

Technische Universität Chemnitz

Fakultät für Maschinenbau

Bachelorarbeit

Thema: Überarbeitung und Weiterentwicklung eines cyber-physischen Messsystems für Werkzeugspannfutter

vorgelegt von: Novák, Jiří

geb. am: 28.12.1999

in: Brno

Studiengang: Maschinenbau

Berufsfeld: Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (bei B_MB)

Betreuer: M.Sc. Markus Fuchs

Prof. Dr.-Ing. Martin Dix



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

**REVIZE A DALŠÍ VÝVOJ KYBERFYZIKÁLNÍHO
MĚŘICÍHO SYSTÉMU PRO NÁSTROJOVÁ
SKLÍČIDLA**

REVISION AND FURTHER DEVELOPMENT OF A CYBER-PHYSICAL MEASURING SYSTEM FOR
TOOL HOLDERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Novák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

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

BRNO 2023

Aufgabenstellung Bachelorarbeit

für Herrn Jiří Novák

Thema: Überarbeitung und Weiterentwicklung eines cyber-physischen Messsystems für Werkzeugspannfutter

Aufgabenstellung

Die zunehmende Digitalisierung spiegelt sich auch im Gesamtsystem Werkzeugmaschine wider. Dabei sollen unter anderem Prozesse und Komponenten mit Hilfe von cyber-physischen Systemen (CPS) überwacht, sowie intelligent und anpassungsfähig gestaltet werden. Neben dem System Werkzeugmaschine rückt auch die Werkzeugstruktur als genauigkeitsbestimmende Komponente in den Fokus der Prozessüberwachung und -gestaltung. Dabei sollen unter anderem das thermische und dynamische Verhalten des Werkzeugs unter dem Einfluss des Prozesses erforscht werden. Dadurch lässt sich das Prozessverständnis erhöhen und Effizienz, Stabilität sowie Genauigkeit der Fertigung steigern. Hierzu bedarf es Messsystemen, welche unter schwierigsten Bedingungen mit höchsten Anforderungen an Energieeffizienz und Bauraumausnutzung an Werkzeugstrukturen appliziert werden können.

In dieser Arbeit soll ein bestehendes CPS für die thermische Charakterisierung von Werkzeugstrukturen überarbeitet und an neue Aufgaben angepasst werden. Hierbei sollen neue elektrische Komponenten zum Einsatz kommen, welche das System hinsichtlich Leistungsfähigkeit, möglichen kontaktlosen Übertragungswegen sowie Energieeffizienz verbessern. Weiterhin soll zusätzliche Sensorik implementiert werden, welche es dem System gestattet dynamische Messungen an der Werkzeugstruktur vorzunehmen.

Schwerpunkte der Arbeit

- Recherche und Einarbeitung im Bereich Prozessüberwachung, Schaltungsentwicklung und Mikrocontrollertechnik
- Ist-Stand Analyse des bestehenden CPS und Ableitung von Erweiterungs- und Optimierungsmöglichkeiten
- Aufbau und Inbetriebnahme des überarbeiteten CPS unter Beachtung der Anforderungen an Bauraum und Energieversorgung
- Erbringung eines Funktionsnachweises für das entwickelte CPS
- Konstruktiver Entwurf für die praxistaugliche Applikation des Systems an einem marktüblichen Werkzeughalter

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.

Ausgabedatum: 15.12.2023

Abgabedatum: 08.03.2023

Betreuer: M.Sc. Markus Fuchs
Prof. Dr.-Ing. Martin Dix

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Jiří Novák
Studijní program:	Výrobní technika
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	doc. Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

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:

Revize a další vývoj kyberfyzikálního měřicího systému pro nástrojová sklíčidla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rostoucí digitalizace se odráží i v celkovém systému obráběcích strojů. Procesy a komponenty mají být mimo jiné monitorovány pomocí kyberneticko–fyzických systémů (CPS) a také inteligentně a přizpůsobitelně navrženy. Kromě systému obráběcího stroje se do centra pozornosti sledování a navrhování procesu dostává také konstrukce nástroje jako součást určující přesnost. Mimo jiné je třeba zkoumat tepelné a dynamické chování nástroje pod vlivem procesu. Tím se zvýší porozumění procesu alepší se účinnost, stabilita a přesnost výroby. To vyžaduje měřicí systémy, které lze aplikovat na konstrukce nástrojů v nejnáročnějších podmínkách s nejvyššími nároky na energetickou účinnost a využití instalačního prostoru.

V této práci je třeba přepracovat stávající CPS pro tepelnou charakterizaci konstrukcí nástrojů a přizpůsobit ji novým úlohám. Ke zlepšení systému z hlediska výkonu, možných bezkontaktních přenosových cest a energetické účinnosti budou použity nové elektrické komponenty. Kromě toho bude implementována další senzorová technologie, která systému umožní provádět dynamická měření na konstrukci nástroje.

Bakalářská práce je psána v německém jazyce. Vedoucím práce na TU Chemnitz je M.Sc. Markus Fuchs a Prof. Dr.–Ing. Martin Dix. Na VUT v Brně doc. Ing., Dipl.–Ing Michal Holub, Ph.D.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše a seznámení se s problematikou monitorování procesů, vývoje obvodů a mikrokontrolérů.
Analýza stávajícího stavu stávajícího CPS a odvození možností rozšíření a optimalizace.
Sestava a zprovoznění revidovaného CPS s ohledem na požadavky na prostor pro instalaci a napájení
Důkaz funkce nově vyvinutého CPS
Návrh konstrukce pro praktické použití systému na komerčně dostupném nástrojovém držáku
Závěr a vyhodnocení dosažených výsledků, doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, J. a kol., MM Průmyslové spektrum: Konstrukce CNC obráběcích strojů IV. 2018. Speciální vydání. Dostupný z WWW: . ISBN 978-80-906310-8-3.
WECK, M., Brecher, Ch. Werkzeugmaschinen : Konstruktion und Berechnung. 2006. überarb. Auflage. Verlag Berlin Heidelberg : Springer, 2006. 701 s. ISBN 3-540-22502-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

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

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

Bibliografische Beschreibung und Kurzreferat

Novák, Jiří

Thema: Überarbeitung und Weiterentwicklung eines cyber-physischen Messsystems für Werkzeugspannfutter

Bachelorarbeit an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz,
Professur Produktionssysteme und -prozesse, Chemnitz, 2023

87 Seiten

43 Abbildungen

3 Anlagen

42 Quellen

1 Datenträger

Schlagworte

Werkzeugmaschine, sensorischer Werkzeughalter, thermische Expansion, Schwingung, CPS, drahtlose Datenübertragung

Kurzreferat:

Während der Zerspanung erwärmt sich das Werkzeug und verändert dadurch seine Geometrie. Um diese Erwärmung während der Fräsbearbeitung zu messen wurde ein sensorischer Werkzeughalter entwickelt. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird dieser Werkzeughalter überarbeitet. Die Funktion wird um die Beschleunigungsmessung erweitert, um die Schwingungen beim Fräsen zu messen. Weiterhin werden neue Bauteile und ein anderer Funkstandard verwendet und eine neue Konstruktion entwickelt. Die Funktionsfähigkeit des Messsystems wird mit geeigneten Versuchen validiert, wobei die Ungenauigkeit der nachgebildeten Schwingungsfrequenz unterhalb von 2 % liegt. Die endgültige Fertigung und Integration des Messsystems in den Werkzeughalter wird im Rahmen dieser Bachelorarbeit nicht durchgeführt.

Bibliografický záznam a abstrakt

NOVÁK, Jiří. *Revize a další vývoj kyberfyzikálního měřicího systému pro nástrojová sklíčidla*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/145781>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Michal Holub.

Klíčová slova

obráběcí stroj, sensorický upínač nástrojů, tepelná roztažnost, vibrace, kyberfyzikální měřicí systém, bezdrátový přenos dat

Abstrakt:

Během obrábění se nástroj zahřívá a v důsledku toho se mění jeho geometrie. Za účelem měření teploty během frézování byl vyvinut sensorický upínač nástrojů. V rámci této bakalářské práce byl tento upínač nástrojů přepracován. Funkce byla rozšířena o měření zrychlení, aby bylo možné měřit vibrace během frézování. Kromě toho jsou použity nové komponenty a jiný standard pro bezdrátový přenos a byla navržena nová konstrukce. Dále byly provedeny pokusy, při nichž byla ověřena funkčnost nového měřicího systému. Odchylka naměřené frekvence vibrací přitom nepřesáhla 2 %. Konečná výroba upínače a integrace měřicího systému do nástrojového držáku nebyla součástí této bakalářské práce.

Abstract

Novák, Jiří

Revision and further development of a cyber-physical measuring system for tool chucks

Bachelor Thesis at the Institute of Production Systems and Processes, Chemnitz University of Technology; Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology, 2023

Keywords

Machine tool, sensor tool chuck, thermal expansion, vibration, cyber-physical measuring system, wireless data transmission

Abstract:

During machining, the tool is heated and its geometry is changed as a result. In order to measure this heating during milling, a sensory tool holder was developed. Within the scope of this bachelor thesis this tool holder was revised. The functionality was extended by acceleration measurement to measure the vibrations during milling. Furthermore, new components and a different radio standard are used and new construction was developed. The function of the measuring system was validated with suitable experiments. The deviation of the measured vibration frequency did not exceed 2%. The final production and integration of the measuring system into the tool holder is not part of this bachelor thesis.

