi skenovací hlavou a měřítkem nebo měřicí páskou, lze eliminovat řadu potenciálních zdrojů chyb. Mezi výhody tohoto řešení patří aplikace s vysokou rychlostí a vysokou přesností měření. Naopak nevýhodou otevřených lineárních snímačů je požadavek na vysokou rovnost montážní plochy kvůli

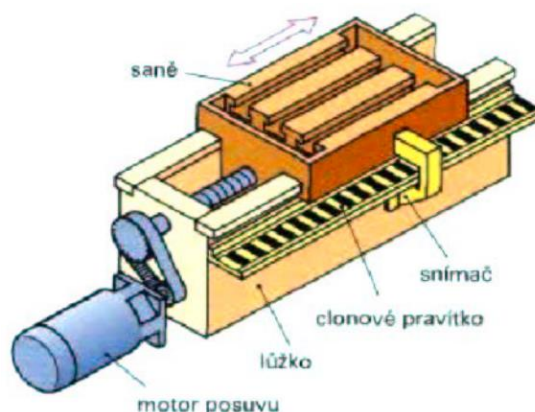
dosáhnutí vysoké přesnosti snímače. Další nevýhodou je, že přesnost těchto snímačů může být negativně ovlivněna enviromentálními kontaminanty (prach, třísky a další). Na Obr. 4 je zobrazen otevřený lineární snímač polohy Heidenhain LIC 4100. [15]



Obr. 4: Otevřený lineární snímač Heidenhain LIC 4100 [16]

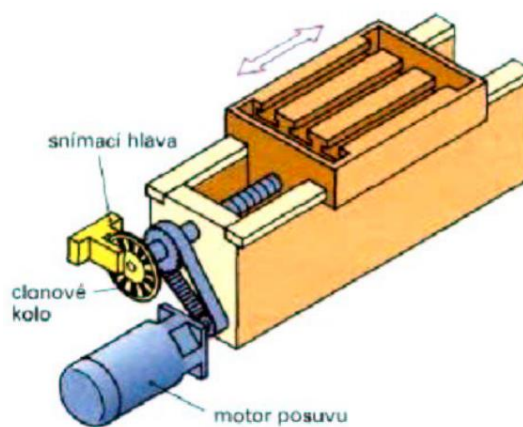
2.3 Přímé a nepřímé měření polohy

Přímé odměřování polohy snímačů polohy je metoda, kdy snímače přímo detekují a měří polohu objektu bez nutnosti mechanických převodů. Detekují polohu a převádějí tuto fyzikální veličinu na elektrický signál. Přesná poloha je odečítána elektronickou čtecí hlavou. Systém na odměřování polohy se obvykle montuje přímo na pohybující se části strojů a pravítka bývá umístěno na rámu stroje. Umístěním co nejbliže k pohybujícímu se stroji lze zamezit negativnímu vlivu teplotní dilatace stroje. Přímé odměřování se používá především u technických aplikací vyžadujících vysokou přesnost. Čím je delší odměřovaná vzdálenost, tím bývá vyšší cena snímače polohy. Jedná se o dražší řešení než v případě nepřímého odměřování polohy. Vzhledem ke stavbě strojů není přímé odměřování mnohdy možné. [17]

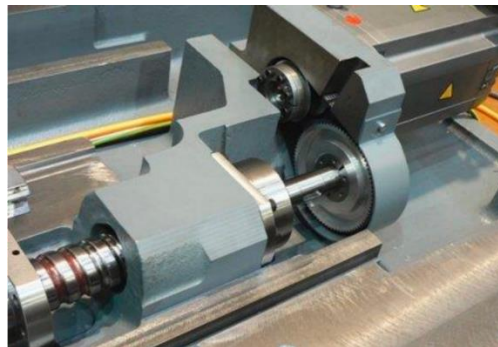


Obr. 5: Přímé odměřování polohy [18]

U nepřímého odměřování polohy není ujetá dráha přímo měřena, ale místo toho se určuje nepřímo na základě pootočení kuličkového šroubu nebo pastorku. Poté se vypočítá podle známého převodu (např. stoupání šroubu). Tato metoda je levnější a jednodušší ve svém konstrukčním provedení. Obvykle je snímač integrován přímo do pohonu a cena závisí na konstrukci, nikoli na velikosti zdvihu. Nevýhodou je, že přesnost dosažené polohy může ovlivnit teplotní roztažnost pohybových mechanismů a nepřesnost vložených převodů (například chyby stoupání šroubu). Také negativně působí síly (například poddajnost a vůle) na přesnost měření. Tato metoda se používá u méně náročných aplikací nebo u os s malými zdvihy.



Obr. 6: Schéma nepřímého odměřování pomocí kotoučku [18]



Obr. 7: Nepřímé odměřování polohy na výrobním stroji [19]

2.4 Absolutní a relativní měření polohy

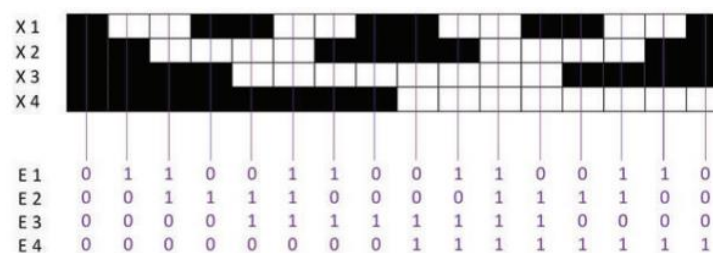
Absolutní snímače

Absolutní snímače poskytují informace o globální poloze a rychlosti tím, že vysílají digitální signál v závislosti na pohybu. V paměti každého absolutního snímače je

uchována informace o aktuální poloze i při vypnutém stavu. Každá poloha snímače je identifikována svým jedinečným kódem. V případě, že by např. vypadl elektrický proud, po opětovném zapnutí bude aktuální poloha identifikována. Vzhledem k okamžitě známé poloze se zkracuje čas přípravy stroje – stroj nemusí najíždět do referenčních bodů. Tato výhoda je znát především u pětiosých strojů. Snímače s absolutním měřením polohy nejsou citlivé na vnější rušivé vlivy.

Dříve se mnohem více používaly inkrementální snímače, ale vzhledem k technologickému pokroku a poklesu cen se stále častěji využívají absolutní snímače. Dalším důvodem k rozšíření používání absolutních snímačů je softwarový pokrok v oblasti diagnostiky dat.

K určení polohy je použit optický, kapacitní nebo magnetický senzor, který čte jedinečný kód. Jedním ze způsobů, jak zakódovat polohu je pomocí binární (dvojkové) soustavy. Momentálně se používá alespoň 8bitové rozlišení (má $2^8=256$ pozic). U binárního kódování je nicméně problematické, když se mění více hodnot najednou. Proto se pro převod mezi binární a desítkovou soustavou používá Grayův kód. [20]

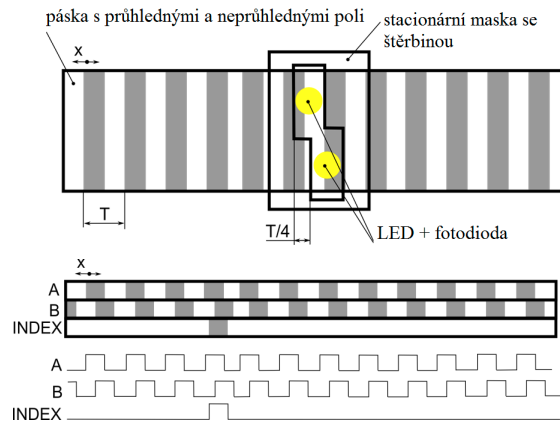


Obr. 8: Grayův kód [20]

Inkrementální snímače

Inkrementální snímače převádí pozici nebo rychlost na analogový nebo digitální signál. Na rozdíl od absolutních snímačů musí dojet ve všech osách na určitou polohu (referenční bod), aby byla definována aktuální poloha snímače – např. při zapnutí tiskárny se provede pohyb pro zjištění polohy. Poloha je určena počáteční hodnotou (referenčním bodem). Jeden pulz odpovídá určité vzdálenosti. Sečtením pulzů se získá vzdálenost, ale není znám směr. Pro určení směru je zapotřebí připojit další kanál, který vysílá informaci o směru pohybu. Informace o poloze je tedy udávána pouze jako rozdíl oproti referenčnímu bodu.

Mezi výhody tohoto řešení patří nižší cena při stejné přesnosti oproti absolutním snímačům. Nižší cena je způsobena i méně náročnou výrobou. Mezi nevýhody se řadí větší citlivost na vnější rušivé vlivy. Dochází ke zpomalení oproti absolutním snímačům kvůli nutnosti najet na referenční bod po zapnutí. Při výpadku energie není uložena informace o aktuální poloze, což může narušit výrobní proces. [21]

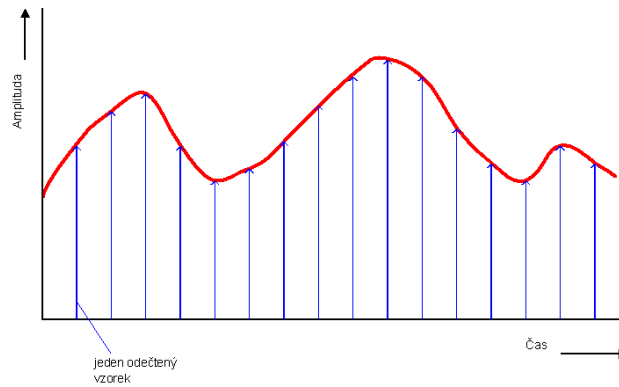


Obr. 9: Průběh signálů inkrementálního enkodéru [21]

2.5 Analogové a digitální snímače

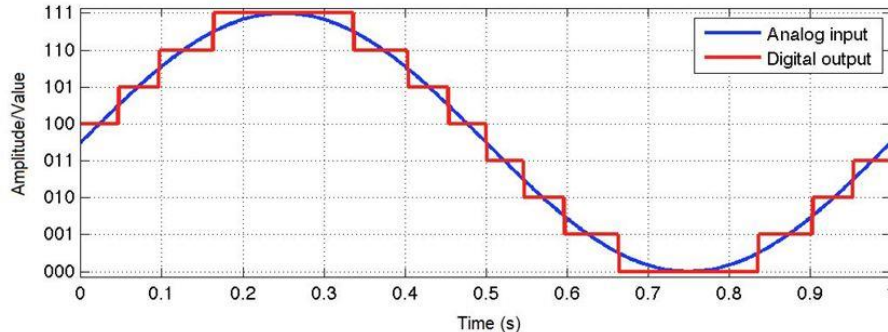
Analogové enkodéry generují analogové, spojitě signály. Tyto signály jsou časově proměnné a obvykle jsou vázány na určitý rozsah (např. +12 V až -12 V), ale v rámci tohoto spojitěho rozsahu existuje nekonečný počet hodnot. Omezení rozlišení vznikne až při převodu na digitální signál. Analogové signály využívají k přenosu informace signálu danou vlastnost média, podobně jako elektřina pohybující se po vodiči. Odměřovaná veličina je vyjádřena jinou fyzikální veličinou, např. změnou odporu, indukčnosti, kapacity, napětí atd. Při vykreslení grafu závislosti napětí na čase by měl analogový signál vytvářet hladkou a spojitou křivku. Na Obr. 10 je zobrazen průběh analogového signálu.

Mezi výhody snímačů s analogovým signálem se řadí jednodušší zpracování dat, nižší cena, jejich vhodné využití pro záznam zvuku, a že využívají menší šířku pásma než digitální zvuky. Mezi nevýhody patří nižší kvalita signálu než v případě digitálního signálu a větší citlivost kabelů na vnější vlivy.



Obr. 10: Znárodnění analogového signálu [22]

Digitální enkodéry generují digitální signály. Tyto signály představují data jako posloupnost diskretních (konkrétních) hodnot. Jedná se o číslicový způsob odměřování. Digitální signál může v daném čase nabývat pouze jedné hodnoty z konečné množiny možných hodnot. Digitální signály se používají ve veškeré digitální elektronice, včetně výpočetních zařízení a zařízení pro přenos dat. Dráha je vyjádřena ve skocích odpovídajících jednotlivým přírůstkům (inkrementům) – např. dvě sousední hodnoty se liší o 1 inkrement (např. 0,001 mm). Na Obr. 11 je zobrazen průběh digitálního signálu, který je vytvořen z analogového signálu.



Obr. 11: Digitální signál vytvořený z analogového signálu [22]

Enkodéry s digitálním signálem jsou vysoce kvalitní a přesné. Jsou odolné proti rušení. Mohou dosahovat vysokého rozlišení. K dosažení větší přenosnosti je ale zapotřebí větší výpočetní výkon. Cena ale bývá větší než v případě snímačů s analogovým signálem. Není známa hodnota v určitém okamžiku, což lze kompenzovat dostatečně vysokým rozlišením. Snímače s digitálním signálem mohou být např. optické nebo magnetické.

2.6 Rozdělení enkodérů dle fyzikálního principu

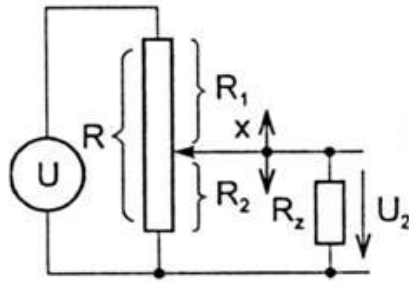
Snímače polohy lze dle elektromechanické technologie rozdělit do několika kategorií. Konkrétně na odporové (rezistivní), magnetické, indukční, optické snímače a další. Každá z těchto technologií má určité výhody a nevýhody v porovnání s ostatními snímači. Jednotlivé snímače bývají využity v rozdílných technických aplikacích v závislosti na požadovaných vlastnostech – přesnosti, ceně, odolnosti vůči vnějšmu prostředí, rozměrům atd. V následující kapitole je rozebrán fyzikální princip fungování těchto snímačů polohy.

Odporové snímače

Při posouvání pohyblivého kontaktu potenciometru (jezdce) po odporové dráze je možné měřit elektrickou veličinu. Schematické znázornění odporového snímače polohy je na Obr. 12. Při pohybu potenciometru se mění dělicí poměr jednotlivých odporů. Odpor je tedy proměnný a jeho velikost lze určit dle následujícího vztahu.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad [\Omega] \quad (1)$$

kde ρ [$\Omega \cdot \text{m}$] je rezistivita (měrný odpor materiálu vodiče), l [m] je délka odporové dráhy mezi připojeným koncem vodiče a běžcem a S [m^2] je plošný obsah průřezu vodiče. Je vhodné, aby byl odpor R_z co největší, díky čemuž lze dosáhnout takřka lineární závislosti mezi napětím a polohou jezdce. Výhodou odporových snímačů je nižší cena a jejich jednoduchost. Naopak mezi nevýhody se řadí problémy související s vibracemi, opotřebením, celková nižší přesnost a šum. Šum může být způsoben pohybem elektrickými i mechanickými jevy, pohybem potenciometru po odporové dráze, jeho odskakováním nebo špatnými vnějšími podmínkami – nečistoty na odporové dráze nebo vlhkostí. [23], [24]



Obr. 12: Náhradní schéma odporového senzoru polohy [25]

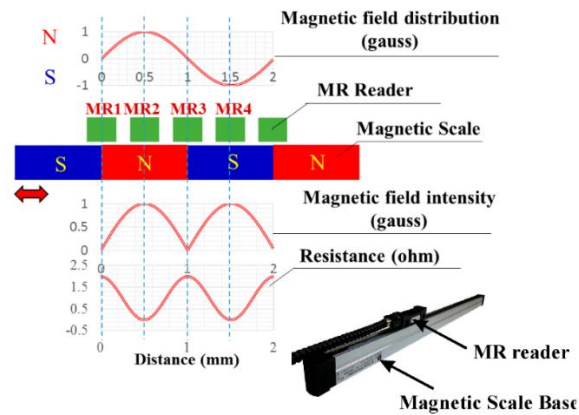
Odporovou dráhu lze rozdělit např. podle konstrukce, materiálu odporové dráhy a dalších kritérií. Odporové dráty dosahují nízkého rozlišení, ale díky jejich robustnosti jsou odolné vůči vibracím a mechanickému poškození. Destička s odporovou vrstvou z různých materiálů dosahuje vyššího rozlišení (to je omezené homogenitou materiálu a šumem), ale potýká se s problémy s vibracemi. Materiál odporové dráhy může např. z ideálně vodivého plastu, uhlíku, elektrolytického materiálu nebo CERMETu, což je kompozitní materiál z keramiky (CERamic) a kovu (METal). Odporová dráha z CERMETu dosahuje vysokého rozlišení a velmi malé odchylka od skutečné hodnoty. [26]

Magnetické snímače

Magnetické snímače odměřují polohu bezdotykově a bez opotřebení. Jejich přesnost odpovídá přibližně $\pm 10 \mu\text{m}$. Lze je rozdělit na snímače s magnetorezistivními prvky, kontakty jazýčkového relé (Reedovy kontakty), Wiegandovy sondy a Hallovy sondy. Díky bezdotykovému snímání jsou odolné vůči chemikáliím, mastnotě, prašnosti, vibracím a nízkým a vysokým teplotám. Magnetické enkodéry se skládají z měřítka (rotačního disku), čtecího zařízení a magnetického materiálu, který je se nachází na měřítku nebo rotačním disku. Na disku jsou střídavě umístěny magnetické póly, jejichž rozestup určuje inkrementální perioda λ . [27]

Magnetické snímače s magnetorezistivními prvky mění svůj odpor v závislosti na magnetickém poli. Magnetorezistivní materiál je umístěn na pravítku nebo rotačním disku. Senzor je umístěný kolmo proti magnetické stopě ve vzdálenosti l , aby do pole tohoto senzoru zasahovaly magnetorezistivní elementy. Při pohybu měřítka nebo rotačního disku vůči senzoru dochází ke změně magnetického pole a magnetických pólů,

což ovlivňuje rezistivitu jednotlivých prvků. Magnetorezistivní prvky jsou vůči sobě vzájemně posunuty o vzdálenost $\lambda/4$. Princip magnetorezistivních snímačů je zobrazen na Obr. 13. [28]

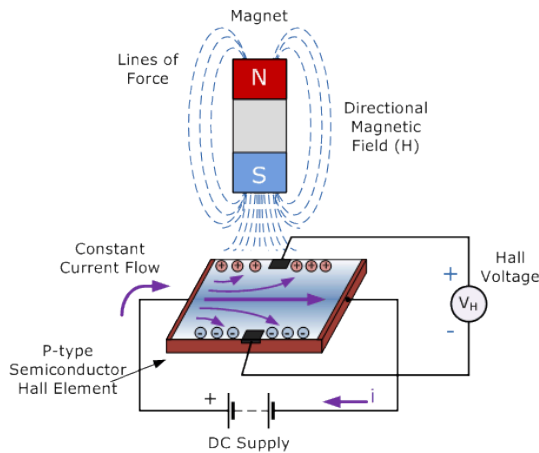


Obr. 13: Průběh magnetického pole a magnetických pólů [29]

Magnetické snímače mohou fungovat na principu Hallova jevu, což je znázorněno na Obr. 14. Hallův jev se používá v magnetických enkodérech k detekci přítomnosti a měření síly magnetických polí. Hallova sonda se skládá z vrstvy polovodičového materiálu, který je připojen k napájecímu zdroji. Uvnitř magnetického pole na bočních stranách polovodičové destičky, kterou prochází proud, dochází ke změně nábojů. Když magnetická oblast na disku nebo měřítku projde Hallovou sondou, interakce generuje napěťovou špičku. Amplituda a frekvence magnetického rušení mohou být použity k určení rychlosti a posunutí. Výstupem je napětí úměrné hustotě magnetického toku (síle magnetického pole), což tyto snímače činí vhodnými pro měření polohy a pohybu. Hallovo napětí lze vypočítat pomocí následujícího vztahu:

$$V_H = \frac{R_H \cdot I \cdot B}{d} \quad [\text{V}] \quad (2)$$

kde R_H [$\text{m}^3 \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$] představuje Hallovu konstantu závislou na materiálu, I [A] velikost protékajícího proudu, B [T] velikost magnetické indukce pole a d [m] značí tloušťku destičky. Výhodou tohoto řešení jsou především malé rozměry, nízká cena a odolnost vůči magnetickému rušení.