Inhalt

Bibliografische Beschreibung und Kurzreferat.....	I
Bibliografický záznam a abstrakt	II
Abstract.....	III
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Kurzzeichenverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XI
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik	2
2.1 Lineare thermische Längenausdehnungen	2
2.2 Cyber-physisches System.....	3
2.3 Erfassen der Daten	4
2.3.1 Messen.....	4
2.3.2 Analog-digitale Wandlung	6
2.3.3 Datenbus.....	8
2.4 Marktverfügbare sensorische Werkzeughalter	11
2.4.1 Pro-micron – Spike.....	11
2.4.2 Schunk – iTENDO2.....	11
2.4.3 Kistler – Rotierende Dynamometer (RCD).....	12
2.4.4 Projekt Sense4Tool.....	13
2.4.5 Vergleich der marktverfügbaren sensorischen Werkzeughalter	14
3 Ist-Stand Analyse des bestehenden CPS	15
3.1 Sendeeinheit	15
3.2 Empfangsstation.....	19
3.3 Erweiterungs- und Optimierungsmöglichkeiten.....	21
4 Zielstellung	23
5 Aufbau und Inbetriebnahme des neuen CPS	24
5.1 Vorüberlegung.....	24
5.2 Sendeeinheit	25
5.2.1 Neuentwicklung.....	25
5.2.2 Programm	25
5.2.3 Beschaltung	31
5.2.4 Konstruktion	34
5.2.5 Fertigung	42
5.3 Empfangsstation.....	43
5.3.1 Neuentwicklung.....	43

5.3.2	Programm	45
5.4	Bluetooth Low Energy	46
5.5	Zeiteinstellung	48
5.6	Datenumrechnung	50
5.6.1	Beschleunigungsdaten	50
5.6.2	Temperaturdaten	51
5.7	Aus- und Einschaltungsvorgang der Sendeeinheit	52
6	Validierung der Funktionsfähigkeit	53
6.1	Versuchsaufbau	53
6.2	Auswertung	55
7	Zusammenfassung	61
8	Ausblick	63
9	Shrnutí bakalářské práce v češtině	64
9.1	Úvod	64
9.2	Současně dostupná řešení	64
9.3	Analýza dosavadního měřicího systému	65
9.3.1	Vysílač	65
9.3.2	Přijímač	67
9.3.3	Možnosti rozšíření a optimalizace	67
9.4	Cíle práce	68
9.5	Návrh nového měřicího systému	68
9.5.1	Vysílač	68
9.5.2	Přijímač	70
9.6	Důkaz funkce nově vyvinutého systému	70
9.7	Závěr	71
10	Literaturverzeichnis	72
11	Anlagenverzeichnis	75
12	Anlagen	76
12.1	Auswahl von [REDACTED]	76
12.2	Auswahl von [REDACTED]	77
12.3	Versorgung der Sendeeinheit	79
12.4	Zeichnungen	81
13	Verzeichnis des Datenträgers	87

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
ACM	Abstract Control Model
AD	Advertising Data
ADW/ADC	Analog-Digital Wandler
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BLE	Bluetooth Low Energy
BR/DER	Bluetooth Basic Rate/Enhanced Data Rate
CDC	Communication Device Class
CLK	Takt
COM-Port	Kommunikationsanschluss
CPS	Cyber-Physisches System
CS	Chip Auswahl
DAC	Digital-Analog Umsetzer
DIN	Deutsches Institut für Normung
DK	Development Kit
FIFO	First In – First Out
GND	Masse
GPIO	General Purpose Input/Output
HSK	Hohlschaftkegel
I ² C	Inter-Integrated Circuit
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LED	Leuchtdiode
LSB	Least Significant Bit
MCU	Microcontroller Unit
MISO	Master In Slave Out
MOSI	Master Out Slave In
MSB	Most Significant Bit
ODR	Output Data Rate
OLED	Organische Leuchtdiode
RAM	Arbeitsspeicher
RGB	Rot-Grün-Blau
RX	Empfangsleitung

SDK	Software Development Kit
SMD	Surface-Mounted Device
SoC	System on Chip
SPI	Serial Peripheral Interface
SR	Scan Response
TCP	Werkzeugmittelpunkt
TX	Sendeleitung
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
uint8_t	8 bit unsigned Integer
USB	Universal Serial Bus
UUID	Universally Unique Identifier
VDD	Versorgungsspannung

Kurzzeichenverzeichnis

Kurzzeichen	Benennung	Einheit
a	Parameter außerhalb der Potenz	°C
b	Parameter des Exponenten	mm ⁻¹
e	Eulersche Zahl	-
f	Frequenz	Hz
n	Natürliche Zahl	-
r	Abstand von der Rotationsachse	mm
t	Zeit	s
x	Unabhängige Variable	mm
y	Abhängige Variable (Schwingung)	mm
z	Abhängige Variable (e-Funktion)	°C
l_0	Ausgangslänge	m
l_1	Neue Körperlänge	m
n_{max}	Maximale Spindeldrehzahl	min ⁻¹
u_1	Eingangsspannung - Teiler	V
u_a	Ausgangsspannung - Teiler	V
u_c	Spannung am Kondensator – Teiler	V
u_e	Eingangsspannung – Komparator	V
y_0	Versatz der Schwingung	mm
y_{max}	Amplitude der Schwingung	mm
z_n	Nummer von Bit	-
B_x	Biegemoment um x-Achse	Nm
B_y	Biegemoment um y-Achse	Nm
F_z	Kraft in z-Richtung	N
$Gain$	Verstärkung	-
$LSByte$	Most Significant Byte	-
$MSByte$	Least Significant Byte	-
$R1$	Spannungsteiler – Widerstand 1	MΩ

R_2	Spannungsteiler – Widerstand 2	M Ω
T_M	Torsionsmoment	Nm
U_{ADC}	Spannung an ADC	V
U_B	Ausgangsspannung – Komparator	V
U_{dif}	Spannungsdifferenz	V
U_{ges}	Gesamtspannung der Batterie	V
U_R	Referenzspannung – Komparator	V
α	Längenausdehnungskoeffizient	1/K
φ	Phasenverschiebung	rad
Δl	Längendifferenz	m
ΔT	Temperaturdifferenz	$^{\circ}\text{C}$

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Verhältnisse bei dem linearen Längenausdehnung [2].....	2
Abbildung 2.2: Definition Cyber-Physischer Systeme [3]	4
Abbildung 2.3: Struktur einer elektrischen Messeinrichtung nach VDI/VDE 2600 [7].....	5
Abbildung 2.4: Schematische Darstellung eines Thermoelements [9]	6
Abbildung 2.5: Abtast- und Haltekreis [10]	7
Abbildung 2.6: Schaltung und Kennlinie eines Komparators [7].....	7
Abbildung 2.7: Prinzip der sukzessiven Approximation [7].....	8
Abbildung 2.8: SPI-Lesen eines Registers [11]	9
Abbildung 2.9: UART Einschaltung [12]	10
Abbildung 2.10: UART-Datensatz [12].....	10
Abbildung 2.11: Funktionsprinzip des multisensorischen Werkzeughalters [24]	14
Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau der Sendeeinheit [2]	18
Abbildung 3.2: Sensorischer Werkzeughalter mit Sendeeinheit [2].....	19
Abbildung 3.3: Schematischer Aufbau der Empfangsstation [2].....	20
Abbildung 3.4: Zusammenbau der Empfangsstation [2].....	21
Abbildung 5.1: Schleife mit der Beschleunigungsmessungen	28
Abbildung 5.2: Hauptschleife der Sendeeinheit.....	30
Abbildung 5.3: Beschaltung der Sensoren	31
Abbildung 5.4: Beschaltung von dem Spannungsregler.....	32
Abbildung 5.5: Beschaltung des Pololu Moduls [27].....	33
Abbildung 5.6: Beschaltung von ADC.....	33
Abbildung 5.7: Prinzip Hydrodehnspannfutter [28]	35
Abbildung 5.8: Prinzip Spannzange [28].....	36
Abbildung 5.9: ER-Spannzange (links), OZ-Spannzange (rechts) [29]	37
Abbildung 5.10: Werkzeughalter Konstruktion Variante 1	38
Abbildung 5.11: Werkzeughalter Konstruktion Variante 2	40
Abbildung 5.12: Federkontaktstift [30]	41
Abbildung 5.13: Passschraube mit den Nuten.....	42
Abbildung 5.14: Batteriehalter	43
Abbildung 5.15: [REDACTED] mit MCU [33].....	44
Abbildung 5.16: Programm der Empfangsstation	46
Abbildung 5.17: Zeitverhältnisse in einer Sekunde.....	50
Abbildung 6.1: Schwingungserreger mit angelegtem [REDACTED].....	53
Abbildung 6.2: Sendeeinheit bei dem Versuch.....	54
Abbildung 6.3: Messsystem für die Vergleichsmessungen	55
Abbildung 6.4: Eingangssignal Versuch 1	57
Abbildung 6.5: Versuch 1, [REDACTED], 100 Hz.....	57
Abbildung 6.6: Versuch 2, [REDACTED], 200 Hz.....	58
Abbildung 6.7: Kontrollversuch 1, [REDACTED], 100 Hz.....	58
Abbildung 6.8: Kontrollversuch 2, [REDACTED], 200 Hz.....	59
Abbildung 6.9: Temperaturverläufe an den Sensoren	60
Abbildung 12.1: Ausladungsprofile der [REDACTED] bei 20 °C [42].....	79
Abbildung 12.2: Spannungsverläufe der [REDACTED] [42]	80

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Vergleich der marktverfügbaren Lösungen [15] [16] [25]	14
Tabelle 5.1: Aufgaben der Threads	26
Tabelle 5.2: BLE Verbindung Rollen [34].....	47
Tabelle 6.1: Auswertung der Versuche.....	56

1 Einleitung

Im Maschinenbau werden immer genauere Teile gebraucht. Das stellt große Herausforderungen für die Produktion dar, denn viele Ungenauigkeiten entstehen bei der Fertigung. Die Werkzeugmaschinen verändern im Laufe der Bearbeitung ihre Eigenschaften. Es kommt unter anderen zu Erwärmung und Schwingungen [1].

Auch die Werkzeugeigenschaften bleiben im Laufe des Spanens nicht konstant. Eine von den Störungsgrößen ist die geometrische Änderung des Werkzeugs. Beim Fertigungsprozess (z.B. Fräsen) wird ein Teil der Maschinenleistung in Wärme umgewandelt. Zu der größten Erwärmung kommt es an der Stelle, wo sich Werkzeug und Werkstück berühren. Dieses Phänomen entsteht unter anderem durch die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück.

Metalle dehnen sich mit steigender Temperatur aus. Bei den Temperaturen, die normalerweise beim Fräsen erreicht werden, dehnt sich das Werkzeug so weit aus, dass es zu erheblichen Ungenauigkeiten am Werkstück kommen kann. Um das zu verhindern, werden die Werkzeuge während des Fräsens mit Kühlschmierstoff gekühlt, sodass die Temperatur, und damit auch die Verlängerung des Werkzeugs, auf einem tolerierbaren Niveau bleibt. Der Kühlschmierstoff ist teuer und stellt eine Belastung für die Umwelt dar, deswegen wird nach anderen Möglichkeiten gesucht, die Produktionsgenauigkeit aufrechtzuhalten.

Eine Möglichkeit ist die Längenausdehnung des Werkzeugs seitens der Maschinensteuerung zu kompensieren. Dazu werden die Temperaturverläufe während des Fräsens benötigt.

Auch die Schwingungen beeinflussen die Werkstückqualität negativ, die Schwingungsfrequenz ist von den Bearbeitungsparametern abhängig. Sie können so angepasst werden, dass die ungünstigen Frequenzbereiche vermieden werden.

Um die Messdaten während des Fräsens zu erfassen, wird in dieser Arbeit ein sensorischer Werkzeughalter behandelt.

2 Stand der Technik

2.1 Lineare thermische Längenausdehnungen

Während der Fräsbearbeitung wird ein Teil der eingebrachten Energie in die Wärme umgewandelt. Die Metalle dehnen sich mit der steigenden Temperatur aus. Bei dem stabförmigen Fräser ist das besonders in der axialen Richtung erkennbar, weil der Längenunterschied Δl proportional zu der Anfangslänge l_0 ist. Weitere eingehenden Parameter sind der Temperaturunterschied ΔT und der Ausdehnungskoeffizient α , der werkstoffabhängig ist. Daraus lässt sich die Länge des Werkzeugs nach der Erwärmung l_1 berechnen [2].

$$l_1 = l_0 + \Delta l = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (1)$$

Die Verhältnisse sind auf der kommenden Abbildung veranschaulicht.

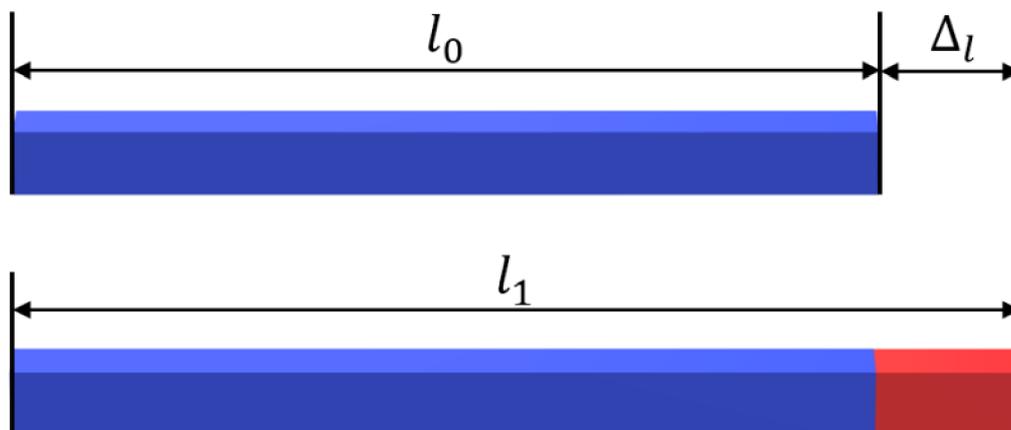


Abbildung 2.1: Verhältnisse bei der linearen Längenausdehnung [2]

In diesem Projekt wird ausschließlich die Ausdehnung in axiale Richtung betrachtet, denn sie ist wegen dem Verhältnis der Länge zum Durchmesser des Werkzeugs größer als die radiale Ausdehnung und ist viel einfacher mittels Änderungen im G-Code kompensierbar.

2.2 Cyber-physisches System

Heutzutage werden die meisten Prozesse in der Produktion digitalisiert. Das bedeutet, dass die realen Bedingungen und Ereignisse mit der virtualen Welt gekoppelt sind, die Informationen sind geteilt. Wichtige Begriffe dazu sind „Industrie 4.0“ und „Internet of Things“ [3].

Unter dem Begriff Industrie 4.0 verstehen wir die nächste Generation der Industrie. Schon in der Industrie 3.0 kam es zu Automatisierung der meisten Prozesse. Die Vorgänge, die immer in der gleichen Reihenfolge nacheinander kommen, werden automatisch durchgeführt, so dass der Aufwand auf die Bedienung möglichst klein ist. In der Industrie 3.0 werden die meisten Maschinen schon rechnerisch gesteuert, und es kommt auch zu Regelung der Prozesse anhand der aktuellen Bedingungen. Es handelt sich jedoch immer nur um eine Maschine, Informationen aus anderen Teilen der Produktionskette werden nicht ausgetauscht [3] [4].

Industrie 4.0 vernetzt einzelne Maschinen miteinander. Sobald Informationen ausgetauscht werden, können Ereignisse in den verschiedenen Teilen der Produktionskette – zu denen nicht nur Maschinen, sondern auch Lager, Transport und Vertrieb gehören – angepasst werden, um die Produktion schneller, billiger und sicherer zu machen.

In engem Zusammenhang damit steht das Internet of Things. Die einzelnen Maschinen und Geräte sind mit Sensoren ausgestattet, die Daten über den aktuellen Zustand des Prozesses und der Umgebung sammeln. Diese Daten werden nicht (nur) lokal im Maschinenspeicher gespeichert, sondern in die Cloud hochgeladen. Diese Daten können dann zur Optimierung verwendet werden. Angepasste Parameter können dann direkt an einzelne Maschinen weitergeleitet werden und der gesamte Prozess kann schnell und fließend geregelt werden [3] [4].

Im cyber-physischen System (CPS) wird dann aus allen Informationen der Sensoren ein digitales Abbild der Realität erstellt. Dieses Bild wird als digitaler Zwilling bezeichnet. Im digitalen Bild werden die Korrelationen zwischen den einzelnen, aus der Realität gewonnenen Messungen untersucht. Sobald die Zusammenhänge durch Formeln beschrieben sind, kann es am digitalen Bild getestet werden, was am realen Objekt passiert, wenn sich bestimmte Parameter während des Prozesses ändern. Dieses Prinzip ist in Abbildung 2.2 dargestellt [3] [4].

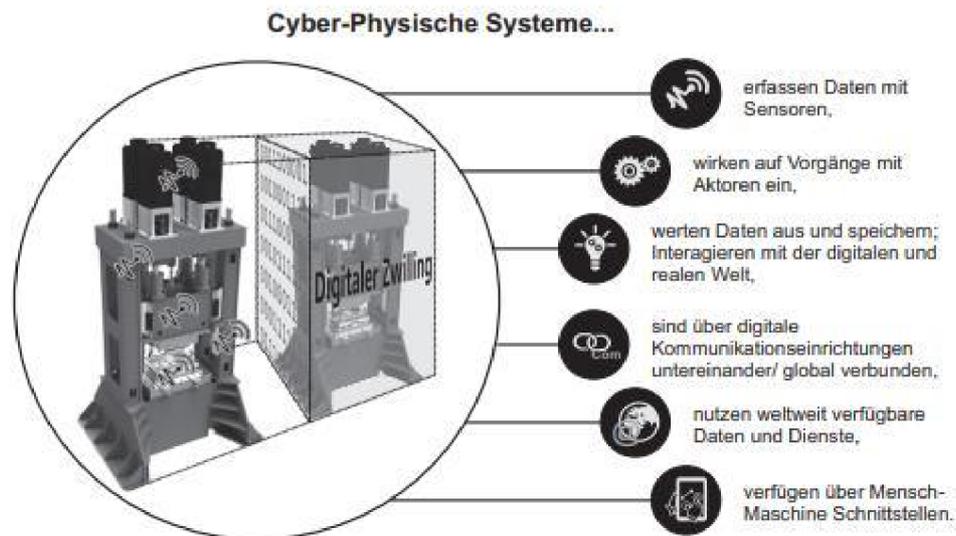


Abbildung 2.2: Definition Cyber-Physischer Systeme [3]

2.3 Erfassen der Daten

2.3.1 Messen

Um den aktuellen Stand der wichtigen Größen auf dem realen Gegenstand festzustellen, werden diese Größen gemessen. Messen heißt ermitteln des Wertes eines Merkmales [5]. Die Definition nach DIN 1319 lautet: „Messen ist der experimentelle Vorgang, durch den ein spezieller Wert einer physikalischen Größe als Vielfaches einer Einheit oder eines Bezugswertes ermittelt wird“ [6]. Dazu werden Messeinrichtungen verwendet. Die Struktur einer elektrischen Messeinrichtung (Messkette) wird auf dem Bild 2.3 gezeigt [7].