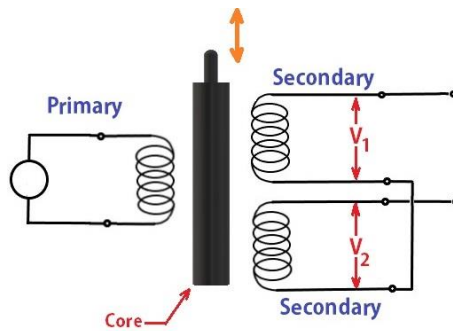


Obr. 14: Znázornění Hallova jevu [30]

Indukčnostní snímače

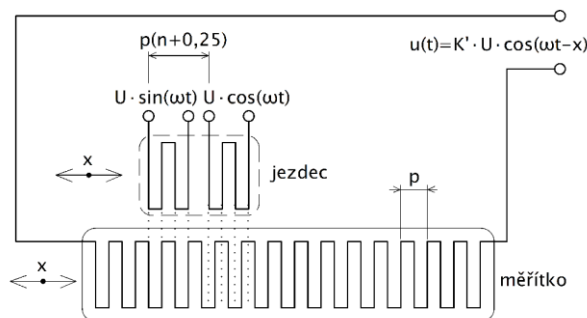
Indukčnostní snímače jsou tzv. pasivní senzory. Pracují na principu elektromagnetické indukce. Pro detekci pohybu nebo polohy využívají změny indukčnosti k převodu na elektrický signál, přičemž využívají variace v elektromagnetickém poli mezi cívkami k poskytnutí zpětné vazby o poloze. Jejich konstrukce zahrnuje dvě hlavní části – stator a rotor. Výhodou indukčnostních snímačů je bezdotykové snímání, díky čemuž jsou odolné vůči opotřebení. Dále bude popsáno několik typů indukčnostních snímačů. Kromě popsaných druhů snímačů existují další druhy indukčnostních snímačů – senzory založené na principu vířivých proudů, senzory s proměnnou vzduchovou mezerou, selsyny a resolvery. [1], [31], [32]

LVDT (Linear Variable Differential Transformer) neboli lineární proměnný diferenciální transformátor se skládá ze tří selenoidových cívek, které mají společné pohyblivé jádro. Primární cívka je připojena ke zdroji střídavého napětí a dvě sekundární cívky, které mají stejný počet závitů, jsou zapojeny v protifázi. Na obr. 023 je zobrazeno zapojení jednotlivých částí LVDT. Vysoká frekvence napájecího zdroje (obvykle 1 až 10 kHz) umožňuje rychlou odezvu systému na změnu polohy. Vysoká frekvence napájecího zdroje způsobuje zesílení vlivu vířivých proudů, což se negativně projevuje na snížení kvality výstupního signálu, zhoršení citlivosti vůči teplotním změnám a větší ztrátách elektrické energie. Výhodou je rychlá odezva, takřka nekonečné rozlišení a bezkontaktní provoz. [33], [34]



Obr. 15: Schématické znázornění LVDT [35]

Induktosyn (lineární indukčnostní snímač polohy) je lineární snímač, který se skládá z jezdec a měřítka. Měřítka je pevná dlouhá plochá cívka s krokem p na izolantu (keramika, sklo, nemagnetický kov s izolační vrstvou). Jezdec se skládá ze dvou cívek. Tvar cívek měřítka a jezdec je stejný. Při vzájemném posuvu se mění vzájemná indukčnost M mezi cívkami měřítka a jezdec. Výhodou induktosynu je levná výroba a nevýhodou jeho teplotní roztažnost, která způsobuje odesílání špatných informací o poloze. Princip fungování induktosynu napájeného do jezdec je zobrazen na Obr. 16. [1]

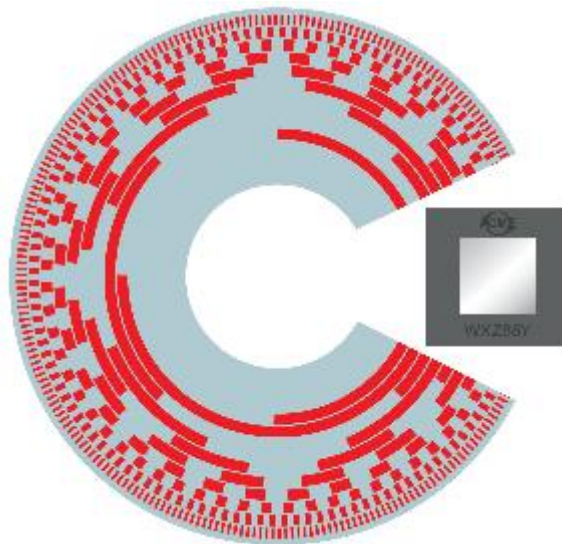


Obr. 16: Schéma induktosynu napájeného do jezdec [1]

Optické snímače

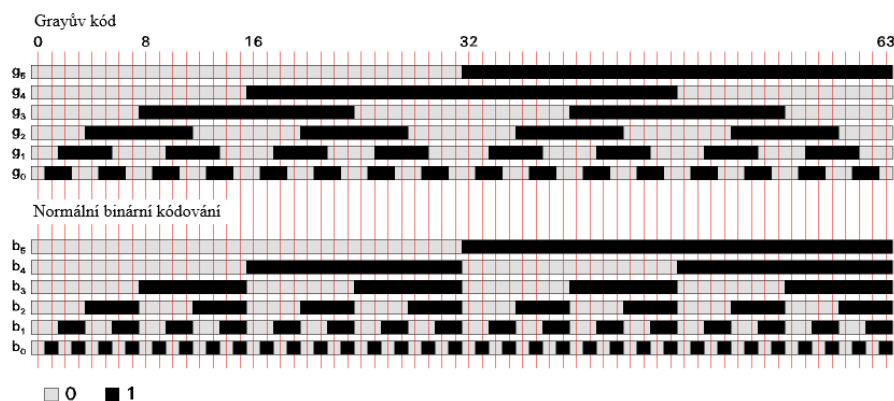
Optické snímače pohybu jsou jedním z nejčastěji používaných typů zařízení pro měření polohy. Převádějí polohu nebo pohyb mechanické součásti na elektrický signál. Jsou široce používány v různých aplikacích pro měření lineárního nebo úhlového posunu, rychlosti a směru. Optické enkodéry fungují na základě přerušení světelných paprsků, obvykle pomocí světelného zdroje, kódovacího disku nebo měřítka a fotodetektoru. Fotodetektor reaguje na světelný paprsek a vytváří sinusovou vlnu, která se transformuje na čtvercovou vlnu nebo pulzní vlak. Tento pulzní signál je pak odeslán do čítače nebo řadiče prostřednictvím elektronické desky. [36]

Inkrementální rotační optický enkodér se skládá z disku, který je pevně spojen s hřídelí a je tvořen střídavě průhlednými a neprůhlednými úseky. Při rotaci motoru dopadají světelné paprsky střídavě na fototranzistor, nebo jsou blokovány neprůhlednými segmenty disku. Optický snímač následně převádí intenzitu dopadajícího světla na elektronický signál, který je následně zesílen a upraven na obdélníkový signál. Frekvence tohoto signálu je přímo úměrná rychlosti otáčení. Použitím alespoň dvou snímačů lze získat dva vzájemně posunuté signály, označované jako A a B. Podle počtu impulzů za čas a toho, který signál předbíhá, lze určit rychlost a směr otáčení. Na obdobném principu fungují i inkrementální lineární optické snímače (Obr. 9), které se skládají z měřítka a fotodetektoru. [1]



Obr. 17: Absolutní rotační snímač polohy s Grayovým kódem [37]

Pokud se měřítko enkodéru (disk v případě rotačního enkodéru – Obr. 17) rozdělí na několik pásem, lze dosáhnout unikátní kombinace průhledných a neprůhledných oblastí pro každou detekovatelnou pozici, což se nazývá Grayův kód (Obr. 18). Při přechodu do sousední polohy se změní pouze 1 hodnota, čímž se snižuje riziko nepřesného měření. Každá poloha je zcela unikátně zakódovaná, proto případně špatně přečtená informace o poloze se neakumuluje a při dalším přechodu do vedlejší polohy je informace o poloze opět správná. Grayův kód se využívá u absolutních optických enkodérů. Je zapotřebí použít více fotodetektorů, což ale umožňuje přímo určit polohu (úhel natočení na rotačních snímačích). Rozlišení enkodéru je pak určeno počtem světelných senzorů.



Obr. 18: Porovnání pětibitového Grayova kódu s klasickým binárním kódováním [38]

Optické enkodéry mají vysoké rozlišení a mohou být použity v aplikacích, kde jsou silná magnetická pole. Nevýhodou této technologie je možnost kontaminace nečistotami z okolí, které mohou snižovat kvalitu snímání, nebo poškození optického disku mechanickým namáháním, například při nárazu nebo při vibracích. Oproti magnetickým enkodérům také vyžadují větší prostor a nejsou vhodné pro použití v teplotně náročných podmínkách. Teplotním namáháním by docházelo k nepřesnému odměřování polohy. Vlivem prodloužení/zkrácení pravítka by docházelo k nepřesnému odměřování. [1], [37]

2.7 Modelování v softwarových programech

S rozvojem počítačových technologií jsou v průmyslu stále častěji využívány různé softwarové (SW) programy. Jejich využíváním lze řádově zrychlit proces vývoje nového produktu. Vývojáři programů implementují do SW nové datové soubory, které lze v programech otevírat a upravovat. To umožňuje část práce udělat v jednom programu a zbytek v jiném a využít tak každý program nejefektivnějším způsobem.

Používání SW programů přináší několik výhod. Poskytují vysokou přesnost při tvorbě výkresů a jednoduchost v případě potřeby úprav. Nabízejí zobrazení modelu, což může pomoci při včasném identifikování problémů, které by jinak mohly zůstat nepovšimnuty. Úpravy v geometrii výrobku jsou řádově jednodušší než předělávání výkresu.

Ačkoliv SW program dokáže vypočítat různé veličiny, je nezbytně nutné, aby lidé ovládající tyto programy měli dostatečné teoretické základy. Na základě teoretických

znalostí dokážou zadat správné údaje do programu nebo můžou zkontrolovat správnost výpočtu.

Mezi často používané SW programy se řadí AutoCAD, Inventor, SolidWorks, Catia, PTC Creo, Ansys nebo MATLAB.

2.8 Shrnutí

Na trhu existují různé druhy snímačů polohy. Každá technologie má své výhody a zároveň i nevýhody, mezi které může patřit přesnost, odolnost vůči vnějším vlivům, cena a další. Volba ideálního snímače závisí na konkrétní aplikaci. Pro přesnost odměřování polohy je důležité umět správně vybrat ideální typ snímače polohy.

3 Teplotní roztažnost

Teplotní roztažnost je fyzikální jev, při kterém dochází ke změně rozměrů materiálu v reakci na změnu teploty. Tento jev nastává kvůli zvýšení kinetické energie částic v materiálu při zvyšování teploty. Když se kinetická energie zvyšuje, částice více vibrují a zabírají více prostoru, což vede k roztažení materiálu. Existují tři hlavní typy teplotní roztažnosti: lineární, plošná a objemová roztažnost. Lineární roztažnost popisuje změnu délky objektu a je popsána následujícím vztahem:

$$\Delta d = d \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (3)$$

kde Δd [m] představuje změnu délky, d [m] je původní délka, α [K⁻¹] je teplotní součinitel délkové roztažnosti a ΔT [K] značí změnu teploty. Teplotní součinitel délkové roztažnosti je závislý na struktuře materiálu. Obecně platí, že materiály s pevnějšími vazbami (kovy) jsou náchylnější na teplotní roztažnost, protože mají vyšší součinitel teplotní roztažnosti než materiály se slabšími vazbami. [39], [40]

3.1 Důsledky teplotní roztažnosti

Vlivem teplotní délkové roztažnosti mění stroje i měřicí technika svou délku. To může mít významný dopad na přesnost a spolehlivost lineárních enkodérů, které se používají k měření polohy v přesných mechanických systémech. Teplotní délková roztažnost může být způsobena různými vlivy. Mezi nejvýznamnější se řadí teplo uvolněné během obrábění, teplo uvolněné při pohybu měřícího zařízení a stroje nebo změna teploty v místnosti, kde je stroj umístěn. Teplotní roztažnost může mít na snímače polohy následující důsledky:

- změna délky stupnice: Lineární enkodéry často obsahují stupnice (např. optické nebo magnetické pásy) pro měření polohy. Když se teplota změní, materiál stupnice se může roztáhnout nebo smrštit, což způsobuje nepřesnosti, protože enkodér již nebude správně kalibrován k reálným rozměrům pohybující se části.
- chyby v měření polohy: S rostoucí nebo klesající teplotou se mění vzdálenost mezi jednotlivými značkami na stupnici. To může vést k nesprávným údajům o poloze,

což má za následek chyby v polohování v přesných aplikacích, jako jsou CNC stroje, robotika nebo optické systémy.

- mechanické napětí a deformace: Teplotní změny mohou způsobit nerovnoměrnou roztažnost nebo smrštění různých částí systému, což vede k mechanickému napětí a deformacím. To může narušit montáž a zarovnání enkodéru, což dále zvyšuje nepřesnosti měření.
- dlouhodobá spolehlivost: Opakované teplotní cykly mohou způsobit únavu materiálů a postupné snižování přesnosti a stability lineárních enkodérů. Materiály ovlivněné teplotní roztažností mohou časem ztrácet svou původní přesnost.

Teplotní délková roztažnost má negativní dopad na přesnost odměřování polohy. Je zapotřebí s ní počítat a navrhovat kompenzační metody, které povedou ke zvýšení přesnosti měření polohy a výroby. [40], [41]

3.2 Kompenzace vlivu teplotní roztažnosti

Pro minimalizaci vlivů teplotní roztažnosti na lineární enkodéry lze použít několik technik. Zde je rozebráno několik možností, jak snížit negativní vliv na proces odměřování a výroby:

- použití materiálů s nízkým koeficientem teplotní roztažnosti: Výběr materiálů s nízkým koeficientem teplotní roztažnosti (např. invar nebo kompozitní materiály) může pomoci snížit změny rozměrů způsobené teplotními výkyvy.
- teplotní kompenzace v softwaru: Mnoho moderních enkodérů používá algoritmy pro teplotní kompenzaci, které upravují měření polohy podle aktuální teploty, čímž se minimalizují chyby způsobené teplotními změnami.
- stabilní teplotní prostředí: Udržování stabilního teplotního prostředí může pomoci minimalizovat vliv teplotní roztažnosti. To může zahrnovat klimatizované prostory nebo tepelnou izolaci.
- pravidelná kalibrace a kontrola: Pravidelná kalibrace a kontrola enkodérů může pomoci detekovat a opravit chyby způsobené teplotní roztažností dříve, než ovlivní přesnost měření.

Pro dosažení nejvyšší možné přesnosti je vhodné kombinovat všechny metody. Např. udržování stabilní teploty v místnosti může být ekonomicky i technicky náročné. Jako dostatečným řešením může být udržování teploty v místnosti v rozpětí několika °C. Vzniklou teplotní roztažnost lze následně kompenzovat pomocí teplotní kompenzace v počítačovém softwaru.

3.3 Způsob šíření tepla

Teplota je měřítkem průměrného množství kinetické energie, kterou částice v daném vzorku hmoty mají. Čím více se částice vibrují, pohybují a rotují, tím vyšší je teplota objektu. Teplo je tok energie z objektu s vyšší teplotou na objekt s nižší teplotou. Přenos tepla pokračuje, dokud oba objekty nedosáhnou tepelné rovnováhy a nejsou na stejné teplotě. K šíření tepla dochází třemi způsoby:

- vedení (kondukcce): Kinetická energie se předává neuspořádaným pohybem molekul se na sousední molekuly, čímž se přenáší tepelná energie. Ke kondukcce dochází v pevných látkách ale i v kapalinách a plynech, když se vyloučí vliv proudění.
- proudění (konvekce): Ke konvekce dochází v kapalinách a v plynech. Přemístěním molekul v prostoru se přenáší i jejich tepelná energie. K přemístění molekul dochází vlivem přirozeného a nuceného proudění.
- záření (radiace, sálání): Jedná se o šíření elektromagnetických vln nebo infračerveného záření mezi dvěma objekty rychlostí světla. Podstatný vliv radiace je znát při větším tepelném rozdílu jednotlivých ploch, které na sebe navzájem vyzařují. Příkladem je pocit tepla z ohně, i když nedochází ke kontaktu s ohněm. [39], [42]

3.4 Materiály lineárních enkodérů

Měřicí stupnice lineárních enkodérů se vyrábí z různých kombinací materiálů podkladu a mřížky. Ideální kombinace je závislá na konkrétním způsobu používání. Substrát bývá nejčastěji vyroben z korozivzdorné oceli nebo ze skla. Koeficient teplotní roztažnosti

oceli je $\alpha = 10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Vzhledem k vyšší houževnatosti oceli lze tyto stupnice do délky více než 70 metrů. Sklo má koeficient teplotní roztažnosti $\alpha = 8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a tyto stupnice se vyrábějí pouze v menších rozměrech. Dalším materiálem substrátu je ZERODUR (sklokeramika) s koeficientem teplotní roztažnosti $\alpha = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. ZERODUR je ale poměrně drahý a používá se jen v případě požadavku největší přesnosti.

Mřížka bývá vyrobena fotolitografickými procesy, což je metoda přenosu motivu na tělo substrátu. Dále budou popsány materiály stupnice vyráběných společností Heidenhain.

- METALLUR: odolná stupnice sestávající z nanesených kovových linek na zlatě. Typická mřížková perioda je 40 μm .
- DIADUR: extrémně robustní chromové linky na skle (typická mřížková perioda je 20 μm) nebo trojrozměrné chromové struktury s typickou mřížkovou periodou, která je 8 μm na skle.
- SUPRADUR: opticky trojrozměrná fázová mřížka, která je ale mechanicky dvourozměrná (plochá struktura). Toto řešení je zvláště odolné vůči znečištění. Typická mřížková perioda je 8 μm a jemnější.
- OPTODUR: opticky trojrozměrná fázová mřížka s plochou strukturou s obzvláště vysokou odrazivostí. Typická mřížková perioda je 2 μm a jemnější. [43]

4 Návrh simulace teplotní roztažnosti lineárního enkodéru

Cílem této kapitoly je navrhnout simulaci, která odpovídá provedenému měření. Následně by se výsledky této simulace využily při dalších měřeních, aby se minimalizovala nepřesnost způsobená teplotní roztažností. Dosáhlo by se tak opět vyšší přesnosti odměřování polohy.

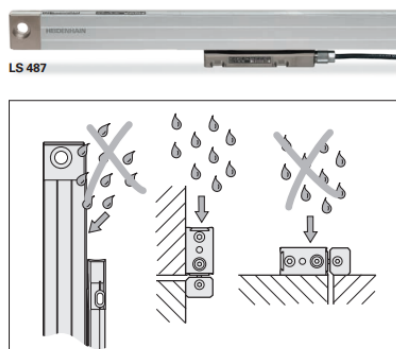
4.1 Popis enkodéru Heidenhain LS 487

V následující kapitole je podrobněji popsán snímač polohy Heidenhain LS 487. Jedná se o lineární inkrementální snímač polohy, který je zapouzdřený v hliníkovém těle. Vyrábí se v různých délkových rozměrech a provedeních, aby přesně vyhovoval požadavkům zákazníků. Rozhraní je možné pouze 1 Vpp (Voltage peak to peak), zatímco jiné modely snímačů se nabízí i s rozhraními EnDat 2.2, DRIVE-CLiQ, TTL, Fanuc α i, Mitsubishi, Panasonic a dalšími. V Tab. 1 jsou popsány vlastnosti enkodéru Heidenhain LS 487.

Tab. 1: Vlastnosti enkodéru Heidenhain LS 487

Konstrukce enkodéru	zapouzdřený
Materiál stupnice	skleněná stupnice
Materiál mřížky	DIADUR
Přesnost mřížky	$\pm 5 \mu\text{m}$, $\pm 3 \mu\text{m}$
Způsob odměřování polohy	inkrementální
Měřicí vzdálenost [mm]	70, 120, 170, ..., 820, 920, 1020, 1140, 1240, ..., 2040
Teplotní koeficient	$\alpha = 8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Rozhraní	1 Vpp
Perioda signálu	20 μm
Provozní teplota	0 °C až 50 °C
Rychlost pohybu	$\leq 120 \text{ m/min}$
Délka kabelu	$\leq 150 \text{ m}$
Hmotnost	0,4 kg + 05 kg/m
Požadovaná síla k pohybu	$\leq 5 \text{ N}$
Napájecí napětí bez zátěže	DC 5 V $\pm 0,25 \text{ V}$ / $< 120 \text{ mA}$
Stupeň ochrany při montáži dle instrukcí výrobce	IP53
Stupeň ochrany při přetlaku vzduchu	IP64

Stupeň ochrany IP53 podle normy ČSN EN 60529 je splněn při instalaci dle montážních informací a pokynů dle výrobce – montování s těsněním (těsnicími rty) směrem od stříkající vody nebo směrem dolů. Na Obr. 19 je znázorněna montáž enkodéru pro splnění ochrany IP53.

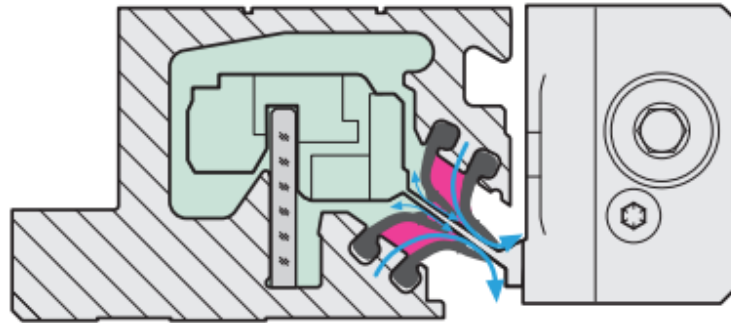


Obr. 19: Znázornění montáže enkodéru [43]

Pokud je snímač vystaven vysokým koncentracím prachu a dalších nečistot, lze použít vzduchové těsnění, které zajistí stupeň ochrany IP64. Pro aplikaci stlačeného vzduchu je enkodér vybaven přírady na obou koncových blocích a na montážním bloku skenovací jednotky. Průtok vzduchu je regulován pomocí spojovacími kusy Heidenhain s integrovanou škrticí klapkou, které jsou připojeny na filtrační systém stlačeného vzduchu (např. Heidenhain DA 400, který je zobrazen na Obr. 20). Optimální průtok vzduchu by se měl pohybovat mezi 7 l/min až 10 l/min. Na Obr. 21 je schematicky znázorněna ochrana pravítka Heidenhain LC 1x5 pomocí stlačeného vzduchu.