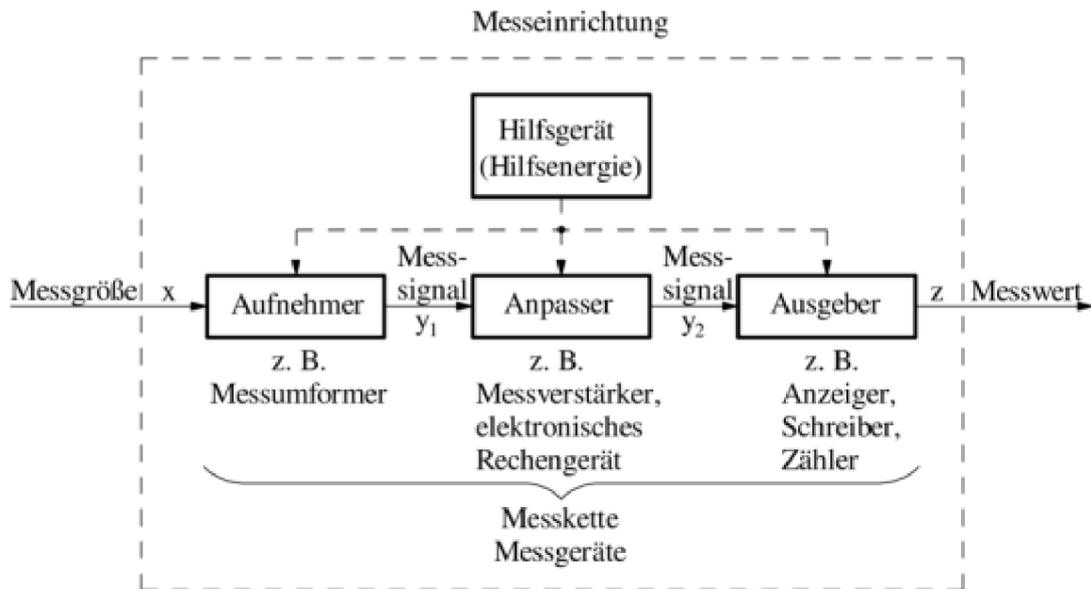


Abbildung 2.3: Struktur einer elektrischen Messeinrichtung nach VDI/VDE 2600 [7]

Die Messgröße wird durch Aufnehmer (auch Sensor genannt) auf elektrisches Messsignal umgewandelt, der im Anpasser angepasst, z. B. Verstärkt werden kann. Der Ausgeber führt den Messwert weiter. Der Messwert kann entweder schon direkt angezeigt werden, durch Mensch/Maschine Schnittstelle, z. B. digitale Anzeige, oder (auch) für weitere Verarbeitung gespeichert werden. Das Hilfsgerät versorgt die Komponenten der Messkette mit Energie, wenn es nötig ist [7].

Die Aufnehmer werden in zwei Gruppen unterteilt, passive und aktive Aufnehmer. Passive Aufnehmer verändern ihre elektrischen Eigenschaften abhängig von der nichtelektrischen Messgröße. Zum Beispiel thermoresistiver Aufnehmer – sein elektrischer Widerstand erhöht sich mit wachsender Temperatur. Diese Aufnehmer brauchen eine innere elektrische Versorgung, ihr Vorteil ist oft eine höhere Genauigkeit [8].

Die aktiven Aufnehmer verwenden für ihre Energieversorgung die Änderung der Messgröße, sie brauchen keine innere Energiequelle. Zum Beispiel thermoelektrischer Aufnehmer (auch Thermoelement): In einem Stromkreis, der aus zwei verschiedenen metallischen Leitern entsteht, wird eine elektrische Spannung erzeugt, wenn die Verbindungsstellen unterschiedliche Temperaturen haben. Die Temperatur auf einer der Verbindungsstellen muss bekannt sein (Vergleichstemperatur), die Temperatur auf der anderen Stelle ist die Messgröße. Das Thermoelement wird schematisch auf dem Bild 2.4

dargestellt. Diese Sensoren verfügen oft über geringe Genauigkeit und müssen häufig kalibriert werden [5] [7].

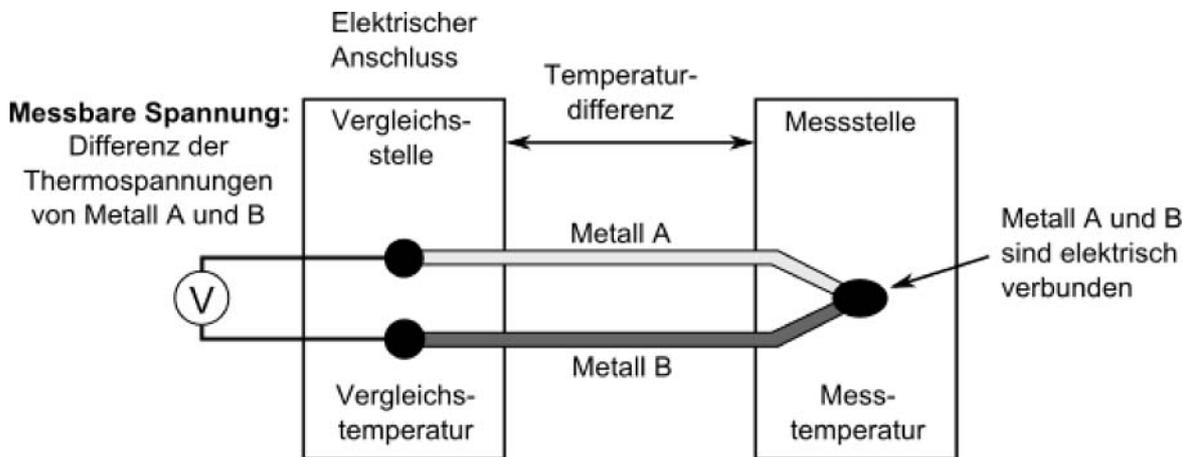


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung eines Thermoelements [9]

2.3.2 Analog-digitale Wandlung

Da bei CPS die Messwerte weiter rechnergestützt verarbeitet werden, ist es notwendig, aus dem kontinuierlichen Analogsignal, diskrete Digitalwerte zu gewinnen. Dieser Vorgang heißt analog-digitale Wandlung und wird mit einem analog-digitaler Wandler (ADW) durchgeführt. [8]

ADW besteht aus mehreren teilen. Zuerst wird der Abtast- und Halteglied angesetzt. Dabei wird gewährleistet, dass die gemessene Spannung in definierten Zeitintervallen konstant bleibt – zeitliche Diskretisierung. Abtast- und Haltekreis sind auf dem Bild 2.5 veranschaulicht. Die Eingangsspannung u_1 hat zeitlich kontinuierlichen Charakter. Wenn der Schließer r_1 geschlossen ist, wird der Kondensator auf die Spannung u_1 aufgeladen. Das ist die Abtastphase. Bei der Messphase wird der Schließer r_1 geöffnet und r_2 geschlossen. Der aufgeladene Kondensator versorgt den Halteglied mit der Spannung u_c , die der Eingangsspannung u_1 in der Zeit des Umschaltens entspricht. Der Verstärker hat hohen Eingangswiderstand, deswegen kann sich der Kondensator nicht schnell entladen. Es besteht keine galvanische Verbindung mit dem Eingangsspannung u_1 , das heißt, die Ausgangsspannung u_a bleibt durch die Messung nahezu konstant. Tatsächlich nimmt die Spannung des Kondensators u_c mit der Zeit ab, der Kondensator entlädt sich langsam, die

Spannungsabnahme ist jedoch so gering, dass sie in den weiteren Vorgängen nicht merkbar ist. Dieser Effekt wird als Droop bezeichnet [10].

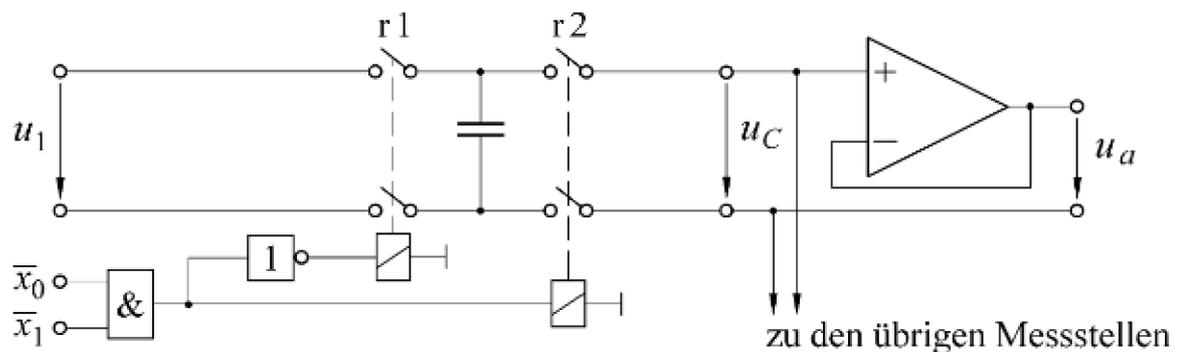


Abbildung 2.5: Abtast- und Haltekreis [10]

Der Schließer r1 ist normalerweise geschlossen, sodass auf dem Kondensator immer die aktuelle Spannung ist. Mit einer bestimmten Frequenz werden die Schließer kurz umgeschaltet, womit die Spannung u_a aktualisiert wird. Anstatt der Relais werden auch Transistoren eingesetzt [7] [10].

Die zeitdiskrete Werte sind noch nicht wertdiskret, d.h. sie haben unendlich viele Nachkommastellen. Mithilfe eines Komparators wird festgestellt, ob die jeweilige Spannungswert höher oder niedriger als die Vergleichsspannung ist. Prinzip des Komparators wird auf dem Bild 2.6 gezeigt. Wenn die Eingangsspannung u_E kleiner als die Referenzspannung U_R ist, liefert der Komparator die Ausgangsspannung $+U_B$, die logischen „1“ entspricht, andernfalls ist die Ausgangsspannung $-U_B$, entspricht logischen „0“ [7].

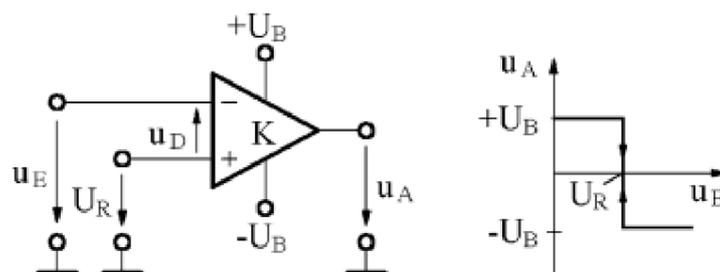


Abbildung 2.6: Schaltung und Kennlinie eines Komparators [7]

Es können mehrere Komparatoren parallel angeordnet werden. An jeden Komparator wird eine andere Vergleichsspannung zugeführt, so werden mit n Komparatoren $n+1$ Spannungsbereiche definiert [10].

Eine günstigere Möglichkeit ist mithilfe Steuerung, Speicherregister und Digital-Analog-Umsetzer (DAC) auf einem Komparator die Vergleichsspannung umzustellen. Damit wird sogenannte Sukzessive Approximation ermöglicht. DAC erzeugt nach den einzelnen Bits die Vergleichsspannung $u(Z)$, die dann mit Eingangsspannung verglichen wird, ist sie niedriger als die Vergleichsspannung, wird auf den entsprechenden Bit (z_n) „1“ geschrieben, und die nächste Vergleichsspannung wird zu dem aktuellen addiert, andernfalls wird „0“ geschrieben, und die nächste Vergleichsspannung wird subtrahiert. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis alle Bitstellen beschrieben werden. Dieser Vorgang wird auf dem Beispiel eines 4-Bit-ADWs auf dem Bild 2.7 veranschaulicht [7].

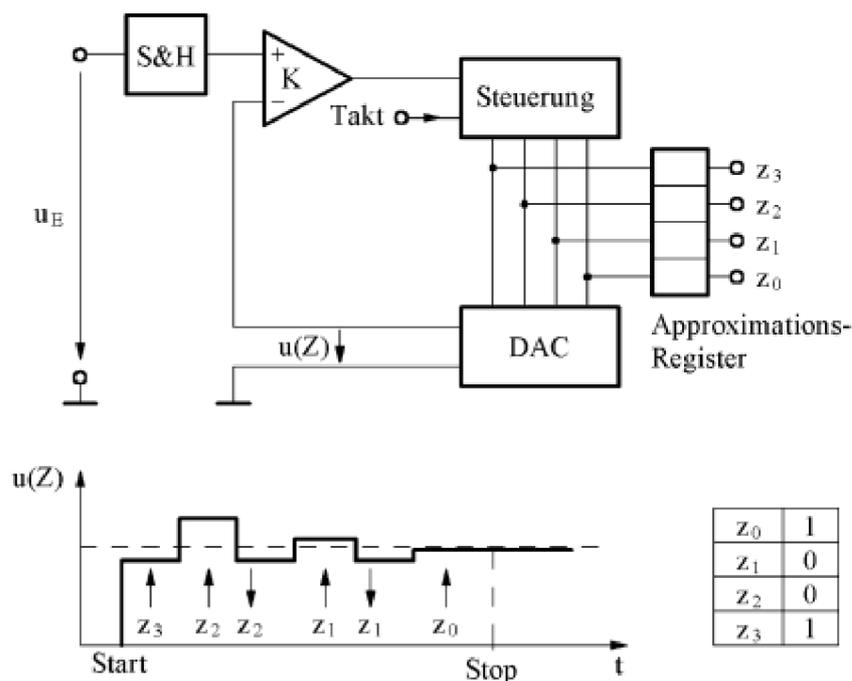


Abbildung 2.7: Prinzip der sukzessiven Approximation [7]

2.3.3 Datenbus

Die digitalisierten Messwerte werden an die Verarbeitungseinheit geführt. Die dazu verwendete Schnittstelle heißt Datenbus. Die Vertreter sind zum Beispiel UART, SPI oder I²C. [2]

In diesem Projekt wird die SPI-Schnittstelle verwendet. Die SPI-Schnittstelle ist ein synchroner serieller Datenbus und funktioniert nach dem Master-Slave-Prinzip. Die SPI besteht aus zwei Datenleitungen, einer Taktleitung und einer Selektierungsleitung pro Slaven. Die Taktleitung (CLK) bestimmt den Takt des Datenaustauschs. Die Datenleitungen MOSI (Master Output Slave Input) und MISO (Master Input Slave Output) übertragen bei jedem Taktimpuls ein Bit. Die Selektierungsleitung (CS) dient zu Auswahl des Slaves, mit dem der Master kommuniziert [2].

Die MOSI, MISO und CLK-Leitungen können von mehreren Slaves verwendet werden. Jeder Slave hat seine eigene CS-Leitung. Bei dem Datenaustausch kommt zuerst von dem Master ein Signal auf der ausgewählten CS-Leitung, womit der bestimmte Slave ausgewählt wird. Nach einer kurzen Pause, typisch im Bereich von Nanosekunden, sendet der Master Pulse auf der CLK-Leitung und gleichzeitig Informationsbits auf der MOSI-Leitung. Da der Slave nichts von selbst senden kann, wird bei jeder SPI-Übertragung zuerst der MOSI-Leitung verwendet. Die zuerst gesendeten Bits bestimmen, ob die Register von dem Slaven gelesen oder beschrieben werden. Bei beiden in diesem Projekt verwendeten Sensoren beträgt dieser Befehl 8 Bits, es wird als Commandbyte bezeichnet. Wenn der Commandbyte die Beschreibung des ausgewählten Registers initialisiert, kommen danach durch die MOSI-Leitung die Daten, die in das ausgewählte Register geschrieben werden. Wenn es sich um eine Lesung aus dem ausgewählten Register handelt, werden die Daten dann auf der MISO-Leitung übertragen. Wichtig dabei ist, dass nie beide MOSI- und MISO-Leitungen gleichzeitig verwendet werden.

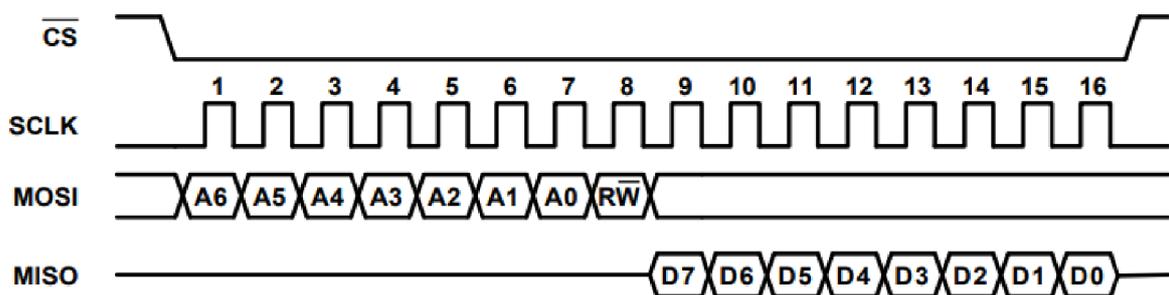


Abbildung 2.8: SPI-Lesen eines Registers [11]

Eine weitere in diesem Projekt verwendete Schnittstelle ist der asynchrone Datenbus UART. In der einfachsten Variante werden zwei Geräte mit zwei Leitungen verbunden, so

dass immer die Sendeleitung (TX) eines Gliedes mit dem Empfangsleitung (RX) von dem zweiten Glied in verbunden wird.

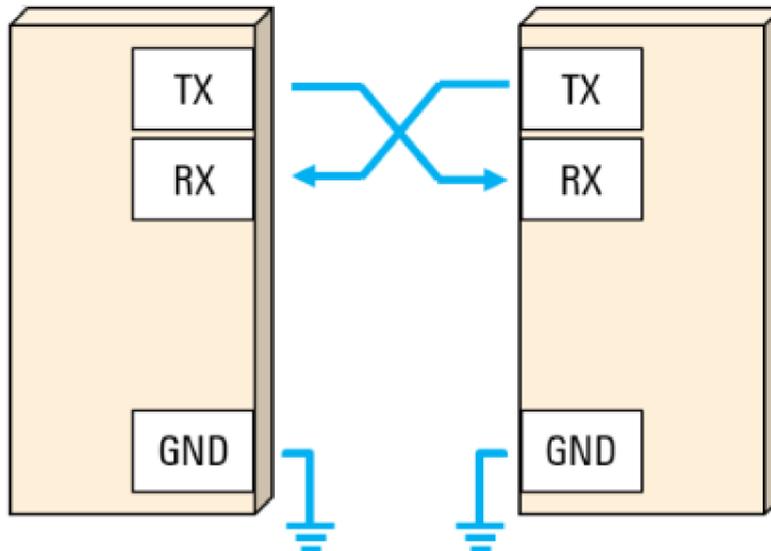


Abbildung 2.9: UART Einschaltung [12]

Wenn keine Bits gesendet werden, befinden sich beide Leitungen im High Zustand. Die Übertragung kann von beiden Gliedern gestartet werden. Am Anfang jeder Übertragung wird ein Start Bit gesendet – ein Low Bit, der die kommende Datenübertragung signalisiert. Danach werden die Datenbits mit vorher bestimmter Frequenz gesendet. Anschließend kommt der Stop Bit – ein High Bit, nach dem die Leitung im High Zustand bleibt. Optional kann vor dem Stop Bit noch sogenannter Paritätsbit kommen, der für die Kontrolle dient. Folgendes Bild zeigt eine Übertragung von einem 7 Bit Datensatz mit einem Paritätsbit [12].