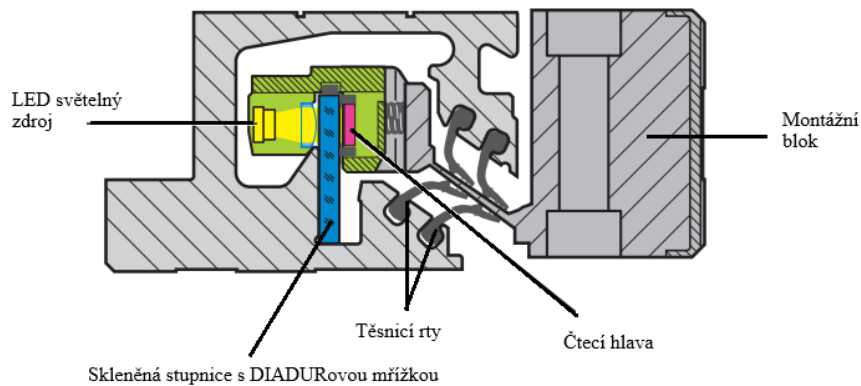


Obr. 20: Filtrační systém stlačeného vzduchu [44]



Obr. 21: Těsnící systém pravítka LC 1x5 [43]

Samotný lineární enkodér se skládá z hliníkového těla, těsnicího systému, čtecí hlavy, LED (Light-Emitting Diode) světelného zdroje a skleněné stupnice s DIADURovou mřížkou. Složení je popsáno a znázorněno na Obr. 22. Čtecí hlava se pohybuje na vedení s nízkým třením, kterým je spojena s montážním blokem a pracovním strojem. [43]



Obr. 22: Schematický popis pravítka LC 115 [43]

4.2 Teplotní snímač

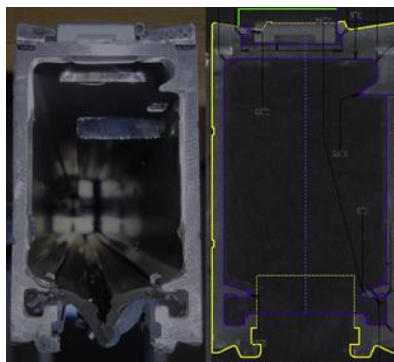
Na hliníkové tělo enkodéru bylo umístěno několik teplotních odporových senzorů PT1000 (Obr. 23). Měření je založeno na změně elektrického odporu platiny (PT) při změně teploty. U drahých kovů, jako je platina, je odporová charakteristika přibližně lineární. Číslo 1000 označuje, že senzor má při teplotě 0 °C odpor 1000 ohmů. Při napájení konstantním proudem lze určit změnu odporu a teploty na základě změny napětí. Napájecí proud by měl být co nejmenší, aby nedocházelo k samoohřívání odporového senzoru, což by způsobovalo nepřesné měření. [45]



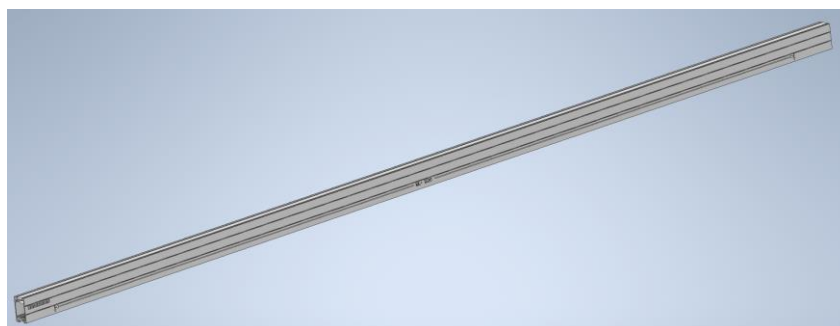
Obr. 23: Teplotní senzor PT1000 [46]

4.3 Tvorba CAD modelu

Na základě snímku průřezu lineárního snímače polohy Heidenhain LS 487 byla v programu Inventor vytvořena jeho digitální podoba (Obr. 24). Na digitálně vytvořený průřez se následně aplikovalo vysunutí do délky, aby se vytvořil 3D model (Obr. 25).



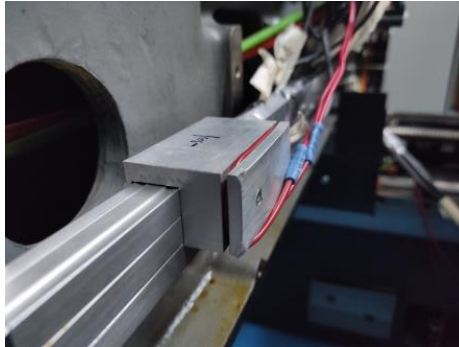
Obr. 24: Vytvoření průřezu pravítka



Obr. 25: Vytvořený 3D model pravítka

4.4 Okrajové podmínky

Během měření byl lineární enkodér v geometrickém středu ohříván hliníkovým otopným tělesem. Umístění otopného tělesa na enkodéru je zobrazeno na Obr. 26. Rozměry otvoru na enkodér v otopném tělese byly 70 mm na délku, 18,4 mm na šířku a 23 mm na výšku. Do drážky široké 3 mm byl vložen topný karbonový vodič a teplotní senzor PT1000, který odesílá zpětnou informaci o aktuální teplotě otopného tělesa.



Obr. 26: Otopné těleso umístěné na enkodéru

Teplota otopného tělesa byla postupně zvyšována s krokem 5 °C z počátečních 25 °C až do 45 °C a následně snížena zpět na 25 °C. Výdrž na každé z těchto teplot byla dostatečně dlouhá, aby se změna teploty rovnoměrně projevila po celé délce enkodéru. Proces změny teploty byl řízen z počítače. Pro přenos tepla mezi otopným tělesem, tělem lineárního snímače polohy a teploměry je využita teplovodivá pasta.

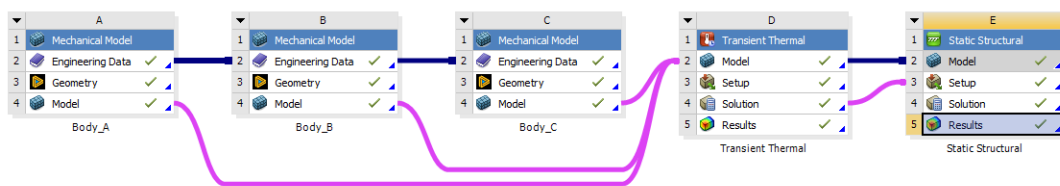
Lineární snímač byl namontován dle pokynů výrobce, bylo tedy dosaženo stupně ochrany IP53 podle normy ČSN EN 10529. Z důvodu nepřipojeného filtračního systému vzduchu se ale nedosáhlo na stupeň ochrany IP64, tělem enkodéru tedy neproudí stlačený vzduch. Proto lze předpokládat, že vliv šíření tepla prouděním (konvekci) uvnitř těla enkodéru bude zanedbatelný.

4.5 Tvorba modelu v programu Ansys Workbench

Při vytváření modelu v programu Ansys vznikaly problémy při tvorbě sítě. Jako vhodné řešení se ukázalo otisknutí průřezu enkodéru do jedné roviny a následně jej roztáhnout na požadovanou délku 802 mm, což je odpovídající délka těla pravítka s měřeným úsekem ML 720 mm.

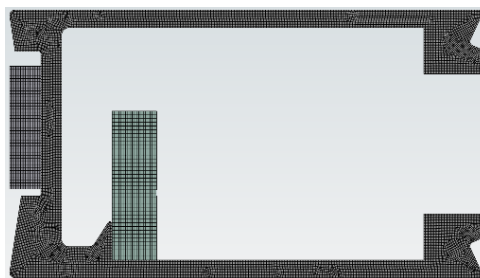
Z průřezu pravítka byly odstraněny drobné geometrické prvky, které komplikovaly tvorbu sítě – drážky nebo drobné výstupky. Při zjednodušení geometrie průřezu byla ale zachována stejná plocha průřezu. Změna plochy průřezu by měla negativní vliv na přesnost výpočtu šíření tepla po délce pravítka. Původní plocha průřezu hliníkového těla pravítka byla $135,69 \text{ mm}^2$ a po úpravě odpovídá $135,58 \text{ mm}^2$. Plocha průřezu po úpravě je pouze 0,08 % menší než původní plocha průřezu. Drobné zjednodušení geometrie nemá zásadní vliv na změnu délkové roztažnosti, ale má pozitivní vliv na stabilitu výpočetního systému a na rychlost výpočtu simulace.

Pro přehlednost modelu a jednoduchost případných úprav je enkodér rozdělen na tři tělesa (Obr. 27). Těleso A představuje hliníkový rám, těleso B skleněnou stupnici a těleso C představuje plastový proužek připevněný na hliníkovém rámu. Elastické těsnění bylo z modelu odebráno pro malý vliv na změnu teploty a délkového protažení. Box „Transient Thermal“ je určen k výpočtu šíření tepla po pravítku a v části „Static Structural“ se určují mechanické změny.

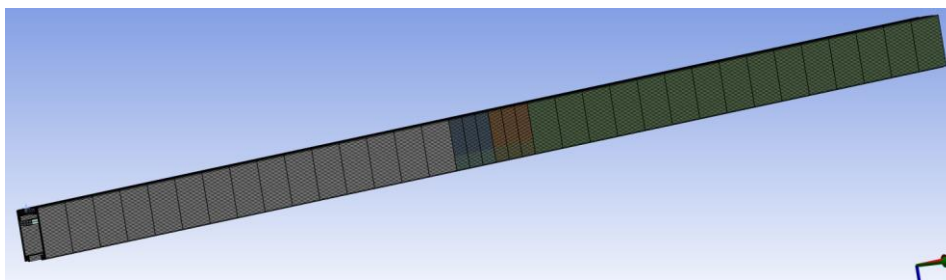


Obr. 27: Systémové nastavení v programu Ansys

Při tvorbě sítě byly aplikovány následující funkce: „MultiZone“, „Face Sizing“ pro vytvoření sítě v průřezu hliníkového těla a „Edge Sizing“ pro vytvoření sítě po délce hliníkového těla, skleněné stupnice a plastového proužku. Funkce „Edge Sizing“ byla vytvořena také pro vytvoření sítě v průřezu skleněné stupnice a plastového proužku. Celkový počet uzlů činí 3 117 677 a prvků 698 042. Vygenerovaná síť v průřezu je zobrazena na Obr. 28 a po délce na Obr. 29. Prvky jsou typu hexa.

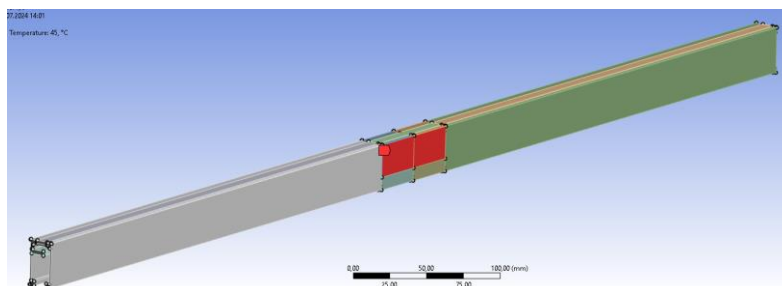


Obr. 28: Vygenerovaná síť v průřezu



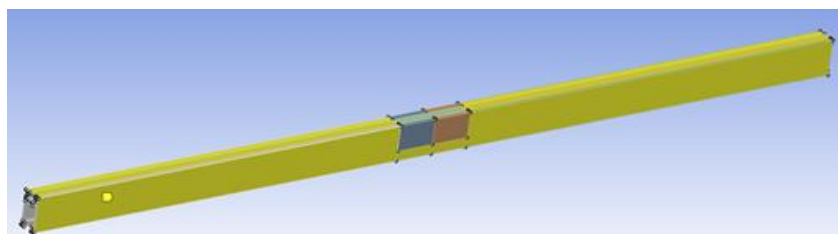
Obr. 29: Vygenerovaná síť po délce

Na Obr. 30 je červenou barvou zobrazeno působíště ohřívání hliníkového těla pravítka. Zahřívaná plocha má rozměry konkrétně 70 mm a 22,54 mm, což odpovídá rozměrům otopného tělesa bez drobné vůle. Hliníkové tělo je zahříváno pouze z jedné strany, i když jej otopné těleso obepíná i z druhé strany. V místě ohřívání hliníkového těla se uvažuje teplota otopného tělesa.



Obr. 30: Působíště tepleného namáhání

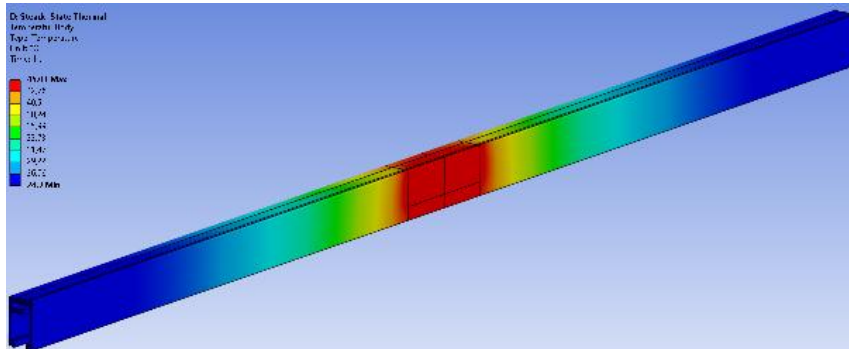
Působení konvekce se uvažuje na všech vnějších plochách s výjimkou těch, které jsou obepnuty otopným tělesem – zobrazeno žlutou barvou na Obr. 31. V okolí lineárního snímače polohy se předpokládá přirozená konvekce, Z důvodu neznámých hodnot (např. teplota v těsné blízkosti hliníkového těla) nelze výpočetně určit součinitel přestupu tepla např. pomocí vztahu pro Nusseltovo číslo. Součinitel přestupu tepla α se při přirozené konvekci pohybuje mezi 5 až 25 $W/(m^2 \cdot K)$. Experimentálně byla tato hodnota určena na 13 $W/(m^2 \cdot K)$.



Obr. 31: Působení konvekce na lineární snímač

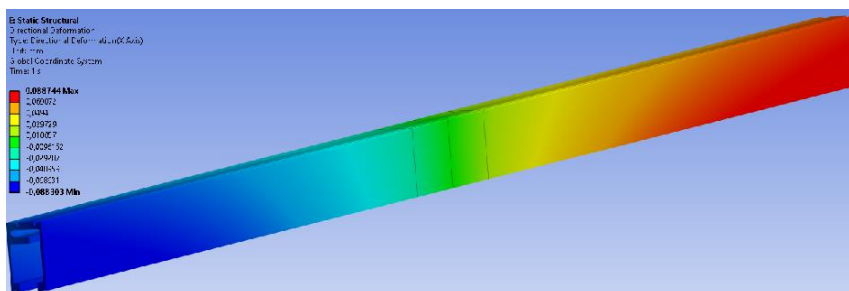
4.6 Výsledky simulace

Na Obr. 32 je zobrazen průběh teploty po délce pravítka při zahřívání na teplotu 45 °C. Snímač byl na tuto teplotu zahříván dostatečně dlouho, aby se teplo rozšířilo po celé délce.

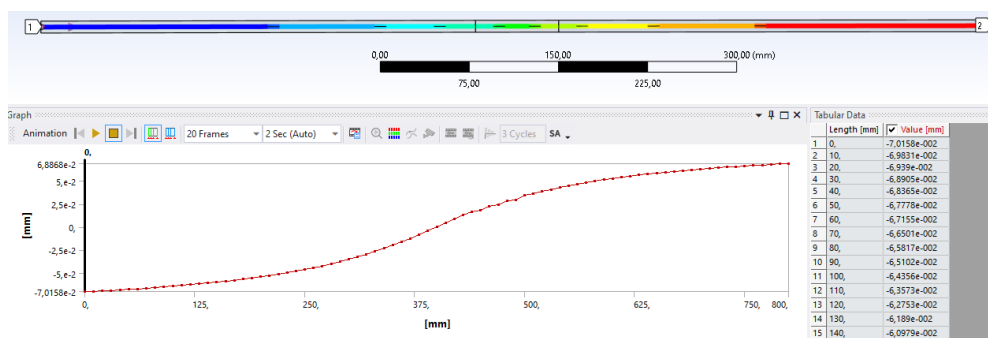


Obr. 32: Průběh teploty po délce lineárního snímače teploty

Délková deformace hliníkového těla při zahřívání na 45 °C je zobrazena na Obr. 33. Maximální vychýlení činí 88,5 μm a došlo k němu na koncích pravítka. Vychýlení skleněné stupnice zobrazené na Obr. 34 bylo na koncích bylo přibližně 69 μm.



Obr. 33: Délková deformace pravítka



Obr. 34: Vychýlení skleněné stupnice vůči středu

4.7 Srovnání výsledků simulace s měřením

V Tab. 2 jsou porovnány teploty z měření a ze simulace. Poloha 401 mm odpovídá geometrickému středu lineárního snímače polohy a zároveň i pracovního stroje. Teplota naměřená v poloze 401 mm je teplotou otopného tělesa.

Tab. 2: Srovnání teplot z měření a ze simulace

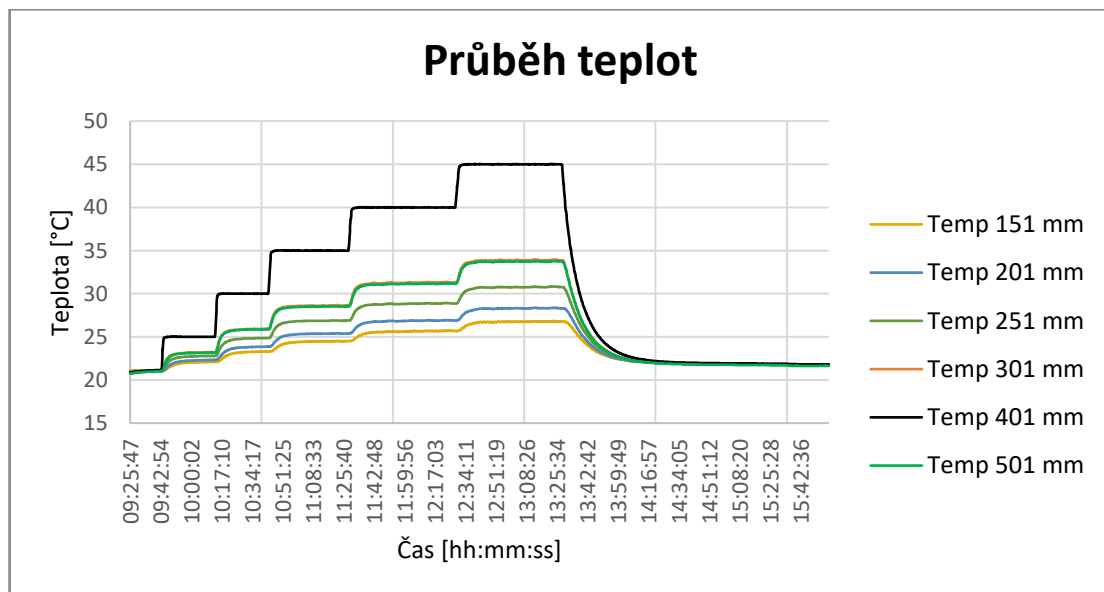
Poloha [mm]	Teplota okolí [°C]	Měření [°C]	Simulace [°C]	Rozdíl [°C]	Procentuální rozdíl [%]
151	21.6	22.09	22.266	0.176	5.18
201		22.33	22.502	0.172	5.06
251		22.79	22.852	0.062	1.82
301		23.23	23.363	0.133	3.91
401		25	25	0	0
501		23.16	23.367	0.207	6.09
151	21.7	23.28	23.333	0.053	0.64
201		23.85	23.909	0.059	0.71
251		24.85	24.764	-0.086	-1.04
301		25.94	26.011	0.071	0.86
401		30	30	0	0
501		25.87	26.022	0.152	1.83
151	21.8	24.48	24.407	-0.073	-0.55
201		25.37	25.325	-0.045	-0.34
251		26.88	26.686	-0.194	-1.47
301		28.61	28.67	0.06	0.45
401		35	35	0	0
501		28.54	28.687	0.147	1.11
151	21.9	25.68	25.489	-0.191	-1.06
201		26.88	26.75	-0.13	-0.72
251		28.85	28.619	-0.231	-1.28
301		31.28	31.339	0.059	0.33
401		40	40	0	0
501		31.17	31.362	0.192	1.06
151	21.9	26.76	26.162	-0.598	-2.59
201		28.35	27.75	-0.6	-2.60
251		30.82	30.126	-0.694	-3.00
301		33.91	33.618	-0.292	-1.26
401		45	45	0	0
501		33.77	33.649	-0.121	-0.52

Zde jsou uvedeny příklady výpočtu rozdílu teplot a procentuálního rozdílu teplot mezi teplotami z měření a ze simulace pro teplotu 25 °C a polohu 151 mm:

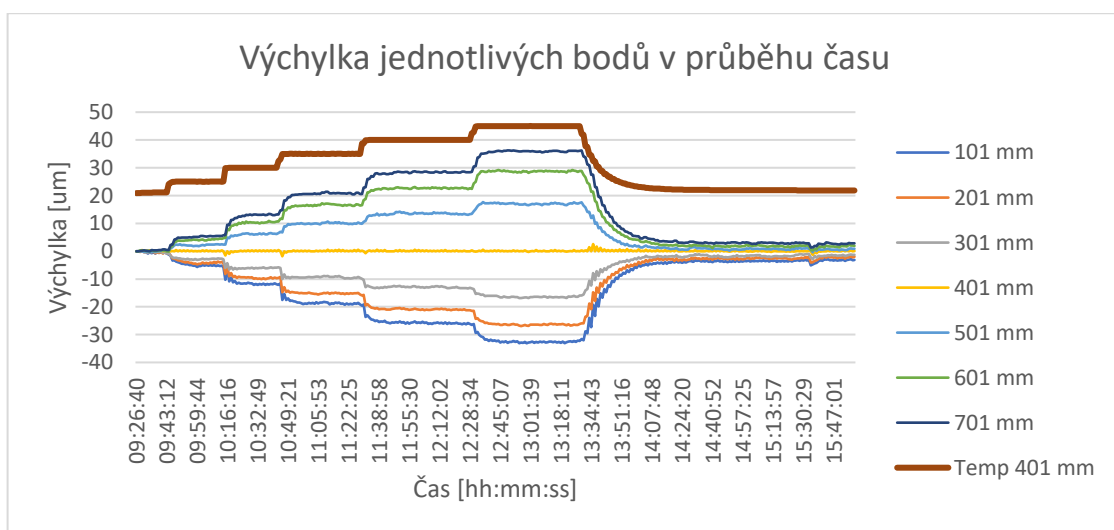
- Rozdíl: $\Delta T = 22,266 - 22,09 = 0,176 \text{ } ^\circ\text{C}$ (4)

- Procentuální rozdíl: $\delta = \frac{22,266-22,09}{25-21,6} = 5,18 \%$ (5)

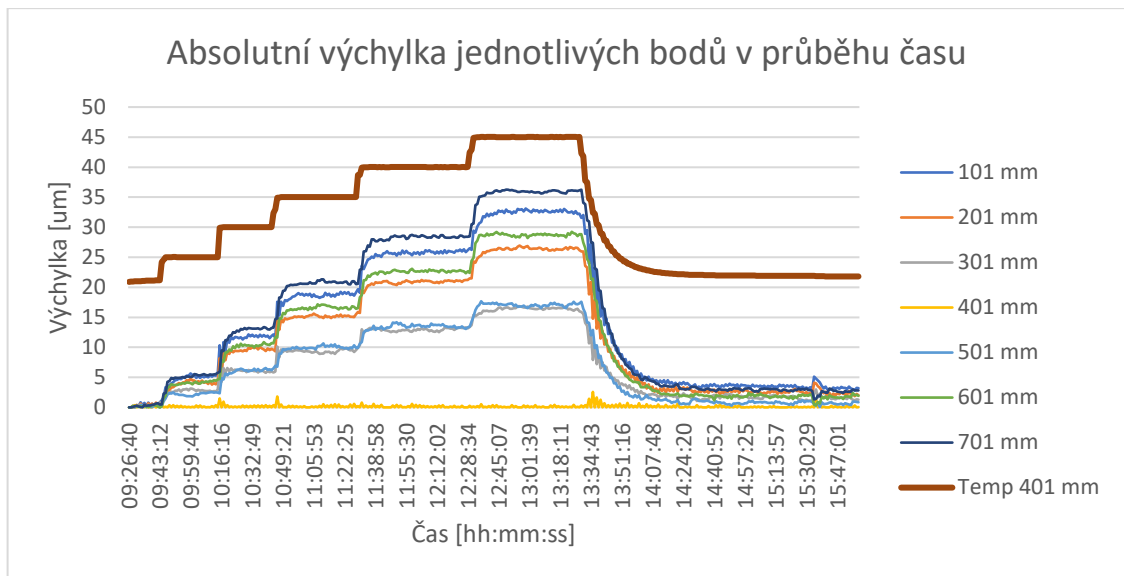
Rozdíly mezi teplotami z měření a ze simulace byly do 3 % s výjimkou měření při 25 °C, kdy byl rozdíl až 6 %. Rozdíly mohou být způsobeny různými vlivy – nepřesností snímačů PT1000, mírně vychýleným teplotním snímačem vůči měřené poloze nebo nerovnoměrným nanesením teplovodivé pasty na hliníkovém těle pravitka.



Obr. 35: Průběh teploty v jednotlivých bodech během měření



Obr. 36: Naměřená výchylka jednotlivých bodů vůči středu



Obr. 37: Naměřená absolutní výchylka jednotlivých bodů vůči středu

Na Obr. 35 je zobrazen průběh teploty v jednotlivých bodech během měření a na Obr. 36 a jsou viditelné výchylky jednotlivých bodů vůči středu pravítka. Obr. 37 znázorňuje absolutní výchylku jednotlivých bodů, díky čemuž lze jednoduše zjistit, že dochází k asymetrickému prodlužování pravítka – jedna strana se prodlužuje více než druhá. srovnání výchylek z měření a ze simulace. Výchylka byla naměřena pomocí interferometru XL-80. Interferometr byl umístěn na opačné straně pracovního stroje než lineární snímač polohy, aby nedošlo k ovlivnění paprsku.

Zde je uveden příklad výpočtu rozdílu výchylky polohy mezi simulací a měřením při teplotě středu 25 °C na pozici 101 mm.

$$\Delta x = -7,143 - (-5,388) = -1,755 \mu m \quad (6)$$

Tab. 3: Srovnání výchylek z měření a ze simulace

Pozice [mm]	Teplota středu [°C]	Měření [μm]	Simulace [μm]	Rozdíl [μm]
101	25	-5.388	-7.143	-1.755
201		-4.050	-6.433	-2.383
301		-2.740	-4.415	-1.675
401		0	-0.002	-0.002
501		2.425	4.326	1.902
601		4.526	6.259	1.733
701		5.486	6.988	1.501
101	30	-11.903	-21.448	-9.545
201		-9.751	-18.372	-8.621
301		-5.962	-12.099	-6.137
401		0	-0.005	-0.005
501		6.157	11.860	5.703
601		10.724	17.861	7.137
701		13.227	21.008	7.781
101	35	-18.902	-35.803	-16.901
201		-15.087	-30.346	-15.259
301		-9.581	-19.796	-10.215
401		0	-0.008	-0.008
501		9.839	19.406	9.567
601		16.833	29.496	12.663
701		21.005	35.077	14.072
101	40	-26.329	-50.208	-23.879
201		-21.181	-42.354	-21.173
301		-13.223	-27.506	-14.283
401		0	-0.011	-0.011
501		13.239	26.964	13.725
601		22.624	41.164	18.540
701		28.368	49.196	20.828
101	45	-32.656	-64.356	-31.700
201		-26.572	-54.241	-27.669
301		-16.331	-35.188	-18.857
401		0	-0.014	-0.014
501		17.227	34.494	17.267
601		28.899	52.716	23.817
701		36.100	63.060	26.960

4.8 Shrnutí

V kapitole 4 byl popsán lineární snímač polohy Heidenhain LS 487, pomocí kterého se provedlo odměřování polohy na pracovním stroji. Cílem této kapitoly bylo navržnutí simulace tepelného namáhání tohoto snímače v programu Ansys, která by odpovídala hodnotám z provedeného měření. Rozdíly mezi naměřenými teplotami a těmi ze simulace byly minimální, zatímco rozdíly výchylek polohy byly podstatně větší.

5 Diskuse

V průběhu navrhování simulace tepelného namáhání pravítka Heidenhain LS 487 bylo provedeno několik zjednodušení. Bylo předpokládáno, že teplota ohřívané plochy hliníkového těla lineárního snímače polohy má teplotu otopného tělesa, i když ve skutečnosti mohlo dojít k drobnému rozdílu teplot. Nebylo možné umístit teplotní snímač na hliníkové tělo z důvodu kolize s otopným tělesem. Ačkoliv otopné těleso obepínalo lineární snímač ze tří stran, přestup tepla se uvažoval pouze na jedné ploše. Na snímači nebyly umístěny koncovky a byl zanedbán vliv těsnících rtů na šíření tepla po délce pravítka.

Z důvodu stabilnější a simulace a rychlejšího výpočtu byly z průřezu pravítka odstraněny drobné geometrické výstupky a drážky. Plocha průřezu byla zachována původní, aby nedošlo k výraznému ovlivnění šíření tepla po délce pravítka.

Snímače teploty byly umístěny na těle pravítka na plastovém proužku. Pomocí teplovodivé pasty bylo dosaženo lepšího šíření tepla mezi hliníkovým tělem pravítka a teplotním senzorem. Z důvodu omezení vlivu heterogenních materiálů by bylo vhodnější umístit teplotní senzor přímo na hliníkové tělo. V katalogu výrobce není uveden materiál plastového proužku. Rozdíly teplot v simulaci při použití různých materiálů byly relativně malé. Z knihovny byl využit materiál PA6, který má součinitel přestupu tepla $\alpha=1,467 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ a tepelnou kapacitou $C_{20^\circ\text{C}}=1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Bylo by vhodné zjistit od výrobce přesné vlastnosti tohoto materiálu.

Teplota naměřená v poloze 301 mm (Obr. 35) je mírně vyšší než v symetrické poloze 501 mm, i když je výchylka v poloze 301 mm menší než v poloze 501 mm (Obr. 37). Tento paradox může být způsoben např. mírně vychýleným teplotním snímačem nebo nerovnoměrným nanesením teplovodivé pasty. Zároveň na pozicích 501 mm, 601 mm a 701 mm je naměřena větší výchylka než na vůči středu symetrických pozicích 301 mm, 201 mm a 101 mm. Toto asymetrické protažení může být způsobeno nesymetrickým umístěním teplotních senzorů. Teplotní senzory umístěné na pozicích 251 mm, 201 mm a 151 mm odebírají z těla lineárního snímače polohy část tepla, zatímco pozice 551 mm, 601 mm a 651 mm nejsou ovlivněny šířením tepla do teplotních snímačů, což může způsobit větší protažení.

Rozdíly mezi výchylkami z měření a ze simulace (Tab. 3) jsou poměrně velké, i když rozdíly mezi teplotami (Tab. 2) byly minimální. Může to být způsobeno zanedbáním vlivu adheziva (lepidla) mezi hliníkovým tělem a skleněnou stupnicí. Jelikož slitina hliníku má mnohem větší součinitel teplotní roztažnosti ($\alpha_{Al} = 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) než stupnice ze skla ($\alpha_{sklo} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), může lepidlo způsobit menší posun skleněné stupnice než hliníkového těla.

6 Závěr

Předložená bakalářská práce se věnuje problematice analýzy chyby odměřování polohy při teplotním namáhání. Vlivem změny okolní teploty (teploty v hale) dochází i ke změně teploty lineárního snímače polohy. Cílem této bakalářské práce bylo navrhnutí simulace, která by kompenzovala vliv teplotní roztažnosti. Výsledky simulace by se při dalších měřeních zahrnuly do výpočtu polohy, čímž by došlo ke zvýšení přesnosti odměřování polohy pracovního stroje a zvýšení přesnosti výroby.

V kapitole 2 byly popsány různé druhy snímačů polohy. Ty se dle konstrukce dělí na lineární a rotační snímače, zapouzdřené a otevřené snímače. Dle způsobu odměřování polohy se dělí na přímé a nepřímé, na absolutní a relativní a na digitální a analogové. Dle fyzikálního principu lze snímače polohy rozdělit na optické, indukční, kapacitní, magnetické, odporové a další. Existuje velké množství druhů odměřování polohy a každá metoda nabízí určité výhody i nevýhody. V závislosti na konkrétním využívání snímače je zapotřebí vybrat vhodný typ snímače.

Jelikož je ekonomicky a časově výhodné využívat počítačové programy, stále častěji se při vývoji nebo i při výrobě využívají různé počítačové programy. Jejich prostřednictvím lze zjednodušit vývoj nebo zrychlit a zpřesnit výrobu. Mezi nejčastěji využívané SW programy patří AutoCAD, Inventor, SolidWorks, Ansys, Catia nebo Siemens TIA Portal.

Kapitola 3 popisuje způsoby šíření tepla. Teplotní roztažnost a změna teploty přímo ovlivňuje přesnost snímačů polohy, je proto zapotřebí věnovat této problematice pozornost. Existují tři druhy šíření tepla – kondukce, konvekce a radiace. Přesnost odměřování polohy je výrazně ovlivněna vedením tepla (kondukcí) a prouděním (konvekcí). Za obvyklých podmínek má účinek radiace malý vliv na přesnost snímače polohy. Je zapotřebí počítat s negativním vlivem kondukce a konvekce na přesnost odměřování, aby se zvýšila přesnost pracovních strojů. Díky tomu se můžou vyrábět výrobky s větší přesností.

Kapitola 4 je stěžejní část bakalářské práce, která popisuje chování lineárního snímače polohy Heidenhain LS 487 při teplotním namáhání během odměřování polohy. Snímač Heidenhain LS 487 je lineárním zapouzdřeným inkrementálním snímačem, který je vzhledem ke svým rozměrům vhodný pro instalaci na strojích s omezeným prostorem.

Snímač byl během měření ve svém středu v několika krocích ohříván z teploty prostředí až na teplotu 45 °C. Cílem simulace v programu Ansys bylo navrhnutí metody, která by kompenzovala vliv teplotní roztažnosti tohoto pravítka.

Nejprve byl vytvořen 3D model snímače Heidenhain LS 487 v programu Inventor. Tento model se následně načel v programu Ansys Workbench, který pomocí MKP (Metody konečných prvků) rozdělí model pravítka na velké množství drobných prvků/elementů. Na základě tohoto rozdělení lze určit teplotu nebo výchylku polohy v různých bodech. Ačkoliv není průběh hodnot spojitý a nelze určit požadované hodnoty ve všech bodech pravítka, na základě rozdělení tělesa na velké množství malých prvků lze získat velmi přesný výsledek požadovaných veličin.

Z výsledků lze konstatovat, že simulace teploty odpovídá naměřeným hodnotám s chybou maximálně 6 %. Rozdíly mezi hodnotami výchylek ze simulace a z měření dosahují řádově vyšších chyb. Pravděpodobným důvodem nepřesnosti je zanedbání některých účinků, nejpravděpodobněji účinku šíření tepla přes adhezivum mezi hliníkovým tělem snímače polohy a skleněnou stupnicí.

V diskusi byla popsána omezení a doporučení pro případná další měření a simulace. Předpokládá se využití této simulace do dalších měření.

7 Zusammenfassung der Bachelorarbeit in der deutschen Sprache

7.1 Einleitung

Ein Encoder ist ein Kommunikationsgerät, das die Bewegung eines Geräts kontrolliert. Es wandelt rotierende oder lineare Bewegungen in analoge oder digitale Signale um. Es gibt die aktuelle Position des Motors oder anderer beweglicher Komponenten an. Sensoren werden in einer Vielzahl von Maschinen verwendet – in Produktionsmaschinen, Autos, Computern usw. Durch die Nutzung von Sensoren wird eine höhere Genauigkeit und Effizienz der Maschinen erreicht. Es handelt sich um sehr präzise funktionierende Geräte, aber dennoch ist es notwendig, die Entwicklung fortzusetzen, um noch höhere Genauigkeit und Effizienz in der Produktion zu erreichen. Es gibt mehrere Möglichkeiten, Encoder zu unterteilen. Die Genauigkeit des Encoders hängt von der gewählten Technologie und der Anwendung ab. Sie bewegt sich im Bereich von Hunderten von Mikrometern bis zu Nanometern. [1]

Die grundlegendste Unterteilung ist, ob die lineare oder die Winkelverschiebung erfasst wird. Eine weitere Unterteilung der Encoder erfolgt in absolute und inkrementale Sensoren, nach der Art der Messung (direkt und indirekt), nach dem Konstruktionstyp (offen und gekapselt), nach der Kontinuität des Signals und nach dem physikalischen Prinzip – sie nutzen Veränderungen des elektrischen Widerstands, der Kapazität, der Induktivität, magnetische und optische Eigenschaften usw. Dank der bekannten Position kann durch zusätzliche Berechnungen die Geschwindigkeit, die Beschleunigung und der Ruck (Änderung der Beschleunigung) der Encoder berechnet werden. Es kann auch die maximal mögliche Geschwindigkeit und Beschleunigung eingestellt werden, um eine Beschädigung der Maschine zu vermeiden.

7.2 Stand der Technik

Die Genauigkeit von Positionssensoren findet breite Anwendung in vielen modernen Technologien. Sie werden in der industriellen Automatisierung eingesetzt, um eine genauere und schnellere Produktion zu ermöglichen. In der Automobilindustrie werden sie beispielsweise für die präzise Motorsteuerung verwendet oder sichern auf

Montagelinien die genaue Bewegung von Teilen und ihre Positionierung. Im Gesundheitswesen bieten sie Rückmeldungen bei feinen Operationen. Weitere Anwendungen für Positionssensoren finden sich in der Luft- und Raumfahrt, im Verteidigungssektor, in Druckern und in Textilmaschinen. Durch ihren Einsatz kann eine effizientere und letztlich kostengünstigere Produktion erreicht werden.

Die Entwicklung von Positionssensoren begann bereits in den 1920er Jahren. Ein bedeutender Meilenstein war jedoch der Beginn der 1960er Jahre, als die Firma Heidenhain den DOM (Digital Optical Measuring Instrument) entwickelte. Im Jahr 1969 stellte Bill Watt, der Gründer der Encoder Products Company (EPC), den Modell 711 Cube Encoder vor, der aufgrund seiner Vielseitigkeit Verwendung fand. [2], [3]

Es gibt viele Unternehmen, die Positionssensoren entwickeln. Zu den wichtigsten Herstellern gehören Heidenhain, Renishaw, Mitutoyo, ifm electronic, Dynapar, Maxon und andere. [4]

Trotz der hohen Präzision von Positionssensoren gibt es verschiedene Faktoren, die ihre Genauigkeit beeinflussen können – wie die Qualität der Lagerung, Verschmutzung der Leseeinrichtung, digitales Rauschen, thermische Ausdehnung und andere. Die thermische Ausdehnung kann durch Temperaturschwankungen, mechanische Belastung des Sensors während der Bewegung oder Wärmeübertragung vom Produktionsmaschine auf den Sensor selbst verursacht werden. Die Auswirkungen der thermischen Ausdehnung werden in den folgenden Veröffentlichungen genauer behandelt: [5], [6], [7].

7.2.1 Unterteilung der Längenmessgeräte nach Bewegungsart

Lineare Sensoren

Encoder werden in lineare und rotatorische Sensoren unterteilt, wobei jede Art für verschiedene Anwendungen geeignet ist. Lineare Sensoren erfassen Bewegungen entlang einer geraden Strecke und bieten durch ihre berührungslose Funktionsweise Vorteile wie geringere Störanfälligkeit. Sie können sowohl gekapselt als auch offen konstruiert sein, je nach den Umgebungsbedingungen der Maschine.



Obr. 38: Lineares Längenmessgerät Heidenhain [8]

Rotarische Sensoren

Winkelsensoren oder rotatorische Encoder wandeln Rotationsbewegungen in digitale Signale um und messen Winkelgrößen wie Winkelgeschwindigkeit und Winkellage. Sie werden oft mit anderen Sensortypen kombiniert, um umfassende Bewegungs- und Orientierungsinformationen zu liefern. Genauigkeit und Zuverlässigkeit hängen von verschiedenen Umweltfaktoren ab, die bei der Systemgestaltung berücksichtigt werden müssen. Winkelsensoren können nach dem Messprinzip und dem Lagerungstyp in verschiedene Kategorien eingeteilt werden, wobei jede Kategorie spezifische Vor- und Nachteile aufweist. [9], [10]



Obr. 39: Rotatorisches Längenmessgerät Heidenhain [11]

7.2.2 Gekapselte und offene lineare Sensoren

Lineare Sensoren können je nach Konstruktion als gekapselte oder offene Sensoren ausgeführt sein. Gekapselte Sensoren bieten Schutz vor Verunreinigungen und sind ideal für präzise Messungen in anspruchsvollen Umgebungen, sind jedoch teurer und komplexer zu installieren. Sie eignen sich besonders für Anwendungen in Werkzeugmaschinen und können in verschiedenen Gehäuseprofilen für unterschiedliche Einbausituationen ausgeführt sein. Offene Sensoren hingegen bieten eine einfachere Installation und können für Anwendungen mit höheren Bewegungsgeschwindigkeiten besser geeignet sein, sind jedoch weniger geschützt und daher anfälliger für Umwelteinflüsse.



Obr. 40: Gekapseltes lineares Längenmessgerät Heidenhain LC 100 [14]

Offene lineare Encoder bestehen aus einem Maßstab und einem Abtastkopf, die ohne mechanischen Kontakt arbeiten, und werden für hochpräzise Anwendungen wie in der Halbleiterindustrie und bei Messmaschinen eingesetzt. Ihre Vorteile sind hohe Geschwindigkeit und Messgenauigkeit, aber sie erfordern eine sehr ebene Montagefläche und sind anfällig für Umwelteinflüsse. [15]

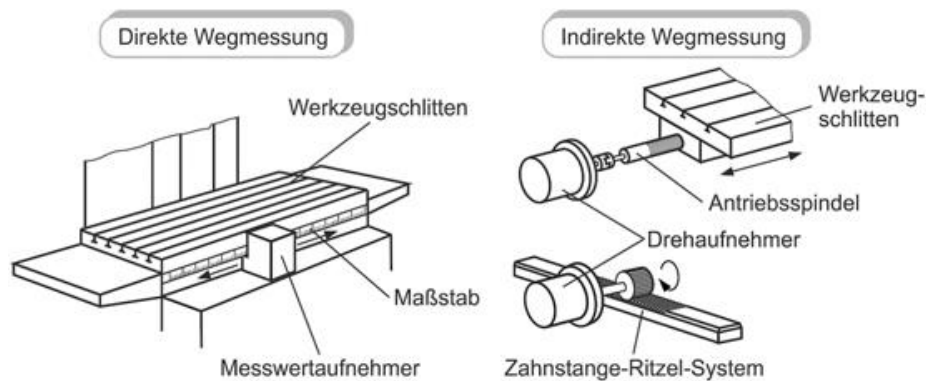


Obr. 41: Offenes lineares Längenmessgerät Heidenhain LIC 4100 [16]

7.2.3 Direkte und indirekte Positionsmessung

Die direkte Positionsmessung erfasst die Position eines Objekts ohne mechanische Übertragung und wandelt diese in ein elektrisches Signal um, was eine hohe Präzision ermöglicht. Sie wird direkt an den beweglichen Teilen der Maschine montiert, um thermische Ausdehnungseinflüsse zu minimieren, ist jedoch teurer und aufgrund der Maschinenkonstruktion oft nicht umsetzbar.