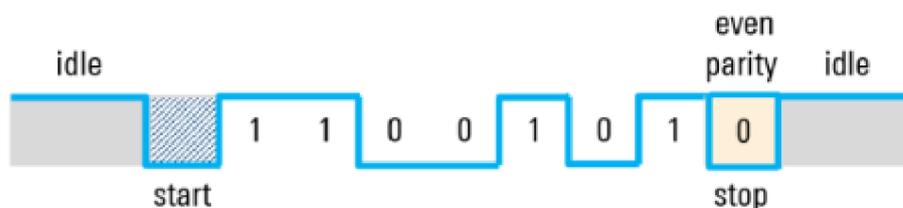


Abbildung 2.10: UART-Datensatz [12]

2.4 Marktverfügbare sensorische Werkzeughalter

2.4.1 Pro-micron – Spike

Firma Pro-micron bietet ganze Reihe Lösungen für intelligente Werkzeug- und Prozessüberwachung bei Zerspanprozessen an.

Die Grundvariante Spike_assistline verwendet die Messeinheit Spike_assist, die Torsionsmoment und Biegemomente um Achsen x und y misst. Als Benutzerschnittstelle dient Tablet Spike_assist_cockpit und Handy-Applikation Spike_app (nur für iOS). Dort greift man zu den aktuellen Messergebnissen, Report über der letzten 90 Sekunden und Alarmmeldungen zu. Spike_assistline ist eine sogenannte Plug and Play Lösung, sie ist in 30 Sekunden nach dem Einspannen der Messeinheit einsatzbereit [13] [14].

Die Variante Spike_expertline besteht aus der Messeinheit Spike_mobile, die Axialkraft, Torsionsmoment, Biegemomente um Achsen x und y und Temperatur messen kann. Der Empfänger Spike-connect-expertline wird mit PC oder Laptop mit Software Pro-micron tool control center verbunden, wo Real-Time Beobachtung und offline Datenanalyse erfolgt. Die Plug and Play Lösung ist in 2 Minuten nach dem Einspannen einsatzbereit [13] [15].

Spike_easyline verwendet entweder die Messeinheit Spike_mobile oder Spike_inspindel, eine Spindelintegrierte Sensorlösung, die nur bei Maschinen Grob und DMG Mori erhältlich ist. Sie misst Axialkraft, Biegemomente um Achsen x und y, Temperatur und wird von der Maschine mit Energie versorgt. Die Schnittstelle zur Beobachtung und Verarbeitung der Daten ist in der Maschinensteuerung integriert und von dem Bedienpanel zugreifbar. Verschiedene Funktionen sind mit M-Befehle aufrufbar. Spike_easyline ist für die automatisierte Seriengertigung geeignet [13] [16].

Spike_polar ist die von Pro-micron patentierte Technologie, welche den aktuellen Ist-Stand des Werkzeugs anhand der vorhandenen Messwerte nachbildet. Verschleiß und Unwucht können somit rechtzeitig entdeckt werden [17].

2.4.2 Schunk – iTENDO2

Firma Schunk bietet sensorische Werkzeughalter iTENDO2 mit entsprechenden Bedienerschnittstellen in drei Paketen. Die Messeinheit ist bei allen drei Paketen gleich, sie misst die Schwingungen im Prozess [18] [19].

Variante iTENDO2 pad besteht aus dem Werkzeughalter iTENDO2 und eigenem Tablet mit Software für Prozessüberwachung und -analyse. Es handelt sich um eine Plug and Play Lösung. Die empfangenen Daten werden auf dem Tablet zeitaktuell gezeigt, es ist auch möglich die Verläufe aufzuzeichnen und später zuzugreifen, oder Grenzwerte vordefinierten, um sie mit den aktuell empfangenen Werten zu vergleichen [18] [19].

Variante iTENDO2 easy connect ist um ein Wireles Receiver erweitert, der die analogen Messwerte auf ein Schaltschrankmodul weiterführt. Die Messwerte können digitalisiert und mit einem Rechner weiterverarbeitet werden [19].

Variante iTENDO2 pro sollte die Messeinheit iTENDO2 mit der Maschinensteuerung verbinden. Die Daten sollten drahtlos auf Wireles Receiver und dann auf Cloud weitergeführt werden. Diese Variante ist aktuell noch in der Phase der Entwicklung [19].

Die aktuelle iTENDO2 Applikation arbeitet mit den Schwingungen, die auf den IFT-Wert umgerechnet werden. IFT-Wert stellt die Intensität der Schwingung dar und wurde speziell für iTENDO definiert [20].

2.4.3 Kistler – Rotierende Dynamometer (RCD)

Firma Kistler bietet ihre Rotierende Dynamometer für Zerspankraftmessungen an rotierenden Werkzeugen. Vier Komponenten werden gemessen: Kräfte in Achsen x, y und z und Moment um Achse z [21].

Die Konstruktion ist von den vorher genannten Lösungen unterschiedlich. Der Rotor wird in Maschinenspindel angespannt. Er verfügt über Werkzeugaufnahme, Spindelaufnahme, piezoelektrischen Sensor, vier Ladungsverstärker und digitale Übertragungselektronik. Je nachdem, wie das Werkzeug in der Werkzeugaufnahme eingespannt wird, werden die gemessenen Kräfte zu den Komponenten der Zerspannungskraft zugeordnet [22] [23].

In Abstand von wenigen Millimetern von dem Rotor wird der Stator befestigt. Der Stator versorgt den Rotor mit Energie durch Induktion. Die am Rotor gemessenen Werte sind an den Stator telemetrisch überführt. Aus diesen Gründen soll der Stator von der Halterung elektrisch isoliert werden. Die Halterung des Stators und die daraus führende Kabel limitieren den Arbeitsraum [22] [23].

Von dem Stator führt ein Anschlusskabel die Messwerte an das Signal Conditioner, der sich außerhalb der Maschine befindet. Der Signal Conditioner gilt für Energieversorgung und

Signalübertragung. Weiter können die Signale an einen Computer geführt werden und im Software DynoWare von Kistler veranschaulicht und weiterverarbeitet werden [22] [23].

Kistler bietet zwei Ausführungen von diesem Dynamometer. RCD Typ 9170A ist die Kompakte Version für Feinbearbeitung mit Drehzahlen bis zu 20 000 U/min. RCD Typ 9171A ist für mittlere und schwere Zerspannung geeignet, Kräfte bis zu 20 kN in Richtungen x und y und bis zu 30 kN in Richtung z sind damit messbar. Die maximale Drehzahl ist 12 000 U/min [22] [23].

Die Lösungen von Kistler sind für Massenfertigung ungeeignet, deren Ansatzbereich ist Forschung und Entwicklung, z. B. bei Optimierung der neuen Werkzeuge.

2.4.4 Projekt Sense4Tool

In Jahren 2015 - 2018 hat sich das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie aus Aachen zusammen mit fünf Industriepartner mit Entwicklung eines sensorischen Werkzeughalters beschäftigt. Die Messdaten sollten drahtlos an die Bearbeitungsmaschine gesendet werden, dort weiterverarbeitet werden, um dann den Prozess seitens der Maschinensteuerung zu regeln. Die Energieversorgung des Werkzeughalters sollte drahtlos über die Induktion erfolgen. Die zu messenden Größen waren Prozesskräfte, Schwingungen, Drehmoment und Temperatur [24].

Weitere Anforderungen waren automatisierte Montage und Kostengünstigkeit, damit diese Technologie schnell und günstig in der Massenfertigung eingesetzt werden könnte. Gleichzeitig waren auch Montagestrategien und -einrichtungen zu entwickeln. Ziel war ein autonomer Cyberphysischer System, der Real-time auf die aktuellen Bedingungen beim Zerspanen reagiert [24].

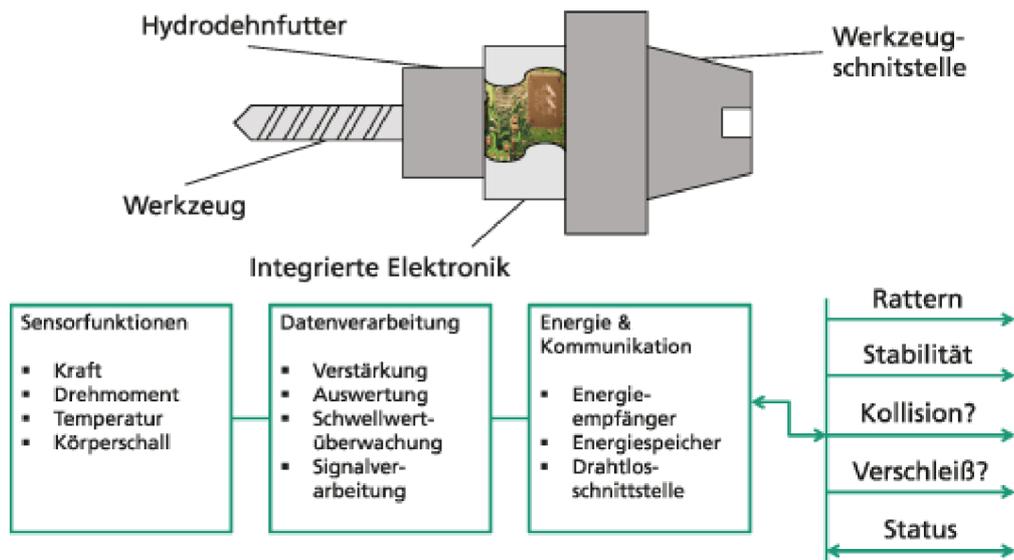


Abbildung 2.11: Funktionsprinzip des multisensorischen Werkzeughalters [24]

2.4.5 Vergleich der markverfügbaren sensorischen Werkzeughalter

Tabelle 2.1: Vergleich der marktverfügbaren Lösungen [15] [16] [25]

	Spike_assist	Spike_mobile	iTENDO2
Messgrößen	B_x, B_y, T_M [%]	F_z [N] B_x, B_y, T_M [Nm] Temperatur [°C]	Schwingung in Achsen x, y, z (Amplitude, Frequenz)
Max. Drehzahl	18 000 U/min	18 000 U/min	30 000 U/min
Geeignet für Kühlschmiermittel	Innen / Außen	Innen / Außen	Innen 80 bar Außen 20 bar
Reichweite der Funkverbindung	3 m	5 m	2 m
Akkulaufzeit Betrieb	8 Stunden	16 Stunden	8 Stunden
Akkulaufzeit Standby	12 Tage	25 Tage	10 Tage

Strany 15 – 60 nejsou na základě směrnice TU Chemnitz číslo 21/2008 „Prüfungsordnung für den konsekutiven deutsch-tschechischen Studiengang Produktionssysteme mit dem Doppelabschluss (double degree) Master of Science (M. Sc.) und Inženýr (Ing.) an der Technischen Universität Chemnitz vom 11. Juli 2008“ o závěrečných pracích zpracovávaných v režimu utajení veřejné.