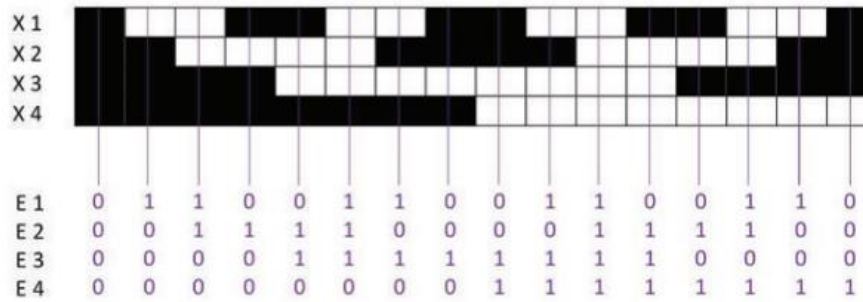
Die indirekte Positionsmessung berechnet die Position anhand der Drehung einer Kugelspindel oder eines Ritzels und ist kostengünstiger und einfacher zu konstruieren. Sie eignet sich für weniger anspruchsvolle Anwendungen, ist jedoch anfällig für Fehler durch thermische Ausdehnung und mechanisches Spiel, was die Genauigkeit beeinträchtigen kann. [17]



Obr. 42: Direkte und indirekte Positionsmessung [47]

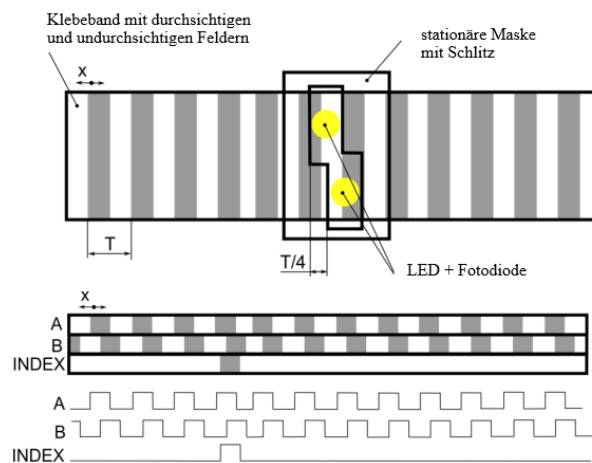
7.2.4 Absolute und relative Positionsmessung

Absolute Sensoren speichern die aktuelle Position auch im ausgeschalteten Zustand und identifizieren jede Position durch einen einzigartigen Code. Dies ermöglicht eine sofortige Positionsbestimmung nach einem Stromausfall, wodurch die Vorbereitungszeit der Maschine verkürzt wird. Dank technologischer und softwareseitiger Fortschritte werden absolute Sensoren zunehmend gegenüber inkrementalen Sensoren bevorzugt. Sie nutzen optische, kapazitive oder magnetische Sensoren zur Positionsbestimmung und verwenden zur Kodierung oft den Gray-Code (Obr. 43), um Probleme bei der gleichzeitigen Änderung mehrerer Werte zu vermeiden.



Obr. 43: Schema von Gray-Code [20]

Inkrementale Sensoren bestimmen die Position durch das Zählen von Impulsen ab einem Referenzpunkt und sind kostengünstiger als absolute Sensoren. Sie sind jedoch empfindlicher gegenüber äußeren Störungen und benötigen eine Referenzfahrt nach dem Einschalten. Bei Stromausfällen geht die Positionsinformation verloren, was den Produktionsprozess beeinträchtigen kann.

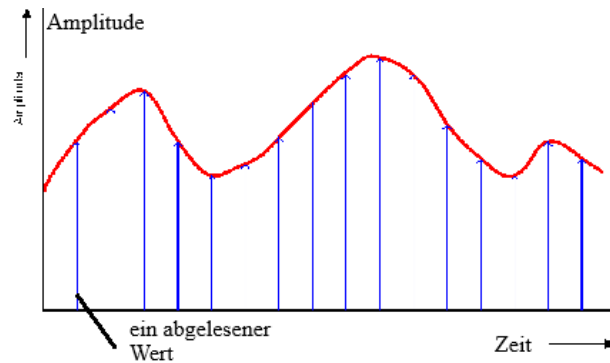


Obr. 44: Verlauf von Signalen eines inkrementellen Sensors [21]

7.2.5 Analoge und digitale Längenmessgeräte

Analoge Encoder erzeugen kontinuierliche Signale, die zeitlich variabel sind und innerhalb eines bestimmten Bereichs unendlich viele Werte annehmen können. Die Auflösung wird erst bei der Umwandlung in ein digitales Signal begrenzt. Diese Signale nutzen eine bestimmte Eigenschaft des Mediums zur Informationsübertragung, ähnlich wie Strom, der sich durch einen Leiter bewegt. Die gemessene Größe wird durch eine andere physikalische Größe ausgedrückt.

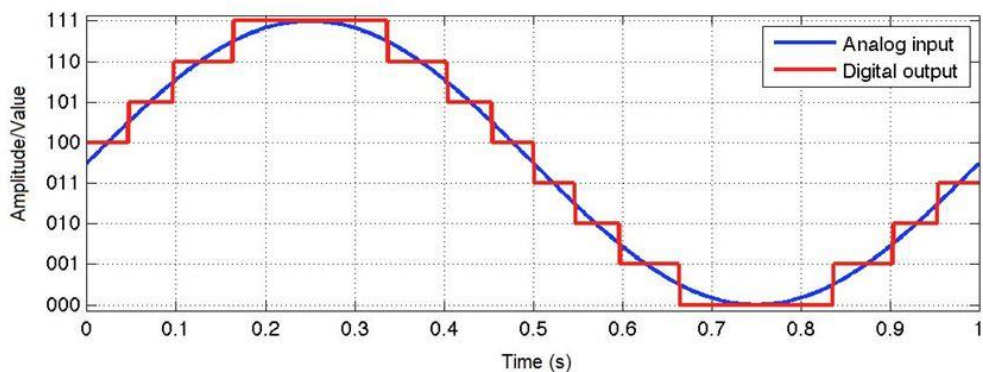
Sensoren mit analogem Signal haben mehrere Vorteile, darunter eine einfachere Datenverarbeitung, ein niedrigerer Preis, ihre Eignung für die Tonaufzeichnung und die Nutzung einer geringeren Bandbreite als digitale Töne. Sie haben jedoch auch Nachteile, wie eine geringere Signalqualität im Vergleich zu digitalen Signalen und eine höhere Empfindlichkeit der Kabel gegenüber äußeren Einflüssen.



Obr. 45: Analoges Signal [22]

Digitale Encoder erzeugen diskrete Signale, die in digitalen Geräten weit verbreitet sind. Sie stellen Daten als Sequenz von Werten dar, wobei jeder Wert zu einem bestimmten Zeitpunkt nur eine begrenzte Anzahl von Möglichkeiten hat. Der Pfad dieser Werte wird in Inkrementen dargestellt, wobei benachbarte Werte sich um ein Inkrement unterscheiden.

Diese Encoder sind hochwertig, präzise und störungsresistent. Sie können eine hohe Auflösung erreichen, benötigen jedoch eine höhere Rechenleistung und sind in der Regel teurer als analoge Sensoren. Der genaue Wert zu einem bestimmten Zeitpunkt ist unbekannt, kann aber durch eine hohe Auflösung ausgeglichen werden. Digitale Sensoren können optisch oder magnetisch sein.



Obr. 46: Digitales Signal, erzeugt aus analogem [22]

7.2.6 Austeilung der Längenmessgeräte nach dem physikalischen Prinzip

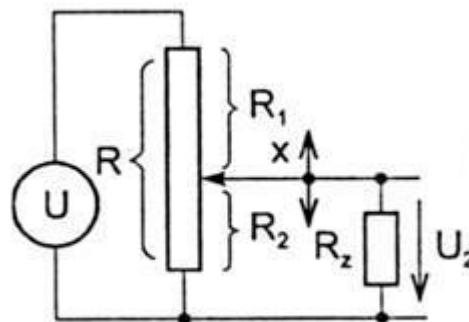
Je nach den elektromechanischen Technologien können Längenmessgeräte in verschiedene Kategorien verteilt werden – Widerstands-, Magnet-, Induktions- und optischen Sensoren. Jede Technologie hat spezifische Vor- und Nachteile und findet Anwendung in verschiedenen technischen Bereichen, abhängig von Faktoren wie Genauigkeit, Preis, Umweltbeständigkeit und Größe.

Widerstandssensoren

Ein besonderer Fokus liegt auf Widerstandssensoren, bei denen eine elektrische Größe durch Bewegung eines Kontakts entlang eines Widerstandspfads gemessen wird. Der Widerstand ist variabel und seine Größe kann durch die Formel

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad [\Omega] \quad (7)$$

bestimmt werden, wobei ρ [$\Omega \cdot \text{m}$] ist die Resistivität, l [m] ist die Länge des Widerstandspfads und S [m^2] die Querschnittsfläche des Leiters. Widerstandssensoren sind kostengünstig und einfach, haben aber Nachteile wie Vibrationsempfindlichkeit, Verschleiß, geringere Genauigkeit und Rauschen, das durch verschiedene Faktoren verursacht werden kann. [23], [24]



Obr. 47: Ersatz-Elektroschaltplan eines Widerstandssensors [25]

Widerstandspfade können nach verschiedenen Kriterien, wie Konstruktion und Material, unterschieden werden. Widerstandsdraht bietet eine geringe Auflösung, ist aber robust gegenüber Vibrationen und mechanischen Beschädigungen. Platten mit Widerstandsschichten aus verschiedenen Materialien erreichen eine höhere Auflösung,

sind jedoch anfällig für Vibrationen. Das Material des Widerstandspfad es kann aus leitendem Kunststoff, Kohlenstoff, elektrolytischem Material oder CERMET, einem Verbundmaterial aus Keramik und Metall, bestehen. CERMET-Widerstandspfade bieten eine hohe Auflösung und eine sehr geringe Abweichung vom tatsächlichen Wert. [26]

Magnetische Sensoren

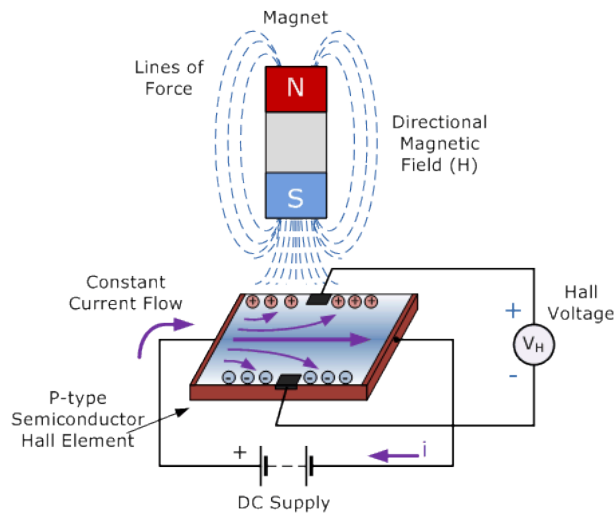
Magnetische Sensoren, die berührungslos und verschleißfrei arbeiten, messen Positionen. Sie können in verschiedene Typen unterteilt werden, darunter magnetoresistive Elemente, Reed-Kontakte, Wiegand-Sonden und Hall-Sonden. Sie sind resistent gegen verschiedene Umweltfaktoren und bestehen aus einer Skala, einem Lesegerät und magnetischem Material. [27]

Magnetoresistive Sensoren ändern ihren Widerstand abhängig vom magnetischen Feld. Bei Bewegung der Skala oder der Drehplatte relativ zum Sensor ändert sich das magnetische Feld, was die Resistivität der Elemente beeinflusst.

Hall-Sensoren arbeiten auf dem Prinzip des Hall-Effekts und werden zur Detektion und Messung der Stärke von magnetischen Feldern verwendet. Sie bestehen aus einer Halbleiterschicht, die an eine Stromquelle angeschlossen ist. Die Interaktion mit dem magnetischen Feld erzeugt eine Spannungsspitze, die zur Bestimmung der Geschwindigkeit und Verschiebung verwendet werden kann. Die Hall-Spannung kann mit der Formel

$$V_H = \frac{R_H \cdot I \cdot B}{d} \quad [\text{V}], \quad (8)$$

berechnet werden, wobei R_H [$\text{m}^3 \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$] ist die materialabhängige Hall-Konstante, I [A] ist die Größe des fließenden Stroms, B [T] ist die Größe der magnetischen Induktion des Feldes und d [m] ist die Dicke der Platte. Diese Sensoren haben den Vorteil kleiner Abmessungen, niedriger Kosten und Widerstandsfähigkeit gegen magnetische Störungen.

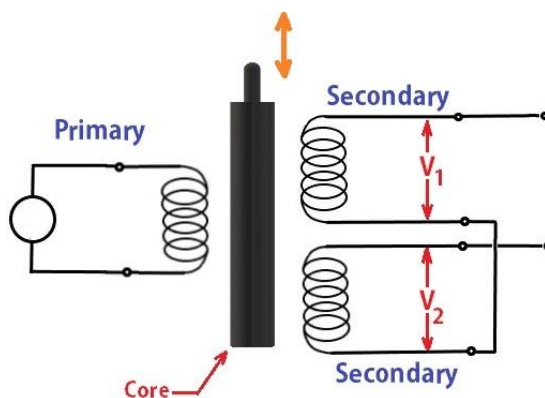


Obr. 48: Darstellung des Hall-Effekts [30]

Induktivitätssensoren

Induktivitätssensoren sind passive Sensoren, die auf dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion arbeiten. Sie nutzen Änderungen der Induktivität zur Umwandlung in ein elektrisches Signal und bieten berührungslose Erfassung, was sie verschleißfest macht. Es gibt verschiedene Arten von Induktivitätssensoren, einschließlich solcher, die auf dem Prinzip der Wirbelströme, variabler Luftspalt, Selsyns und Resolver basieren. [1], [31], [32]

Der lineare variable differentielle Transformator (LVDT) besteht aus drei Solenoidspulen mit einem gemeinsamen beweglichen Kernstück. Er bietet eine schnelle Reaktion, nahezu unendliche Auflösung und berührungslosen Betrieb, obwohl eine hohe Frequenz der Stromquelle zu einer Verstärkung des Einflusses von Wirbelströmen führen kann, was sich negativ auf die Qualität des Ausgangssignals auswirkt. [33], [34]



Obr. 49: Darstellung von LVDT [35]

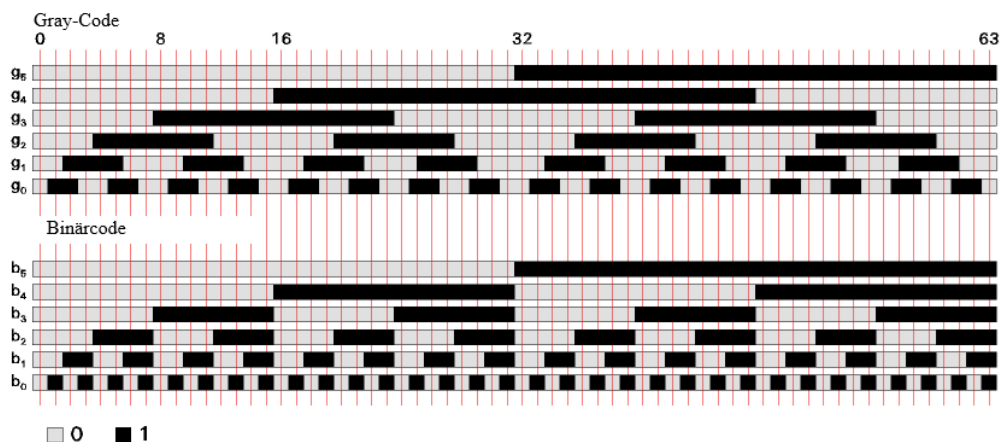
Der Induktosyn ist ein linearer Sensor, der aus einem Schlitten und einer Skala besteht. Bei gegenseitiger Verschiebung ändert sich die gegenseitige Induktivität zwischen den Spulen der Skala und des Schlittens. Er ist kostengünstig herzustellen, aber seine thermische Ausdehnung kann zu falschen Positionsinformationen führen.

Optische Sensoren

Optische Sensoren, die Position oder Bewegung in ein elektrisches Signal umwandeln, sind weit verbreitet. Sie nutzen Lichtstrahlunterbrechungen und bestehen typischerweise aus einer Lichtquelle, einer Codierscheibe oder Skala und einem Fotodetektor. [36]

Inkrementale rotierende optische Encoder bestehen aus einer Scheibe mit abwechselnd transparenten und undurchsichtigen Abschnitten. Bei Rotation ändert sich die Intensität des auf den Fototransistor treffenden Lichts, was in ein elektronisches Signal umgewandelt wird.

Die Skala des Encoders kann in mehrere Bänder unterteilt werden, um eine eindeutige Kombination von transparenten und undurchsichtigen Bereichen für jede Position zu erreichen, bekannt als Gray-Code. Dies ermöglicht eine genaue Positionsbestimmung.



Obr. 50: Vergleich eines Binärcodes mit einem Gray-Code [38]

Optische Encoder haben eine hohe Auflösung und sind in Anwendungen mit starken magnetischen Feldern einsetzbar. Nachteile sind mögliche Kontamination durch Schmutz, Beschädigung durch mechanische Belastung und Ungeeignetheit für thermisch anspruchsvolle Bedingungen. Optische Bewegungssensoren sind eine der am häufigsten verwendeten Arten von Positionserfassungsgeräten. [1], [37]

7.2.7 Modellierung in Computer Software

Mit der Entwicklung von Computertechnologien werden in der Industrie zunehmend verschiedene Softwareprogramme eingesetzt, die den Prozess der Produktentwicklung erheblich beschleunigen. Diese Programme ermöglichen das Öffnen und Bearbeiten neuer Datensätze, was die Arbeit in verschiedenen Programmen effizienter macht.

Die Verwendung von Softwareprogrammen bietet mehrere Vorteile, wie hohe Genauigkeit bei der Erstellung von Zeichnungen, einfache Anpassungen und die Möglichkeit, Modelle anzuzeigen, was hilft, Probleme frühzeitig zu erkennen. Änderungen in der Geometrie eines Produkts sind wesentlich einfacher als das Überarbeiten von Zeichnungen.

Obwohl Softwareprogramme verschiedene Größen berechnen können, ist es notwendig, dass die Benutzer über ausreichende theoretische Grundlagen verfügen, um die richtigen Daten einzugeben und die Berechnungen zu überprüfen. Zu den häufig verwendeten Programmen gehören AutoCAD, Inventor, SolidWorks, Catia, PTC Creo, Ansys und MATLAB.

7.3 Thermische Ausdehnung

Die thermische Ausdehnung ist ein physikalisches Phänomen, bei dem sich die Abmessungen eines Materials in Reaktion auf eine Temperaturänderung ändern. Dieses Phänomen tritt aufgrund der Zunahme der kinetischen Energie der Teilchen in einem Material bei steigender Temperatur auf. Wenn die kinetische Energie zunimmt, vibrieren die Teilchen stärker und nehmen mehr Raum ein, was zur Ausdehnung des Materials führt. Es gibt drei Haupttypen der thermischen Ausdehnung: lineare, flächige und volumetrische Ausdehnung. Die lineare Ausdehnung beschreibt die Änderung der Länge eines Objekts und wird durch die folgende Beziehung beschrieben:

$$\Delta d = d \cdot \alpha \cdot \Delta T [m], \quad (9)$$

wobei Δd [m] die Änderung der Länge, d [m] die ursprüngliche Länge, α [K⁻¹] der thermische Ausdehnungskoeffizient und ΔT [K] die Temperaturänderung darstellt. Der thermische Ausdehnungskoeffizient hängt von der Struktur des Materials ab. Im Allgemeinen sind Materialien mit stärkeren Bindungen (Metalle) anfälliger für

thermische Ausdehnung, da sie einen höheren thermischen Ausdehnungskoeffizienten haben als Materialien mit schwächeren Bindungen. [39], [40]

7.3.1 Auswirkungen der thermischen Ausdehnung

Aufgrund der thermischen Längenausdehnung ändern Maschinen und Messtechnik ihre Länge. Dies kann erhebliche Auswirkungen auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von linearen Encodern haben, die zur Positionsbestimmung in präzisen mechanischen Systemen verwendet werden. Die thermische Längenausdehnung kann durch verschiedene Einflüsse verursacht werden. Zu den bedeutendsten gehören die während der Bearbeitung freigesetzte Wärme, die Wärme, die bei der Bewegung der Messgeräte und Maschinen freigesetzt wird, und die Temperaturänderung im Raum, in dem die Maschine aufgestellt ist. Die thermische Ausdehnung kann folgende Auswirkungen auf Positionssensoren haben:

- Änderung der Skalenlänge: Lineare Encoder enthalten oft Skalen (z.B. optische oder magnetische Bänder) zur Positionsbestimmung. Wenn sich die Temperatur ändert, kann sich das Material der Skala ausdehnen oder zusammenziehen, was zu Ungenauigkeiten führt, da der Encoder nicht mehr korrekt auf die tatsächlichen Abmessungen des beweglichen Teils kalibriert ist.
- Fehler bei der Positionsbestimmung: Mit steigender oder fallender Temperatur ändert sich der Abstand zwischen den einzelnen Markierungen auf der Skala. Dies kann zu falschen Positionsdaten führen, was zu Positionierungsfehlern in präzisen Anwendungen wie CNC-Maschinen, Robotik oder optischen Systemen führt.
- mechanische Spannungen und Verformungen: Temperaturänderungen können zu ungleichmäßiger Ausdehnung oder Kontraktion verschiedener Teile des Systems führen, was zu mechanischen Spannungen und Verformungen führt. Dies kann die Montage und Ausrichtung des Encoders stören und weitere Messfehler erhöhen.
- Langzeitstabilität: Wiederholte Temperaturzyklen können zu Materialermüdung und allmählicher Verringerung der Genauigkeit und Stabilität von linearen Encodern führen. Materialien, die von der thermischen Ausdehnung betroffen sind, können im Laufe der Zeit ihre ursprüngliche Genauigkeit verlieren.

Die thermische Längenausdehnung hat negative Auswirkungen auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung. Es ist notwendig, dies zu berücksichtigen und Kompensationsmethoden zu entwerfen, die zu einer erhöhten Genauigkeit der Positionsbestimmung und Produktion führen. [40], [41]

7.3.2 Kompensation der Auswirkungen der thermischen Ausdehnung

Zur Minimierung der Auswirkungen der thermischen Ausdehnung auf lineare Encoder können mehrere Techniken verwendet werden. Hier werden einige Möglichkeiten diskutiert, wie der negative Einfluss auf den Mess- und Produktionsprozess reduziert werden kann:

- Verwendung von Materialien mit niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten: Die Auswahl von Materialien mit einem niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten (z.B. Invar oder Verbundmaterialien) kann dazu beitragen, die durch Temperaturschwankungen verursachten Abmessungsänderungen zu reduzieren.
- Thermische Kompensation in der Software: Viele moderne Encoder verwenden Algorithmen zur thermischen Kompensation, die die Positionsbestimmung entsprechend der aktuellen Temperatur anpassen, wodurch Fehler durch Temperaturänderungen minimiert werden.
- Stabiles Temperaturumfeld: Die Aufrechterhaltung eines stabilen Temperaturumfelds kann dazu beitragen, den Einfluss der thermischen Ausdehnung zu minimieren. Dies kann klimatisierte Räume oder Wärmeisolierung umfassen.
- Regelmäßige Kalibrierung und Kontrolle: Regelmäßige Kalibrierung und Kontrolle von Encodern können dazu beitragen, Fehler, die durch thermische Ausdehnung verursacht werden, frühzeitig zu erkennen und zu korrigieren.

Um die höchstmögliche Genauigkeit zu erreichen, ist es ratsam, alle Methoden zu kombinieren. Beispielsweise kann die Aufrechterhaltung einer stabilen Raumtemperatur wirtschaftlich und technisch anspruchsvoll sein. Eine ausreichende Lösung könnte darin bestehen, die Raumtemperatur in einem Bereich von einigen °C zu halten. Die dadurch entstehende thermische Ausdehnung kann dann durch die thermische Kompensation in der Computersoftware kompensiert werden.

7.3.3 Wärmeübertragung

Die Temperatur ist ein Maß für die durchschnittliche kinetische Energie, die die Teilchen in einer Stoffprobe besitzen. Je mehr die Teilchen vibrieren, sich bewegen und rotieren, desto höher ist die Temperatur des Objekts. Wärme ist ein Energiefluss von einem Objekt mit höherer Temperatur zu einem Objekt mit niedrigerer Temperatur. Der Wärmetransfer setzt sich fort, bis beide Objekte das thermische Gleichgewicht erreicht haben und die gleiche Temperatur haben. Die Wärmeübertragung erfolgt auf drei Arten:

- **Leitung (Konduktion):** Kinetische Energie wird durch ungeordnete Bewegung der Moleküle auf benachbarte Moleküle übertragen, wodurch thermische Energie übertragen wird. Konduktion tritt in Feststoffen, aber auch in Flüssigkeiten und Gasen auf, wenn der Einfluss der Strömung ausgeschlossen wird.
- **Strömung (Konvektion):** Konvektion tritt in Flüssigkeiten und Gasen auf. Durch die Bewegung der Moleküle im Raum wird auch ihre thermische Energie übertragen. Die Bewegung der Moleküle erfolgt durch natürliche und erzwungene Strömung.
- **Strahlung (Radiation):** Dies ist die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen oder Infrarotstrahlung zwischen zwei Objekten mit Lichtgeschwindigkeit. Der wesentliche Einfluss der Strahlung ist bei einem größeren Temperaturunterschied der einzelnen Flächen, die sich gegenseitig bestrahlen, zu erkennen. Ein Beispiel ist das Wärmegefühl eines Feuers, auch wenn kein Kontakt mit dem Feuer besteht. [39], [42]

7.3.4 Materialien der Längenmessgeräte

Die Messskalen von linearen Encodern werden aus verschiedenen Kombinationen von Substrat- und Gittermaterialien hergestellt. Die ideale Kombination hängt von der spezifischen Anwendung ab. Das Substrat besteht meist aus rostfreiem Stahl oder Glas. Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Stahl beträgt $\alpha = 10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Aufgrund der höheren Zähigkeit von Stahl können diese Skalen bis zu einer Länge von über 70 Metern hergestellt werden. Glas hat einen Wärmeausdehnungskoeffizienten von $\alpha = 8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ und diese Skalen werden nur in kleineren Abmessungen hergestellt. Ein weiteres Substratmaterial ist ZERODUR (Glaskeramik) mit einem

Wärmeausdehnungskoeffizienten von $\alpha = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. ZERODUR ist jedoch teuer und wird nur bei höchster Genauigkeitsanforderung verwendet.

Das Gitter wird in der Regel durch fotolithografische Prozesse hergestellt, eine Methode zur Übertragung von Mustern auf das Substrat. Im Folgenden werden die Materialien der von Heidenhain hergestellten Skalen beschrieben:

- METALLUR: Eine robuste Skala, bestehend aus aufgetragenen Metalllinien auf Gold. Die typische Gitterperiode beträgt $40 \mu\text{m}$.
 - DIADUR: Extrem robuste Chromlinien auf Glas (typische Gitterperiode $20 \mu\text{m}$) oder dreidimensionale Chromstrukturen mit einer typischen Gitterperiode von $8 \mu\text{m}$ auf Glas.
 - SUPRADUR: Optisch dreidimensionales Phasengitter, das jedoch mechanisch zweidimensional (flache Struktur) ist. Diese Lösung ist besonders widerstandsfähig gegen Verschmutzung. Die typische Gitterperiode beträgt $8 \mu\text{m}$ und feiner.
 - OPTODUR: Optisch dreidimensionales Phasengitter mit flacher Struktur und besonders hoher Reflexion. Die typische Gitterperiode beträgt $2 \mu\text{m}$ und feiner.
- [43]

7.4 Entwurf einer thermischen Ausdehnungssimulation

Das Ziel dieses Kapitels ist Entwurf einer thermischen Ausdehnungssimulation, die mit der durchgeführten Messung übereinstimmt. Anschließend würden die Ergebnisse dieser Simulation bei weiteren Messungen verwendet, um die von der Wärmeausdehnung verursachte Ungenauigkeit zu minimieren. Dadurch würde eine höhere Genauigkeit der Positionsmessung erreicht.

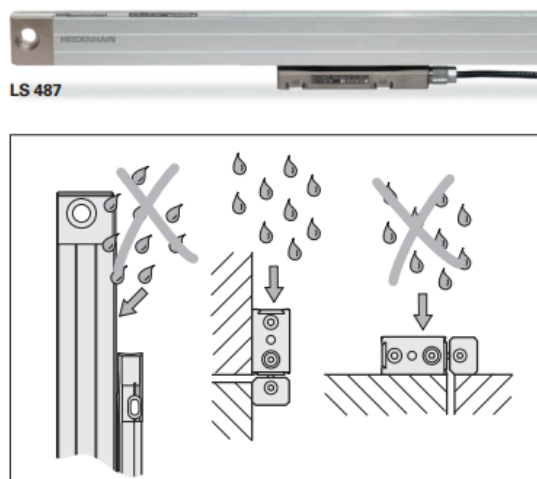
7.4.1 Beschreibung vom Längenmessgerät Heidenhain LS 487

Längenmessgerät Heidenhain LS 487 ist ein inkrementelles Messgerät, das in einem Aluminiumgehäuse gekapselt ist. Es wird in verschiedenen Längenabmessungen und Ausführungen hergestellt, um die genauen Anforderungen der Kunden zu erfüllen. Es wird nur mit einer 1 Vpp (Voltage peak to peak) Schnittstelle angeboten, während andere Sensormodelle auch mit EnDat 2.2, DRIVE-CLiQ, TTL, Fanuc α i, Mitsubishi, Panasonic und anderen Schnittstellen angeboten werden.

Tab. 4: Eigenschaften von Längenmessgerät Heidenhain LS 487

Konstruktion des Encoders	gekapselt
Skalenmaterial	Glasskala
Gittermaterial	DIADUR
Gittergenauigkeit	$\pm 5 \mu\text{m}, \pm 3 \mu\text{m}$
Art der Positionsmessung	inkrementell
Messlänge [mm]	70, 120, 170, ..., 820, 920, 1020, 1140, 1240, ..., 2040
Temperaturkoeffizient	$\alpha=8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Schnittstelle	1 Vpp
Signalperiode	20 μm
Betriebstemperatur	0 °C bis 50 °C
Bewegungsgeschwindigkeit	$\leq 120 \text{ m/min}$
Kabellänge	$\leq 150 \text{ m}$
Gewicht	0,4 kg + 0,5 kg/m
Erforderliche Kraft zur Bewegung	$\leq 5 \text{ N}$
Versorgungsspannung ohne Last	DC 5 V $\pm 0,25 \text{ V}$ / < 120 mA
Schutzart bei Montage gemäß Herstelleranweisungen	IP53
Schutzart bei Überdruck	IP64

Die Schutzart IP53 nach EN 60529 ist erfüllt, wenn der Einbau gemäß den Installationshinweisen und -anweisungen des Herstellers erfolgt - Montage mit den Dichtungen (Dichtlippen) weg von Spritzwasser oder nach unten. Obr. 51 zeigt den Einbau des Drehgebers zur Erfüllung der Schutzart IP53.

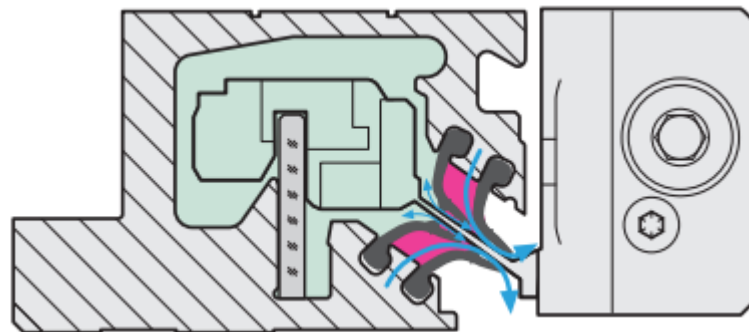


Obr. 51: Darstellung der Montage des Encoders [43]

Wenn der Sensor hohen Konzentrationen von Staub und anderen Verunreinigungen ausgesetzt ist, kann eine Luftdichtung verwendet werden, die den Schutzgrad IP64 gewährleistet. Für die Anwendung von Druckluft ist der Encoder mit Anschlüssen an beiden Endblöcken und am Montageblock der Abtasteinheit ausgestattet. Der Luftstrom wird durch Verbindungsteile mit integrierter Drosselklappe (von Heidenhain) reguliert, die an ein Druckluftfiltersystem (z.B. Heidenhain DA 400 in Obr. 52) angeschlossen sind. Der optimale Luftstrom sollte zwischen 7 l/min und 10 l/min liegen. In Obr. 53 ist der Schutz des Heidenhain LC 1x5 Maßstabs durch Druckluft schematisch dargestellt.

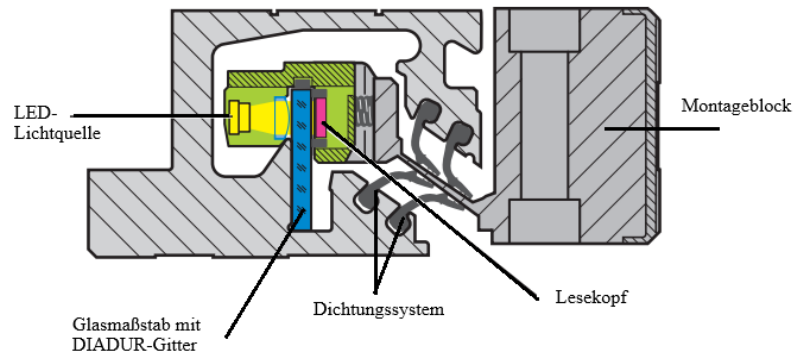


Obr. 52: Druckluftfiltersystem Heidenhain DA 400 [44]



Obr. 53: Dichtungssystem von Heidenhain LC 1x5 [43]

Das Längenmessgerät besteht aus einem Aluminiumgehäuse, einem Dichtungssystem, einem Lesekopf, einer LED-Lichtquelle (Light-Emitting Diode) und einem Glasmaßstab mit einem DIADUR-Gitter. Der Aufbau ist in Obr. 54 beschrieben und dargestellt. Der Lesekopf bewegt sich auf einer reibungsarmen Führung, über die er mit dem Montageblock und der Arbeitsmaschine verbunden ist.



Obr. 54: Schematische Beschreibung von LC 115 [43]

7.4.2 Temperatursensoren

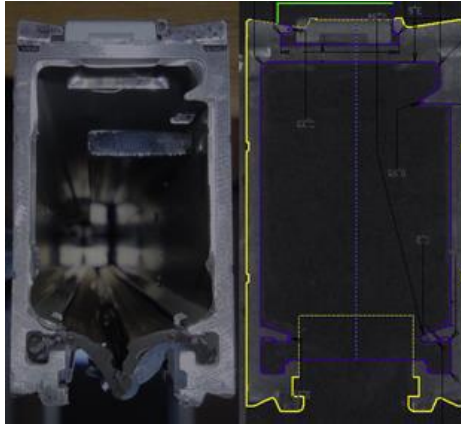
Mehrere PT1000-Temperaturwiderstandssensoren (Obr. 55) wurden auf dem Aluminiumgehäuse des Längenmessgerätes montiert. Die Messung basiert auf der Änderung des elektrischen Widerstands von Platin (PT) bei Temperaturänderungen. Bei Edelmetallen wie Platin ist die Widerstandskennlinie annähernd linear. Die Zahl 1000 bedeutet, dass der Sensor bei 0 °C einen Widerstand von 1000 Ohm hat. Bei einer konstanten Stromversorgung kann die Änderung des Widerstands und der Temperatur durch die Änderung der Spannung bestimmt werden. Der Versorgungsstrom sollte so klein wie möglich sein, um eine Selbsterhitzung des Widerstandssensors zu vermeiden, die zu ungenauen Messungen führen würde.



Obr. 55: Temperatursensor PT1000 [46]

7.4.3 Erstellung des CAD-Modells

Von dem Querschnittsbild des Heidenhain LS 487 wurde ein digitales Bild in Inventor erstellt (Obr. 56). Die Längenausdehnung wurde dann auf den digital erstellten Querschnitt angewendet, um ein 3D-Modell zu erstellen (Obr. 57).



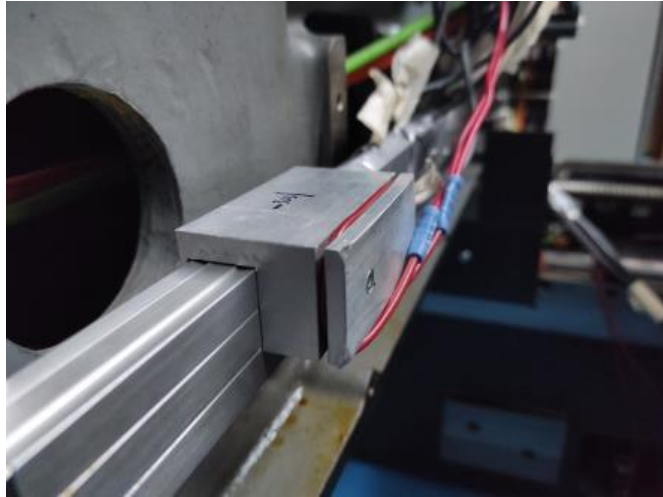
Obr. 56: Erstellung von Querschnitt des Messgerätes



Obr. 57: 3D Modell von LS 487

7.4.4 Randbedingungen

Während der Messung wurde das Längenmessgerät durch ein Heizelement aus Aluminium in der geometrischen Mitte beheizt. Die Position des Heizelements auf dem Geber ist in Obr. 58 dargestellt. Die Abmessungen des Geberlochs im Heizelement sind 70 mm in der Länge, 18,4 mm in der Breite und 23 mm in der Höhe. Ein Kohleheizdraht und ein PT1000-Tempersensord wurden in den 3 mm breiten Schlitz eingeführt, um Informationen über die aktuelle Temperatur des Heizelements zurückzusenden.



Obr. 58: Heizelement auf dem Längenmessgerät

Die Temperatur des Heizelements wurde schrittweise in Schritten um 5 °C von anfänglich 25 °C auf 45 °C erhöht und dann wieder auf 25 °C gesenkt. Die Verweilzeit bei jeder dieser Temperaturen war lang genug, damit sich die Temperaturänderung gleichmäßig über die Länge des Messgeräts ausbreiten konnte. Der Temperaturwechsel wurde computergesteuert durchgeführt. Zur Wärmeübertragung zwischen dem Heizelement, dem Gehäuse des Längenmessgeräts und den Thermometern wurde eine Wärmeleitpaste verwendet.

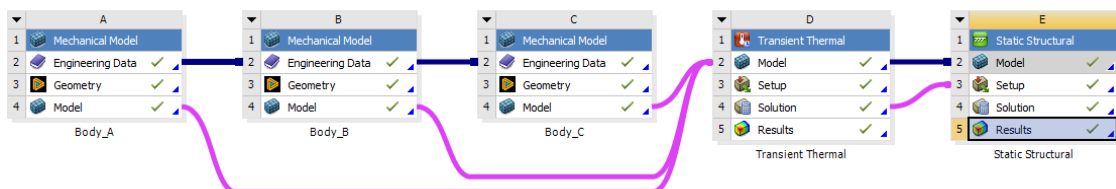
Das Längenmessgerät wurde gemäß den Anweisungen des Herstellers montiert, so dass die Schutzart IP53 gemäß ČSN EN 10529 erreicht wurde. Aufgrund des nicht angeschlossenen Luftfiltersystems wurde jedoch die Schutzart IP64 nicht erreicht, so dass keine Druckluft durch das Messgerätgehäuse strömt. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Auswirkung der Wärmeausbreitung durch Konvektion innerhalb des Gebergehäuses vernachlässigbar ist.

7.4.5 Erstellung eines Modells in Ansys Workbench

Bei der Erstellung eines Modells in Ansys traten Probleme bei der Netzgenerierung auf. Eine geeignete Lösung bestand darin, den Geberquerschnitt in einer Ebene zu drucken und dann auf die erforderliche Länge von 802 mm zu strecken, was der entsprechenden Länge des Längenmessgeräts mit einem gemessenen ML-Querschnitt von 720 mm entspricht.

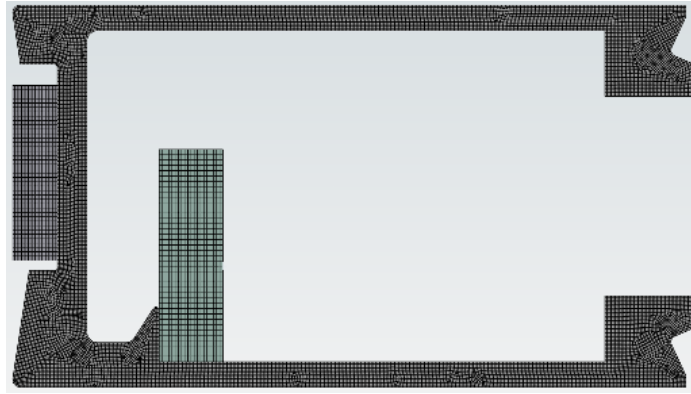
Aus dem Querschnitt des Lineals wurden kleine geometrische Elemente entfernt, die die Netzgenerierung erschwerten – Rillen oder kleine Vorsprünge. Bei der Vereinfachung der Geometrie des Querschnitts wurde jedoch die gleiche Querschnittsfläche beibehalten. Eine Änderung der Querschnittsfläche würde die Genauigkeit der Berechnung der Wärmeausbreitung entlang des Lineals negativ beeinflussen. Die ursprüngliche Querschnittsfläche des Aluminiumkörpers des Lineals betrug 135,69 mm² und nach der Anpassung beträgt sie 135,58 mm². Die angepasste Querschnittsfläche ist nur 0,08 % kleiner als die ursprüngliche. Die geringfügige Vereinfachung der Geometrie hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Längenänderung, wirkt sich jedoch positiv auf die Stabilität des Berechnungssystems und die Geschwindigkeit der Simulation aus.

Zur Übersichtlichkeit des Modells und zur Einfachheit eventueller Anpassungen ist der Encoder in drei Körper unterteilt (Obr. 59). Körper A stellt den Aluminiumrahmen dar, Körper B die Glasskala und Körper C den Kunststoffstreifen, der am Aluminiumrahmen befestigt ist. Die elastische Dichtung wurde aufgrund ihres geringen Einflusses auf die Temperatur- und Längenänderung aus dem Modell entfernt. Der „Transient Thermal“-Block ist für die Berechnung der Wärmeausbreitung entlang des Lineals vorgesehen, und im Abschnitt „Static Structural“ werden mechanische Änderungen bestimmt.

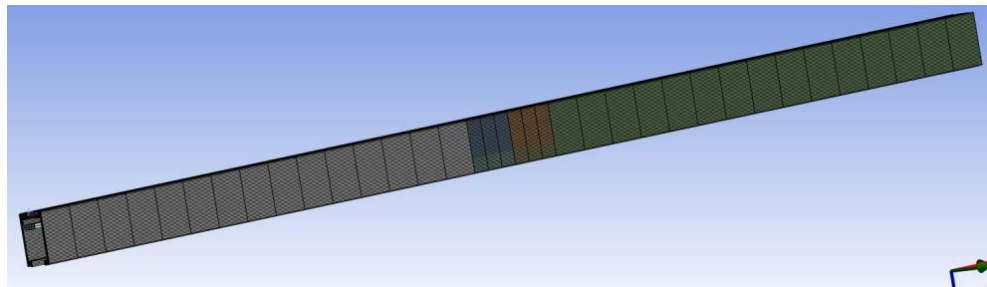


Obr. 59: Systemeinstellung in Ansys

Bei der Netzgenerierung wurden die folgenden Funktionen angewendet: „MultiZone“, „Face Sizing“ zur Erstellung des Netzes im Querschnitt des Aluminiumkörpers und „Edge Sizing“ zur Erstellung des Netzes entlang des Aluminiumkörpers, der Glasskala und des Kunststoffstreifens. Die Funktion „Edge Sizing“ wurde auch zur Erstellung des Netzes im Querschnitt der Glasskala und des Kunststoffstreifens verwendet. Die Gesamtzahl der Knoten beträgt 3.117.677 und die der Elemente 698.042. Das generierte Netz im Querschnitt ist in Obr. 60 und entlang der Länge in Obr. 61 dargestellt.