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem sensorischen Werkzeughalter für Temperaturmessungen und dynamische Messungen. In der Recherche wurden die marktverfügbaren Lösungen für industriellen Einsatz mit Fokus auf die Systeme für dynamische Messungen beschrieben und verglichen. Es hat sich gezeigt, dass es in diesem Bereich schon mehrere Produkte gibt, jedoch gibt es auf dem Markt derzeit keinen Werkzeughalter, der gleichzeitig die Temperatur an mehreren Stellen über die Länge des Werkzeughalters und die Kraft oder die Beschleunigungen misst, und diese Messdaten drahtlos zu einem Rechner überträgt.

Weiterhin befasst sich diese Bachelorarbeit mit der Ist-Stand Analyse eines sensorischen Werkzeughalters, der aktuell an der TU Chemnitz vorhanden ist. Dieser Werkzeughalter führt Temperaturmessungen mit drei Sensoren durch, und sendet die Messdaten drahtlos zu einer Empfangsstation, die mit einem Rechner verbunden ist. Der Zweck der Ist-Stand Analyse ist, die Optimierungs- und Erweiterungsmöglichkeiten des bestehenden Messsystems zu entdecken.

Die Haupterweiterung ist die Implementation des Beschleunigungssensors für die dynamischen Messungen mit Messfrequenz von mindestens 1 kHz. Um das zu ermöglichen, musste die Hauptkomponente des Messsystems, der Mikroprozessor, gewechselt werden. Deshalb mussten auch die Programmaufbau und die Beschaltung neu entwickelt werden. Durch die Übernahme der Funktion von zwei Bestandteilen des ursprünglichen Messsystems mit dem neuen Mikroprozessor und dem Beschleunigungssensor konnte das System vereinfacht werden. Dabei wurde auch der bisherige Funkstandard mit dem moderneren, kompatibleren Bluetooth Low Energy ersetzt. Wegen dem höheren erwarteten Stromverbrauch des neuen Messsystems werden der Akkumulator und die Solarzellen für die Aufladung mit einer wechselbaren Batterie ersetzt.

Die Konstruktion wurde mit Fokus auf die Implementierung der Komponenten in den Körper des Werkzeughalters entwickelt, damit die sichere Funktion gewährleistet wird, und die Außenmaße kompakter werden. Es wurden zwei Konstruktionsvarianten vorgelegt und die günstigere ausgewählt. Die endgültige Fertigung des sensorischen Werkzeughalters wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

Die Empfangsstation konnte deutlich vereinfacht werden. Anstatt eines selbstgefertigten Systems wird das Kaufteil XXXXXXXXXX verwendet. Die Kommunikation mit dem Rechner und die Ausschreibung der Messwerte erfolgt auf die gleiche Art und Weise.

Die Funktionsfähigkeit des Messsystems wurde mit Versuchen getestet. Die Schlussfolgerung ist, dass das Messsystem fähig ist, Schwingungen mit Frequenz bis 200 Hz mit Abweichung unter 2 % und die Temperatur mit Abweichung von 0,1 °C zu messen, und diese Messdaten zum Rechner zu übertragen.

8 Ausblick

Das entwickelte System wird in den nächsten Schritten gefertigt und in den Werkzeughalter integriert. Danach werden Versuche an der Fräsmaschine durchgeführt, um das Verhalten des Messsystems im Betrieb zu testen, was Stromverbrauch, Betriebszeit, Reichweite und Wiederholgenauigkeit betrifft.

Mit dem funktionierendem Messsystem kann das thermische und dynamische Verhalten des Werkzeughalters, während der Fräsbearbeitung, beobachtet werden. Bereiche mit ungünstigen dynamischen Eigenschaften können entdeckt und vermieden werden. Weiterhin bleibt die Möglichkeit der Kompensation der thermischen Ausdehnung des Werkzeugs mittels Maschinensteuerung.

Als weitere Entwicklung des Messsystems ist geplant, den [REDACTED] als Empfangsstation einzusetzen, weil er kostengünstiger und kompakter als [REDACTED] ist. Um die Firmware auf dem Mikroprozessor der Sendeeinheit zu aktualisieren oder an verschiedene Bedingungen bei Versuchen anzupassen ist im Plan die Möglichkeiten des Upgrades per Bluetooth Low Energy zu recherchieren und das Messsystem damit zu erweitern.

9 Shrnutí bakalářské práce v češtině

In diesem Kapitel wird die Bachelorarbeit in tschechischer Sprache kurz zusammengefasst. Alle hier vorkommenden Informationen sind auch in dem deutschgeschriebenen Hauptteil erwähnt.

V této kapitole je bakalářské práce stručně shrnuta v češtině. Podrobné informace včetně tabulek a obrázků jsou uvedeny v německy psané části.

9.1 Úvod

V rámci této bakalářské práce je zpracováno téma měřicího systému integrovaného v nástrojovém držáku. Rostoucí nároky na přesnost výroby, cenové náklady na chlazení nástroje a další s chlazením spojené nevýhody (např. zátěž pro životní prostředí) jsou motivací k výzkumu možností obrábění bez použití chladicí kapaliny. Jednou z možností je kompenzace tepelného roztažení frézy v ose z ze strany řízení frézky, tedy úpravou G-kódu. Pro tvorbu vhodného programu je potřeba znát časový průběh teplot na nástroji a nástrojovém držáku během obrábění, aby mohlo být následně vypočítáno tepelné roztažení nástroje a držáku v daný moment [2].

Dalším fyzikálním jevem, který má zásadní vliv na kvalitu obrobku, jsou vibrace. Obrábění při nevýhodných frekvencích může vést nejen ke zhoršení kvality obrobku, ale i k poškození nástroje, v extrémních případech i obráběcího stroje. Implementace senzoru zrychlení do nástrojového držáku umožní měření vibrací při různých parametrech procesu obrábění, aby bylo následně možné parametry upravit a dosáhnout zvýšení kvality výroby [3].

9.2 Současně dostupná řešení

Před samotným vývojem byla provedena rešerše současně na trhu dostupných možností, zaměřená především na systémy pro měření dynamických vlastností během frézování. V této oblasti nabízí svá řešení firmy Pro-micron a Schunk.

Firma Pro-micron nabízí širokou škálu řešení pro sledování procesu obrábění včetně softwaru. V současnosti používá pro svá řešení nástrojové držáky Spike_assist a

Spike_mobile. Spike_assist je dostupnější verze, která měří pouze ohybové a torzní momenty na nástroji, tyto parametry jsou následně zobrazeny na výrobcem dodaném tabletu, nebo v mobilní aplikaci. Pokročilejší řešení Spike_mobile měří kromě ohybových a torzních momentů i sílu působící v ose nástroje a teplotu, bohužel však pouze na jednom místě. V závislosti na zvoleném řešení komunikuje s aplikací v počítači nebo přímo s řízením stroje. Software je z naměřených dat schopen určit opotřebení nástroje a varovat včas varovat obsluhu [13] [14] [15] [16] [17].

Firma Schunk má v současné nabídce pouze jeden sensorický nástrojový držák, iTENDO2. Tento systém je schopen měřit amplitudy a frekvence vibrací v osách x, y a z. V závislosti na variantě komunikuje s výrobcem dodaným tabletem nebo s počítačovou aplikací. V budoucnu plánuje firma Schunk uvedení varianty propojené s řízením stroje a sdílením dat na Cloud [18] [19] [20] [25].

9.3 Analýza dosavadního měřicího systému

V současnosti je na TU Chemnitz provozován systém měřící teplotu během obrábění skládající se z přijímače a vysílače aplikovaného na nástrojový držák.

9.3.1 Vysílač

Hlavní komponenty

- Mikroprocesor [REDACTED]
- Bezdrátový modul [REDACTED]
- Teplotní sensor [REDACTED]
- RGB LED
- 33 mAh lithiový akumulátor
- Regulátor napětí [REDACTED]
- Solární panely – 2 V, 20 mA
- Přepínač [REDACTED]

Funkce

- Měření teploty na třech místech s frekvencí 1 Hz
- Měření napětí akumulátoru
- Spuštění po zaznamenání pohybu
- Bezdrátový přenos dat k přijímači
- Vypnutí po 30 neúspěšných pokusech o spojení s přijímačem
- Zobrazení aktuálního stavu systému pomocí RGB LED
- Akumulátor nabíjen ze solárních panelů

Hlavní funkcí vysílače je měření teploty pomocí tří sensorů [REDACTED], rozmístěných po délce držáku, s přesností 0,25 °C. Data ze sensorů jsou vedena k hlavní komponentě systému, procesoru [REDACTED], a dále k bezdrátovému modulu [REDACTED], z něhož jsou ve vteřinových intervalech odesílány v 2,4 GHz ISM radiovém pásmu k přijímači. Komunikace mezi komponenty vysílače probíhá pomocí sběrnice SPI. Systém je napájen z baterie, kterou nabíjí solární panely. Napětí akumulátoru je měřeno pomocí analogového vstupu procesoru a A/D převodníku, data jsou odesílána společně s naměřenou teplotou k přijímači. Po přijetí dat přijímačem dostává vysílač zpětnou vazbu. V případě vypnutí přijímače, nebo vzdálení z dosahu vysílače, se vysílač po 30 neúspěšných přenosech vypíná. Informace o počtu neúspěšných přenosů je posílána společně s daty o teplotě a napětí akumulátoru. Zda byl aktuální přenos úspěšný ukazuje i barva RGB LED, umístěné na vysílači. K zapnutí vysílače slouží jednoduché vibrační čidlo, které vyšle signál ke spuštění systému po zaznamenání pohybu. Opětovné spuštění systému zařizuje přepínač firmy [REDACTED] [2].