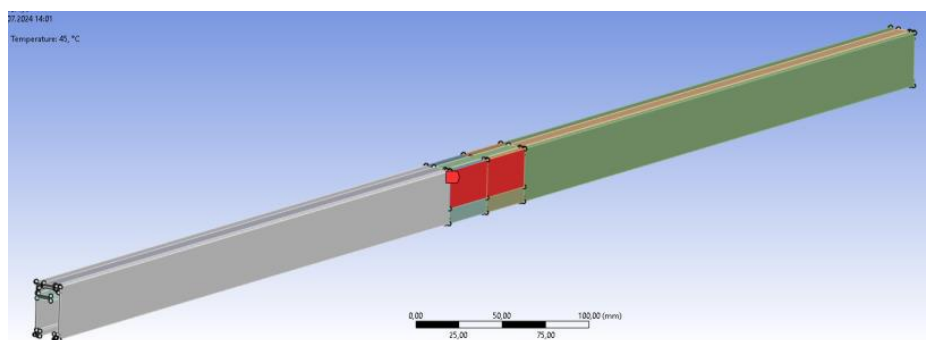


Obr. 60: Generierte Netz im Querschnitt



Obr. 61: Generierte Netz über die Länge

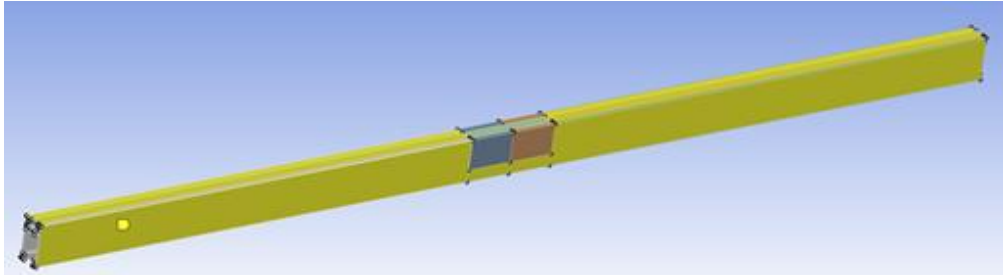
In Obr. 62 ist der Bereich der Erwärmung des Aluminiumkörpers des Längenmessgerätes in Rot dargestellt. Die beheizte Fläche misst 70 mm und 22,54 mm, was den Abmessungen des Heizelements ohne Spielraum entspricht. Der Aluminiumkörper wird nur von einer Seite erhitzt, obwohl das Heizelement ihn auch von der anderen Seite umschließt. An der Erwärmungsstelle des Aluminiumkörpers wird die Temperatur des Heizelements berücksichtigt.



Obr. 62: Ort der thermischen Belastung

Die Konvektion wird auf allen äußeren Flächen berücksichtigt, mit Ausnahme derjenigen, die vom Heizelement umschlossen sind – in Obr. 63 mit gelb dargestellt. In der Umgebung des linearen Positionssensors wird natürliche Konvektion angenommen.

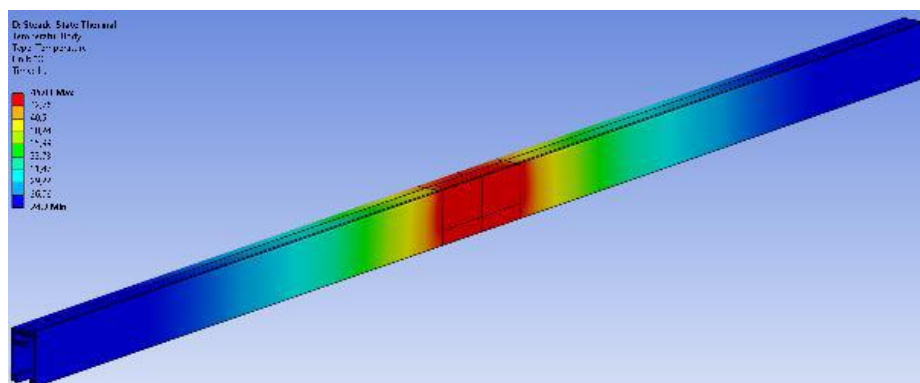
Aufgrund unbekannter Werte (z.B. Temperatur in unmittelbarer Nähe des Aluminiumkörpers) kann der Wärmeübergangskoeffizient nicht rechnerisch bestimmt werden, z.B. mittels der Nusselt-Zahl. Der Wärmeübergangskoeffizient α liegt bei natürlicher Konvektion zwischen 5 und 25 W/(m²·K). Experimentell wurde dieser Wert auf 13 W/(m²·K) bestimmt.



Obr. 63: Wirkung der Konvektion auf den Sensor

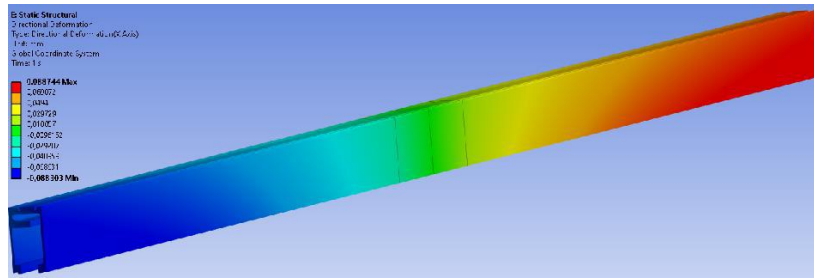
7.4.6 Ergebnisse der Simulation

In Obr. 64 ist der Temperaturverlauf entlang des Positionssensors bei einer Erwärmung auf 45 °C dargestellt. Der Sensor wurde ausreichend lange auf diese Temperatur erhitzt, damit sich die Wärme über die gesamte Länge ausbreiten konnte.

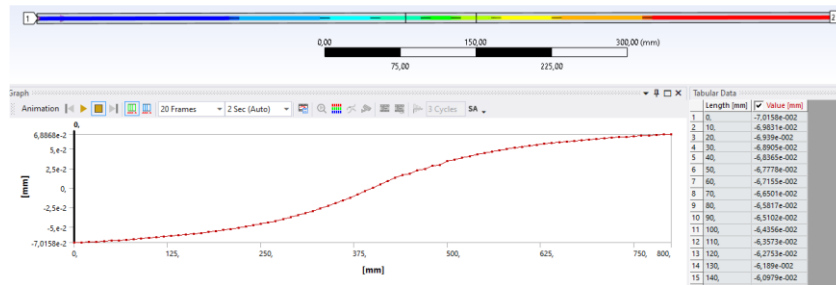


Obr. 64: Verlauf der Temperatur über die Länge des Positionssensors

Die Längsdeformation des Aluminiumkörpers bei einer Erwärmung auf 45 °C ist in Obr. 65 dargestellt. Die maximale Auslenkung beträgt 88,5 µm und trat an den Enden des Positionssensors auf. Die Auslenkung der Glasskala, die in Obr. 66 dargestellt ist, war an den Enden ungefähr 69 µm.



Obr. 65: Deformation über die Länge



Obr. 66: Die Abweichung der Glasskala von der Mitte

7.4.7 Ergebnisvergleich der Simulation und der Messung

In Tab. 5 werden die Temperaturen aus der Messung und Simulation verglichen. Die Position 401 mm entspricht dem geometrischen Mittelpunkt des linearen Positionssensors und gleichzeitig der Arbeitsmaschine. Die in der Position 401 mm gemessene Temperatur ist die Temperatur des Heizelements.

Hier finden Sie Beispiele zur Berechnung der Temperaturdifferenz und der prozentualen Temperaturdifferenz zwischen gemessenen und simulierten Temperaturen für eine Temperatur von 25 °C und eine Position von 151 mm:

- Unterschied: $\Delta T = 22,266 - 22,09 = 0,176 \text{ } ^\circ\text{C}$ (10)
- Prozentueller Unterschied: $\delta = \frac{22,266 - 22,09}{25 - 21,6} = 5,18 \%$ (11)

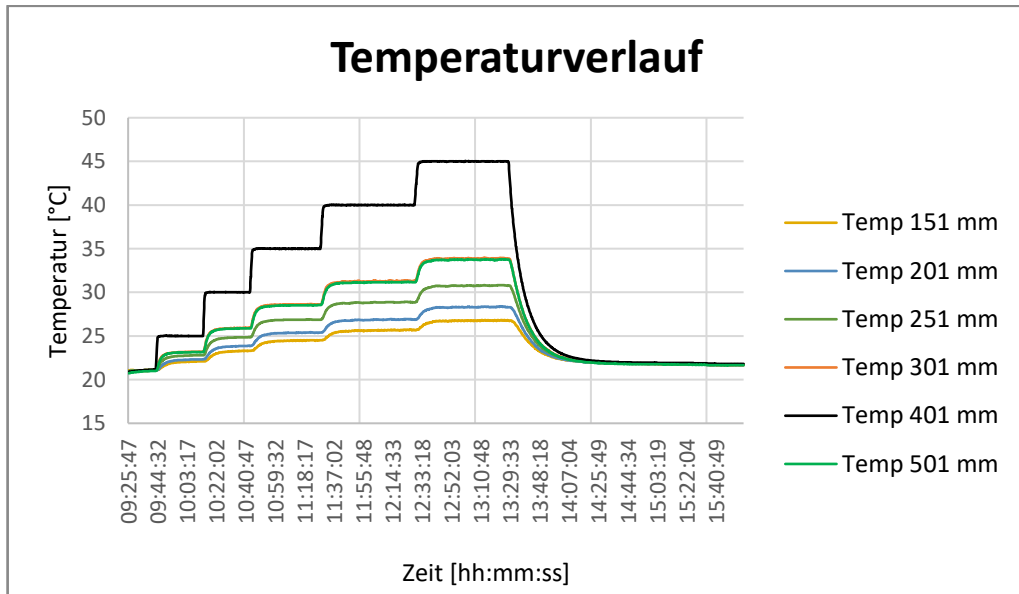
Die Unterschiede zwischen den gemessenen und simulierten Temperaturen lagen innerhalb von 3 %, mit Ausnahme der Messung bei 25 °C, bei der der Unterschied bis zu 6 % betrug. Diese Unterschiede können durch verschiedene Einflüsse verursacht werden – Ungenauigkeiten der PT1000-Sensoren, leicht verschobene Temperatursensoren gegenüber der Messposition oder ungleichmäßiges Auftragen der Wärmeleitpaste auf dem Aluminiumkörper des Längenmessgerätes.

Tab. 5: Vergleich der Temperaturen aus der Simulation und aus der Messung

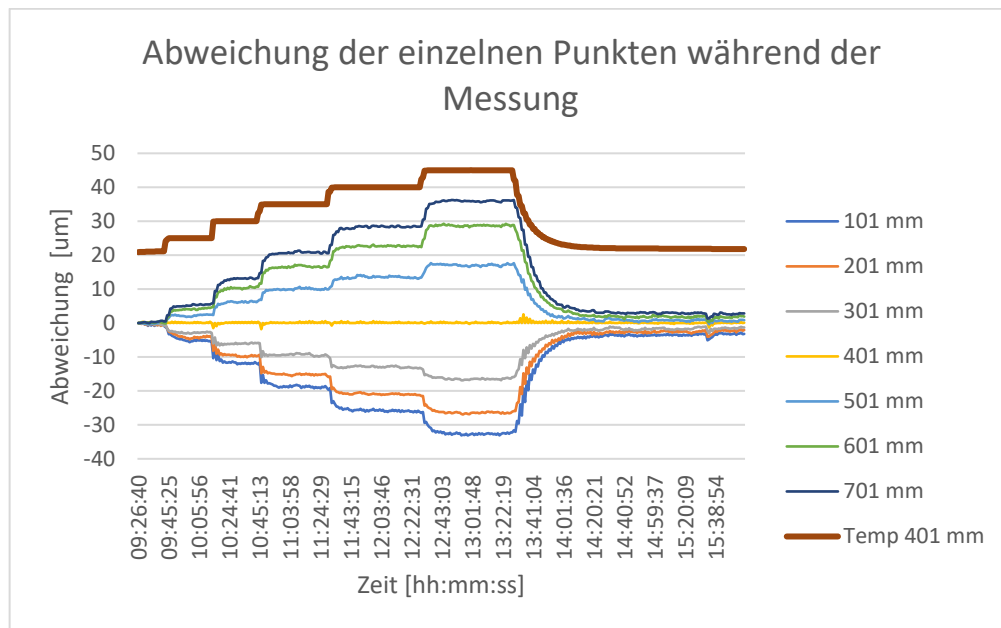
Lage [mm]	Umgebungstemperatur [°C]	Messung [°C]	Simulation [°C]	Unterschied [°C]	Prozentueller Unterschied [%]
151	21.6	22.09	22.266	0.176	5.18
201		22.33	22.502	0.172	5.06
251		22.79	22.852	0.062	1.82
301		23.23	23.363	0.133	3.91
401		25	25	0	0
501		23.16	23.367	0.207	6.09
151	21.7	23.28	23.333	0.053	0.64
201		23.85	23.909	0.059	0.71
251		24.85	24.764	-0.086	-1.04
301		25.94	26.011	0.071	0.86
401		30	30	0	0
501		25.87	26.022	0.152	1.83
151	21.8	24.48	24.407	-0.073	-0.55
201		25.37	25.325	-0.045	-0.34
251		26.88	26.686	-0.194	-1.47
301		28.61	28.67	0.06	0.45
401		35	35	0	0
501		28.54	28.687	0.147	1.11
151	21.9	25.68	25.489	-0.191	-1.06
201		26.88	26.75	-0.13	-0.72
251		28.85	28.619	-0.231	-1.28
301		31.28	31.339	0.059	0.33
401		40	40	0	0
501		31.17	31.362	0.192	1.06
151	21.9	26.76	26.162	-0.598	-2.59
201		28.35	27.75	-0.6	-2.60
251		30.82	30.126	-0.694	-3.00
301		33.91	33.618	-0.292	-1.26
401		45	45	0	0
501		33.77	33.649	-0.121	-0.52

In Obr. 67 ist der Temperaturverlauf an den einzelnen Messpunkten dargestellt, und in Obr. 68 sind die Auslenkungen der einzelnen Punkte relativ zur Mitte des Längenmessgerätes sichtbar. Obr. 69 zeigt die absolute Auslenkung der einzelnen Punkte, wodurch leicht erkennbar ist, dass das Lineal asymmetrisch verlängert wird – eine Seite verlängert sich mehr als die andere. Der Vergleich der Auslenkungen aus der Messung

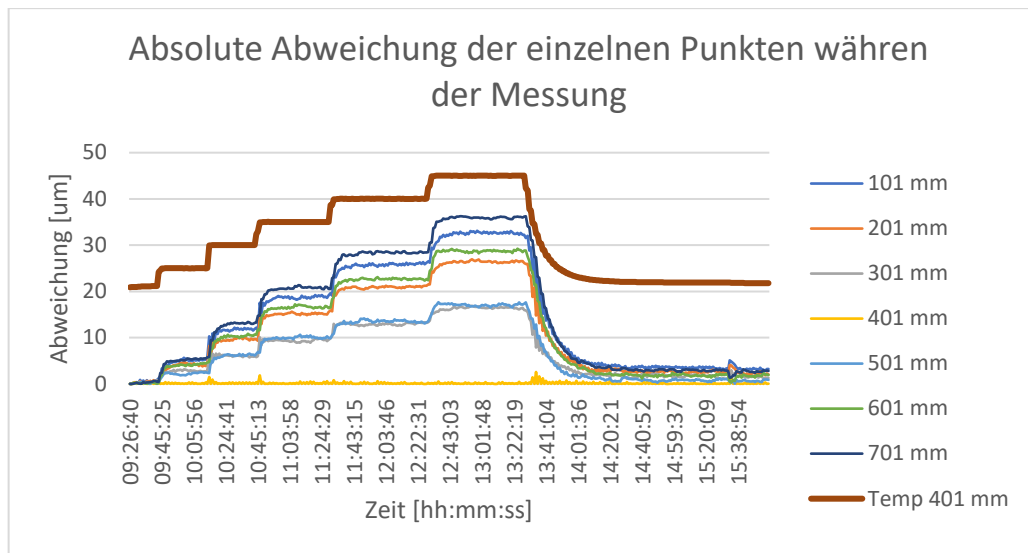
und aus der Simulation wurde mit dem Interferometer XL-80 durchgeführt. Das Interferometer wurde auf der gegenüberliegenden Seite der Arbeitsmaschine als der lineare Positionssensor platziert, um den Strahl nicht zu beeinflussen.



Obr. 67: Verlauf der Temperatur in einzelnen Punkten während der Messung



Obr. 68: Abweichung während der Messung



Obr. 69: Absolute Abweichung während der Messung

Hier ein Beispiel für die Berechnung der Differenz der Positionsauslenkung zwischen Simulation und Messung bei einer Mitteltemperatur von 25 °C an der Position 101 mm.

$$\Delta x = -7,143 - (-5,388) = -1,755 \mu m \quad (6)$$

Tab. 6: Vergleich der Abweichungen aus der Messung und aus der Simulation

Lage [mm]	Mitteltemperatur [°C]	Messung [μm]	Simulation [μm]	Unterschied [μm]
100	25	-5.388	-7.143	-1.755
200		-4.050	-6.433	-2.383
300		-2.740	-4.415	-1.675
400		0	-0.002	-0.002
500		2.425	4.326	1.902
600		4.526	6.259	1.733
700		5.486	6.988	1.501
100	30	-11.903	-21.448	-9.545
200		-9.751	-18.372	-8.621
300		-5.962	-12.099	-6.137
400		0	-0.005	-0.005
500		6.157	11.860	5.703
600		10.724	17.861	7.137
700		13.227	21.008	7.781
100	35	-18.902	-35.803	-16.901
200		-15.087	-30.346	-15.259
300		-9.581	-19.796	-10.215
400		0	-0.008	-0.008
500		9.839	19.406	9.567
600		16.833	29.496	12.663
700		21.005	35.077	14.072
100	40	-26.329	-50.208	-23.879
200		-21.181	-42.354	-21.173
300		-13.223	-27.506	-14.283
400		0	-0.011	-0.011
500		13.239	26.964	13.725
600		22.624	41.164	18.540
700		28.368	49.196	20.828
100	45	-32.656	-64.356	-31.700
200		-26.572	-54.241	-27.669
300		-16.331	-35.188	-18.857
400		0	-0.014	-0.014
500		17.227	34.494	17.267
600		28.899	52.716	23.817
700		36.100	63.060	26.960

7.5 Diskussion

Während der Entwicklung der Simulation der thermischen Belastung des Heidenhain LS 487 Längenmessgerätes wurden mehrere Vereinfachungen vorgenommen. Es wurde angenommen, dass die Temperatur der beheizten Fläche des Aluminiumkörpers des linearen Positionssensors, der des Heizelements entspricht, obwohl es in Wirklichkeit zu geringfügigen Temperaturunterschieden kommen konnte. Es war nicht möglich, den Temperatursensor am Aluminiumkörper anzubringen, da er mit dem Heizelement kollidierte. Obwohl das Heizelement den linearen Sensor von drei Seiten umschloss, wurde der Wärmeübergang nur auf einer Fläche berücksichtigt. Die Endstücke des Sensors wurden nicht angebracht, und der Einfluss der Dichtlippen auf die Wärmeausbreitung entlang des Lineals wurde vernachlässigt.

Um eine stabilere Simulation und schnellere Berechnungen zu ermöglichen, wurden kleine geometrische Vorsprünge und Rillen aus dem Querschnitt des Lineals entfernt. Die Querschnittsfläche wurde beibehalten, um die Wärmeausbreitung entlang des Lineals nicht wesentlich zu beeinflussen.

Die Temperatursensoren wurden am Körper des Lineals auf einem Kunststoffstreifen angebracht. Durch die Verwendung von Wärmeleitpaste wurde eine bessere Wärmeübertragung zwischen dem Aluminiumkörper des Lineals und dem Temperatursensor erreicht. Um den Einfluss heterogener Materialien zu minimieren, wäre es besser, den Temperatursensor direkt am Aluminiumkörper anzubringen. Im Herstellerkatalog ist das Material des Kunststoffstreifens nicht angegeben. Die Temperaturunterschiede in der Simulation bei Verwendung verschiedener Materialien waren relativ gering. Aus der Datenquelle der Materialien wurde das Material PA6 verwendet, das einen Wärmeübergangskoeffizienten von $\alpha = 1,467 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ und eine Wärmekapazität von $C_{20^\circ\text{C}} = 1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ aufweist. Es wäre ratsam, die genauen Eigenschaften dieses Materials vom Hersteller zu erfragen.

Die in der Position 301 mm gemessene Temperatur (Obr. 67) ist etwas höher als in der symmetrischen Position 501 mm, obwohl die Auslenkung in der Position 301 mm geringer ist als in der Position 501 mm (Obr. 69). Dieses Paradox kann durch einen leicht verschobenen Temperatursensor oder ungleichmäßiges Auftragen der Wärmeleitpaste verursacht werden. Gleichzeitig ist die Auslenkung an den Positionen 501 mm, 601 mm

und 701 mm größer als an den symmetrischen Positionen 301 mm, 201 mm und 101 mm. Diese asymmetrische Verlängerung kann durch die asymmetrische Platzierung der Temperatursensoren verursacht werden. Die Temperatursensoren an den Positionen 251 mm, 201 mm und 151 mm entziehen dem Körper des linearen Positionssensors einen Teil der Wärme, während die Positionen 551 mm, 601 mm und 651 mm nicht durch die Wärmeübertragung zu den Temperatursensoren beeinflusst werden, was zu einer größeren Verlängerung führen kann.

Die Unterschiede zwischen den Auslenkungen aus der Messung und der Simulation (Tab. 6) sind relativ groß, obwohl die Temperaturunterschiede (Tab. 5) minimal waren. Dies kann durch die Vernachlässigung des Einflusses des Klebstoffs zwischen dem Aluminiumkörper und der Glasskala verursacht werden. Da die Aluminiumlegierung einen viel höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten ($\alpha_{Al} = 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) als die Glasskala ($\alpha_{Glas} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) hat, kann der Klebstoff eine geringere Verschiebung der Glasskala im Vergleich zum Aluminiumkörper verursachen.

7.6 Zusammenfassung

Die vorliegende Bachelorarbeit befasst sich mit der Problematik der Fehleranalyse bei der Positionsmessung unter thermischer Belastung. Durch die Änderung der Umgebungstemperatur (Temperatur in der Halle) ändert sich auch die Temperatur des linearen Positionssensors. Ziel dieser Bachelorarbeit war es, eine Simulation zu entwerfen, die den Einfluss der thermischen Ausdehnung kompensiert. Die Ergebnisse der Simulation würden in zukünftige Messungen einfließen, um die Genauigkeit der Positionsmessung der Arbeitsmaschine und die Produktionsgenauigkeit zu erhöhen.

In Kapitel 7.2 wurden verschiedene Arten von Positionssensoren beschrieben. Diese werden nach ihrer Konstruktion in lineare und rotatorische Sensoren, gekapselte und offene Sensoren unterteilt. Nach der Art der Positionsmessung werden sie in direkte und indirekte, absolute und relative sowie digitale und analoge Sensoren unterteilt. Nach dem physikalischen Prinzip können Positionssensoren in optische, induktive, kapazitive, magnetische, resistive und andere unterteilt werden. Es gibt viele Arten der Positionsmessung, und jede Methode bietet bestimmte Vor- und Nachteile. Je nach spezifischer Anwendung des Sensors muss der geeignete Sensortyp ausgewählt werden.

Da es wirtschaftlich und zeitlich vorteilhaft ist, Computerprogramme zu nutzen, werden bei der Entwicklung oder auch bei der Produktion zunehmend verschiedene Computerprogramme eingesetzt. Diese können die Entwicklung vereinfachen oder die Produktion beschleunigen und präzisieren. Zu den am häufigsten verwendeten Softwareprogrammen gehören AutoCAD, Inventor, SolidWorks, Ansys, Catia oder Siemens TIA Portal.

Kapitel 7.3 beschreibt die Arten der Wärmeübertragung. Thermische Ausdehnung und Temperaturänderung beeinflussen direkt die Genauigkeit der Positionssensoren, daher muss diesem Problem Aufmerksamkeit geschenkt werden. Es gibt drei Arten der Wärmeübertragung – Leitung, Konvektion und Strahlung. Die Genauigkeit der Positionsmessung wird stark durch Wärmeleitung und Konvektion beeinflusst. Unter normalen Bedingungen hat die Strahlung einen geringen Einfluss auf die Genauigkeit des Positionssensors. Es ist notwendig, den negativen Einfluss von Leitung und Konvektion auf die Messgenauigkeit zu berücksichtigen, um die Genauigkeit der Arbeitsmaschinen zu erhöhen. Dadurch können Produkte mit höherer Präzision hergestellt werden.

Kapitel 7.4 ist der zentrale Teil der Bachelorarbeit, der das Verhalten des linearen Positionssensors Heidenhain LS 487 unter thermischer Belastung während der Positionsmessung beschreibt. Der Heidenhain LS 487 Sensor ist ein linearer, gekapselter Inkrementalsensor, der aufgrund seiner Abmessungen für den Einbau in Maschinen mit begrenztem Platzangebot geeignet ist.

Während der Messung wurde der Sensor in mehreren Schritten von der Umgebungstemperatur auf 45 °C erhitzt. Ziel der Simulation im Programm Ansys war es, eine Methode zu entwerfen, die den Einfluss der thermischen Ausdehnung dieses Lineals kompensiert.

Zunächst wurde ein 3D-Modell des Heidenhain LS 487 Sensors im Programm Inventor erstellt. Dieses Modell wurde anschließend in das Programm Ansys Workbench geladen, das mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) das Modell des Lineals in eine große Anzahl kleiner Elemente unterteilt. Auf dieser Grundlage können die Temperatur oder die Positionsabweichung an verschiedenen Punkten bestimmt werden. Obwohl der Verlauf der Werte nicht kontinuierlich ist und die gewünschten Werte nicht an allen Punkten des Lineals bestimmt werden können, kann durch die Unterteilung des Körpers

in eine große Anzahl kleiner Elemente ein sehr genaues Ergebnis der gewünschten Größen erzielt werden.

Aus den Ergebnissen lässt sich feststellen, dass die Temperatursimulation den gemessenen Werten mit einer maximalen Abweichung von 6 % entspricht. Die Unterschiede zwischen den Abweichungswerten aus der Simulation und den Messungen sind jedoch erheblich größer. Der wahrscheinliche Grund für die Ungenauigkeit ist die Vernachlässigung einiger Effekte, höchstwahrscheinlich der Wärmeübertragung durch das Klebemittel zwischen dem Aluminiumkörper des Positionssensors und der Glasskala.

In der Diskussion wurden die Einschränkungen und Empfehlungen für mögliche weitere Messungen und Simulationen beschrieben. Es wird erwartet, dass diese Simulation in zukünftigen Messungen verwendet wird.

Seznam použitých zdrojů

- [1] RIPKA, Pavel. *Senzory a převodníky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03123-3.
- [2] Heidenhain. 2024. Dostupné z: <https://www.heidenhain.us/resources-and-news/the-history-of-the-encoder-2/>. [Citováno 2024-06-29]
- [3] EPC History. Online. Encoder Products Company. C2024. Dostupné z: <https://www.encoder.com/history>. [cit. 2024-07-19].
- [4] MEHRA, Aashish. Encoder Companies - Sensata Technologies (US) and HEIDENHAIN (Germany) are the Key Players. Online. Markets and Markets. 2023. Dostupné z: <https://www.marketsandmarkets.com/ResearchInsight/encoder-market.asp>. [cit. 2024-07-19].
- [5] ALEJANDRE, I. a M. ARTES. Thermal non-linear behaviour in optical linear encoders. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2006, 46(12-13), 1319-1325 [cit. 2024-06-12]. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.10.010
- [6] Gurauskis, D.; Kilikevičius, A.; Kasparaitis, A. Thermal and Geometric Error Compensation Approach for an Optical Linear Encoder. *Sensors* **2021**, 21, 360. <https://doi.org/10.3390/s21020360>
- [7] GURAUSKIS, Donatas, Arturas KILIKEVIČIUS, Sergejus BORODINAS a Albinas KASPARAITIS. Analysis of geometric and thermal errors of linear encoder for real-time compensation. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2019, **296**, 145-154 [cit. 2021-01-05]. ISSN 09244247. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2019.06.055
- [8] Lineární snímače polohy. Online. Heidenhain. C2024. Dostupné z: <https://www.heidenhain.cz/produkty/linearni-snimace-polohy>. [cit. 2024-07-19].
- [9] VOJÁČEK, Antonín. Rotační enkodéry pro řízení pohonů a pohybu. Online. Automatizace.hw.cz. 2017. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/rotacni-ekodery-pro-rizeni-pohonu-a-pohybu.html>. [cit. 2024-07-19].

- [10] MM Průmyslové Spektrum. 2024. Dostupné z:
<https://www.mmspektrum.com/clanek/rotacni-snimace-ekodery>. [Citováno 2024-01-15]
- [11] Rotary encoders. Online. Heidenhain. C2024. Dostupné z:
<https://www.heidenhain.com/products/rotary-encoders>. [cit. 2024-07-19].
- [12] František Bradáč, 2011. QUADROCOPTER - STABILIZACE POMOCÍ INERCIÁLNÍCH SNÍMAČŮ [online]. Diplomová práce, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Dostupné z
https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38682
[Citováno 2024-02-11].
- [13] VYLEGALA Pavel. ROBOTI: Senzory a snímače [online]. 2013. Ostrava: SŠE Ostrava [cit. 2018-05-14]. Dostupné z:
http://www.ssenajizdarne.cz/projekty/roboti/dokumenty/v_prez_ss_1.pdf
- [14] Modelová řada LC 100. Online. Heidenhain. C2024. Dostupné z:
<https://www.heidenhain.cz/produkty/linearni-snimace-polohy/zapouzrene/modelova-rada-lc-100>. [cit. 2024-07-19].
- [15] Heidenhain. 2024. Dostupné z: <https://www.heidenhain.us/resources-and-news/exposed-linear-encoders-permanently-stable-measured-values-detailed-accuracy-data> [Citováno 2023-12-12]
- [16] Modelová řada LIC 4100. Online. Heidenhain. C2024. Dostupné z:
<https://www.heidenhain.cz/produkty/linearni-snimace-polohy/otevrene/modelova-rada-lic-4100>. [cit. 2024-07-19].
- [17] Radomír Mendřický. 2014. Odměřovací systémy. Odměrování přímé a nepřímé, přírůstkové a absolutní. [online]. Dostupné z:
<https://www.ksa.tul.cz/getFile/id:3672> [Citováno 2024-02-12].
- [18] FORMÁNEK, Josef. Výukové texty. Online. Západočeská univerzita v plzni. 2007. Dostupné z: <https://home.zcu.cz/~formanek/mmvyuka-amzt/Data/ivk-arvt-soubory/10-F.pdf>. [cit. 2024-07-19].
- [19] KOPAL, Miroslav. Odměřovací systémy a jejich vliv na přesnost. Online. MM Průmyslové spektrum. 2013. Dostupné z:

- <https://www.mmspektrum.com/clanek/odmerovaci-systemy-a-jejich-vliv-na-presnost>. [cit. 2024-07-19].
- [20] Encoding and Code Wheel Proposal for TCUT1800X01. Online. Vishay. 2019. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/84906/encodingtcut1800x01.pdf>. [cit. 2024-07-19].
- [21] NOVÁK, Martin. Technická měření. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN 978-80-01-06388-0.
- [22] Analogový a digitální signál. Online. IVT3. C2012-2020. Dostupné z: <https://ivt3.cz/index.php/teorie/analogovy-a-digitalni>. [cit. 2024-07-19].
- [23] Resistivity and Resistance. Online. LibreTexts. C2024. Dostupné z: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/University_Physics_\(OpenStax\)/University_Physics_II_-_Thermodynamics_Electricity_and_Magnetism_\(OpenStax\)/09%3A_Current_and_Resistance/9.04%3A_Resistivity_and_Resistance](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/University_Physics_(OpenStax)/University_Physics_II_-_Thermodynamics_Electricity_and_Magnetism_(OpenStax)/09%3A_Current_and_Resistance/9.04%3A_Resistivity_and_Resistance). [cit. 2024-07-19].
- [24] Zweipol. Online. Academic. C2000-2024. Dostupné z: <https://de-academic.com/dic.nsf/dewiki/1554735>. [cit. 2024-07-19].
- [25] MERANIE POLOHY A POSUNUTIA. Online. Scripgroup. C2024. Dostupné z: <https://www.scripgroup.com/limba/ceha-slovaca/51/MERANIE-POLOHY-A-POSUNUTIA84471.php>. [cit. 2024-07-19].
- [26] MARCINKOWSKA, Sandra. Odporový drát – co to je a kde se používá? Online. Botland. 2023. Dostupné z: <https://botland.cz/blog/odporovy-drat-co-to-je-a-kde-se-pouziva/>. [cit. 2024-07-19].
- [27] Magnetic Encoder : Working, Interfacing, Advantages, Disadvantages & Its Applications. Online. Elprocus. C2013-2024. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/magnetic-encoder/>. [cit. 2024-07-19].
- [28] Magnetic Encoders. Online. Dynapar. C2024. Dostupné z: https://www.dynapar.com/Technology/Encoder_Basics/Magnetic_Encoder/. [cit. 2024-07-19].

- [29] TRAN, Trong-Hieu; CHANG-PO CHAO, Paul a CHIEN, Ping-Chieh. The Front-End Readout as an Encoder IC for Magneto-Resistive Linear Scale Sensors. Online. MDPI. 2016. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/9/1416>. [cit. 2024-07-19].
- [30] Hall Effect Sensor. Online. Electronics Tutorials. C2024. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>. [cit. 2024-07-19].
- [31] VYLEGALA, Pavel. KAPACITNÍ, INDUKČNOSTNÍ A INDUKČNÍ SNÍMAČE. Online. Střední škola elektrotechnická. 2014. Dostupné z: https://www.sse-najizdarne.cz/projekty/roboti/dokumenty/v_prez_ss_3.pdf. [cit. 2024-07-19].
- [32] COLLINS, Danielle. What are inductive encoders and how do they differ from resolvers and LVDTs? Online. Motion Control Tips. 2021. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/what-are-inductive-encoders-and-how-do-they-differ-from-resolvers-and-lvdt/>. [cit. 2024-07-19].
- [33] TOMIOTTO, Giovanna. Basics of the Linear Variable Differential Transformer (LVDT). Online. Realpars. 2022. Dostupné z: <https://www.realpars.com/blog/lvdt>. [cit. 2024-07-19].
- [34] What is a LVDT? Online. Omega. Dostupné z: <https://www.omega.co.uk/technical-learning/linear-variable-displacement-transducers.html>. [cit. 2024-07-19].
- [35] SUNDAR. What is a LVDT? Online. Extrudesign.com. 2018. Dostupné z: <https://extrudesign.com/lvdt-linear-variable-differential-transformer/>. [cit. 2024-07-19].
- [36] Optical Encoder Basics. Online. Quantum Devices. C2024. Dostupné z: <https://www.quantumdev.com/resource-library/optical-encoder-basics-what-is-an-optical-encoder/>. [cit. 2024-07-19].
- [37] MENKE, Henry. Absolute Rotary Encoder Sensing Technology: Optical and Magnetic. Online. Automation Insights. C2024. Dostupné z: [97](https://automation-</p></div><div data-bbox=)

- insights.blog/2015/09/16/absolute-rotary-encoder-sensing-technology-optical-and-magnetic/. [cit. 2024-07-19].
- [38] Using Gray coding to read angular position of a rotator, need suitable sensor. Online. Arduino. 2016, 2021. Dostupné z: <https://forum.arduino.cc/t/using-gray-coding-to-read-angular-position-of-a-rotator-need-suitable-sensor/388051>. [cit. 2024-07-19].
- [39] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert a WALKER, Jearl, DUB, Petr (ed.). *Fyzika. 2., přeprac. vyd.* Přeložil Miroslav ČERNÝ. Překlady vysokoškolských učebnic. Brno: VUTIUM, c2013. ISBN isbn978-80-214-4123-1.
- [40] Thermal Expansion. Online. LibreTexts. C2024. Dostupné z: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Physics_\(Boundless\)/12%3A_Temperature_and_Kinetic_Theory/12.3%3A_Thermal_Expansion](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Physics_(Boundless)/12%3A_Temperature_and_Kinetic_Theory/12.3%3A_Thermal_Expansion). [cit. 2024-07-19].
- [41] How Temperature and Humidity Affect Encoder Performance. Online. Dynapar. C2024. Dostupné z: <https://www.dynapar.com/Knowledge/Encoder-Temperature-Humidity/>. [cit. 2024-07-19].
- [42] Methods of Heat Transfer. In: *The Physics Classroom* [online]. [cit. 2024-07-15]. Dostupné z: <https://www.physicsclassroom.com/class/thermalP/Lesson-1/Methods-of-Heat-Transfer>
- [43] Linear Encoders. Online. Heidenhain. 2023. Dostupné z: https://www.heidenhain.com/fileadmin/pdf/en/01_Products/Prospekte/PR_Linear_Encoders_for_Numerically_Controlled_Machine_Tools_ID571470_en.pdf. [cit. 2024-07-19].
- [44] DA 400 compressed-air filter system. Online. Heidenhain. 2016. Dostupné z: https://www.heidenhain.com/fileadmin/pdf/en/01_Products/Produktinformationen/PI_DA400_ID894509_en.pdf. [cit. 2024-07-19].
- [45] SNÍMAČE TEPLoty PT100 - PRINCIP, ZAPOJENÍ, TŘÍDY PŘESNOSTI. Online. Profess. C2024. Dostupné z: https://www.profess.cz/cs/pci/odporove_snimace_teploty. [cit. 2024-07-19].

- [46] Platinum RTD Sensor - PT1000 - 3 Wire 1 meter long. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.adafruit.com/product/3984>. [cit. 2024-07-19].
- [47] HIRSCH, Andreas a HELLMICH, Arvid. Aufbau und Auslegung funktionsbestimmender Werkzeugmaschinen-Baugruppen. Online. In: Springer Link. 2013. Dostupné z: https://media.springernature.com/original/springer-static/image/chp:10.1007%2F978-3-642-30078-3_7/MediaObjects/216691_1_De_7_Fig90_HTML.jpg. [cit. 2024-07-15].

Seznam použitých obrázků

Obr. 1: Lineární snímač polohy Heidenhain.....	24
Obr. 2: Rotační snímač polohy Heidenhain.....	25
Obr. 3: Zapouzdřený lineární snímač Heidenhain LC 100.....	26
Obr. 4: Otevřený lineární snímač Heidenhain LIC 4100.....	27
Obr. 5: Přímé odměřování polohy	27
Obr. 6: Schéma nepřímého odměřování pomocí kotoučku	28
Obr. 7: Nepřímé odměřování polohy na výrobním stroji	28
Obr. 8: Grayův kód	29
Obr. 9: Průběh signálů inkrementálního enkodéru	30
Obr. 10: Znázornění analogového signálu.....	31
Obr. 11: Digitální signál vytvořený z analogového signálu	31
Obr. 12: Náhradní schéma odporového senzoru polohy.....	33
Obr. 13: Průběh magnetického pole a magnetických pólů	34
Obr. 14: Znázornění Hallova jevu	35
Obr. 15: Schématické znázornění LVDT	36
Obr. 16: Schéma indukčního napájení do jezdce	36
Obr. 17: Absolutní rotační snímač polohy s Grayovým kódem	37
Obr. 18: Porovnání pětibitového Grayova kódu s klasickým binárním kódováním	38
Obr. 19: Znázornění montáže enkodéru	45
Obr. 20: Filtrační systém stlačeného vzduchu	45
Obr. 21: Těsnicí systém pravítka LC 1x5	46
Obr. 22: Schematický popis pravítka LC 115.....	46
Obr. 23: Teplotní senzor PT1000	47
Obr. 24: Vytvoření průřezu pravítka.....	47
Obr. 25: Vytvořený 3D model pravítka	47
Obr. 26: Otopné těleso umístěné na enkodéru.....	48
Obr. 27: Systémové nastavení v programu Ansys	49
Obr. 28: Vygenerovaná síť v průřezu	49
Obr. 29: Vygenerovaná síť po délce	50
Obr. 30: Působivé tepelné namáhání.....	50

Obr. 31: Působení konvekce na lineární snímač	50
Obr. 32: Průběh teploty po délce lineárního snímače teploty	51
Obr. 33: Délková deformace pravítka	51
Obr. 34: Vychýlení skleněné stupnice vůči středu	51
Obr. 35: Průběh teploty v jednotlivých bodech během měření	53
Obr. 36: Naměřená výchylka jednotlivých bodů vůči středu	53
Obr. 37: Naměřená absolutní výchylka jednotlivých bodů vůči středu	54
Obr. 38: Lineares Längenmessgerät Heidenhain	63
Obr. 39: Rotatorisches Längenmessgerät Heidenhain	63
Obr. 40: Gekapseltes lineares Längenmessgerät Heidenhain LC 100	64
Obr. 41: Offenes lineares Längenmessgerät Heidenhain LIC 4100	64
Obr. 42: Direkte und indirekte Positionsmessung	65
Obr. 43: Schema von Gray-Code	66
Obr. 44: Verlauf von Signalen eines inkrementellen Sensors	66
Obr. 45: Analoges Signal	67
Obr. 46: Digitales Signal, erzeugt aus analogem	67
Obr. 47: Ersatz-Elektroschaltplan eines Widerstandssensors	68
Obr. 48: Darstellung des Hall-Effekts	70
Obr. 49: Darstellung von LVDT	70
Obr. 50: Vergleich eines Binärkodes mit einem Gray-Code	71
Obr. 51: Darstellung der Montage des Encoders	77
Obr. 52: Druckluftfiltersystem Heidenhain DA 400	78
Obr. 53: Dichtungssystem von Heidenhain LC 1x5	78
Obr. 54: Schematische Beschreibung von LC 115	79
Obr. 55: Temperatursensor PT1000	79
Obr. 56: Erstellung von Querschnitt des Messgerätes	80
Obr. 57: 3D Modell von LS 487	80
Obr. 58: Heizelement auf dem Längenmessgerät	81
Obr. 59: Systemeinstellung in Ansys	82
Obr. 60: Generierte Netz im Querschnitt	83
Obr. 61: Generierte Netz über die Länge	83
Obr. 62: Ort der thermischen Belastung	83

Obr. 63: Wirkung der Konvektion auf den Sensor	84
Obr. 64: Verlauf der Temperatur über die Länge des Positionssensors	84
Obr. 65: Deformation über die Länge.....	85
Obr. 66: Die Abweichung der Glasskala von der Mitte	85
Obr. 67: Verlauf der Temperatur in einzelnen Punkten während der Messung	87
Obr. 68: Abweichung während der Messung	87
Obr. 69: Absolute Abweichung während der Messung.....	88

Seznam použitých tabulek

Tab. 1: Vlastnosti enkodéru Heidenhain LS 487	44
Tab. 2: Srovnání teplot z měření a ze simulace	52
Tab. 3: Srovnání výchylek z měření a ze simulace.....	55
Tab. 4: Eigenschaften von Längenmessgerät Heidenhain LS 487	77
Tab. 5: Vergleich der Temperaturen aus der Simulation und aus der Messung.....	86
Tab. 6: Vergleich der Abweichungen aus der Messung und aus der Simulation	89