Vzhledem k nízké frekvenci měření a bezdrátových vysílání jsou komponenty vysílače za účelem úspory elektrické energie většinu sekundového cyklu v úsporných režimech. Celková kombinovaná spotřeba přijímače je 222 μ A, z čehož plyne maximální provozní doba bez nabití 148 h. Vzhledem k podmínkám při obrábění, takřka vždy je přítomno světlo, tzn. akumulátor se může nabíjet, je systém dostatečně bezpečný vůči poklesu napětí akumulátoru pod hodnotu 2 V a z toho plynoucímu poškození akumulátoru [2].

Elektronické komponenty systému jsou na deskách plošných spojů nalepeny na vnější plochu hydraulického upínače HSK A63 a zality umělou pryskyřicí, aby byly chráněny vlivům okolí během obrábění. Pryskyřice je transparentní, tzn. umožňuje průnik světla k solárním panelům [2].

9.3.2 Přijímač

Hlavní komponenty

- Mikroprocesor [REDACTED]
- Bezdrátový modul [REDACTED]
- OLED Displej

Funkce

- Příjem dat od vysílače
- Přepočet dat na reálně naměřené hodnoty
- Zobrazení aktuálních hodnot na displeji
- Přenos hodnot do počítače pomocí sériového rozhraní

Hlavní úloha přijímače je přijetí a zpracování dat z vysílače, jejich zobrazení na OLED displeji v reálném čase a přesun do počítače. K příjmu dat je nasazen stejný bezdrátový modul, jako na vysílači, pro zpracování dat a řízení systému mikroprocesor [REDACTED]. Komunikace mezi jednotlivými komponenty přijímače probíhá přes SPI sběrnici [2].

Přijímač se nachází mimo prostor obráběcího stroje, je spojen USB kabelem s počítačem, ze kterého je zároveň napájen. Jelikož u přijímače nejsou definovány požadavky na rozměry, byl procesor v rámci vývojové desky [REDACTED] spojen s ostatními součástmi systému pomocí nepájivého kontaktního pole, které bylo umístěno do umělohmotné schránky [2].

9.3.3 Možnosti rozšíření a optimalizace

Systém je možné rozšířit o sensor, měřící s dostatečnou frekvencí (150 Hz – 11 kHz [26]) zrychlení za účelem měření vibrací během obrábění. Ten zároveň nahradí vibrační sensor použitý ke spuštění vysílače. Elektronické komponenty mohou být alespoň částečně integrovány do těla nástrojového držáku. Akumulátor je možné nahradit vyměnitelnou baterií a tím eliminovat nutnost solárních panelů. Jak u vysílače, tak u přijímače je možné použít procesory s funkcí bezdrátové komunikace a tím eliminovat nutnost bezdrátových modulů.

9.4 Cíle práce

Cílem práce je návrh měřicího systému integrovaného v nástrojovém držáku splňujícího následující požadavky:

- Měření teploty na třech místech s frekvencí 1 Hz
- Měření zrychlení v osách x, y a z s Frekvencí minimálně 1 kHz
- Integrace komponent do těla nástrojového držáku
- Bezdrátový přenos naměřených hodnot k přijímači
- Napájení pomocí vyměnitelné baterie
- Zobrazení stavu baterie pomocí LED

9.5 Návrh nového měřicího systému

9.5.1 Vysílač

Hlavní komponenty

- [REDACTED]
- Teplotní sensor [REDACTED]
- Sensor zrychlení [REDACTED]
- Regulátor napětí [REDACTED]
- RGB LED
- 1,2 Ah lithiová baterie
-

Funkce

- Měření teploty na třech místech s frekvencí 1 Hz
- Měření napětí baterie
- Měření zrychlení v osách x, y, z s frekvencí 1,35 kHz
- Bezdrátový přenos dat k přijímači
- Spuštění po zaznamenání pohybu
- Vypnutí po jedné minutě bez úspěšného spojení s přijímačem
- Zobrazení aktuálního stavu baterie pomocí RGB LED

Vzhledem k radikálnímu zvýšení frekvence měření je třeba využít výkonnější mikroprocesor. K tomuto účelu byl použit procesor [REDACTED]. Tento procesor je použit v rámci modulu [REDACTED]. Pro měření zrychlení byl integrován sensor [REDACTED], který je schopen měřit zrychlení v rozsahu ± 400 g v osách x, y a z. Tři teplotní sensory byly ponechány z předchozího systému. Komunikace mezi procesorem a sensory probíhá pomocí sběrnice SPI.

Zrychlení jsou měřena s frekvencí 1,35 kHz, naměřená data jsou odesílána v intervalech 7,5 ms. V rámci jednoho spojení je odesláno 10 hodnot zrychlení pro každou osu a poslední naměřené hodnoty na třech tepelných senzorech. Informace o stavu baterie a počtu neúspěšných pokusů o spojení již není posílána přijímači z důvodu úspory času. Aby byla zachována frekvence měření teploty 1 Hz, jsou data z teplotních sensorů každou sekundu aktualizována. Pokud po dobu jedné minuty nedojde k úspěšnému spojení s přijímačem, systém se vypne. O vypnutí a opětovné zapnutí se stará modul [REDACTED]. Sensor zrychlení zůstává aktivní i při vypnutém systému, pouze je přepnut do úspornějšího režimu, kde detekuje pohyb. Jakmile dojde k zaznamenání pohybu, vyšle sensor signál ke spuštění systému a automaticky se přepne do běžného režimu.

Baterie [REDACTED] s kompaktním rozměrem $\frac{1}{2}$ AA a lineárním průběhem napětí poskytuje systému energii. Napětí je regulováno na 3,3 V. Mikroprocesor měří stav baterie pomocí analogového pinu a A/D převodníku, aktuální stav baterie je zobrazen pomocí RGB LED.

U konstrukce bylo dbáno na pokud možno přesné umístění sensoru zrychlení a baterie na osu rotace nástroje za účelem nízkého odstředivého zrychlení, dále na snadný přístup k baterii a umístění elektronických komponent pokud možno daleko od TCP. Pro konstrukci byl zvolen držák HSK63-A s kleštinovým systémem upínání. Pro baterii a sensor zrychlení byly v těle nástroje navrženy díry, ve kterých budou tyto komponenty ukotveny pomocí šroubu. Pro baterii byl navržen držák, vyrobený pomocí 3D tisku z materiálu ASA. Pro ostatní komponenty budou na povrchu držáku vyfrézovány drážky, do kterých budou následně umístěny. Z důvodu ochrany před vnějšími vlivy budou tyto komponenty následně zalaty tenkou vrstvou umělé pryskyřice.

9.5.2 Příjímač

Funkce

- Příjem dat od vysílače
- Přepočet dat na reálné hodnoty
- Přenos dat do počítače pomocí sběrnice UART

Přijímač je tvořen jediným komponentem, vývojovou deskou [REDACTED], která přijímá od vysílače data pomocí BLE, tyto dále zpracovává a posílá do počítače. Napájení a přenos dat probíhá pomocí USB kabelu připojeného k počítači.

9.6 Důkaz funkce nově vyvinutého systému

Funkčnost systému byla ověřena pomocí pokusů za použití elektrodynamického budiče kmitů. Byly provedeny celkem dva pokusy. Pokus probíhal tak, že na generátoru funkcí byla nastavena požadovaná frekvence, signál byl dále zesílen za pomoci zesilovače, následně jím byl uveden do pohybu elektrodynamický budič kmitů. Na ten byl přiložen sensor zrychlení tak, že osa z ležela rovnoběžně se směrem šíření vibrací. Přijímač se přitom nacházel ve vzdálenosti cca. 3 metrů, oddělen tenkým plexisklem. Následně bylo provedeno srovnávací měření pomocí sensoru zrychlení [REDACTED].

Na generátoru byl nastavena funkce sinus s frekvencí 100 Hz a 200 Hz. U obou pokusů se podařilo zpětně určit frekvenci vibrací s odchylkou do 2 % oproti referenčnímu měření. Ke zpětnému určení frekvence na základě naměřených zrychlení byl použit program MatLab.

Naměřené teploty na senzorech byly porovnány s hodnotou teploty na konvenčním rtuťového teploměru. Maximální odchylka byla 0,1 °C.

9.7 Závěr

V rámci této bakalářské práce byly popsány možnosti, které nabízí trh v oblasti sensorických nástrojových držáků. Byl také zevrubně popsán systém pro měření teploty držáku během obrábění, aktuálně využívaný na TU Chemnitz, včetně návrhů na rozšíření a optimalizaci. Na základě toho byl navržen nový kyberfyzikální systém pro měření teplot a zrychlení při obrábění, implementovaný do nástrojového držáku. Při pokusech bylo dokázáno, že systém funguje, přítomné odchylky jsou v rámci plánovaného využití únosné.

V dalších krocích bude na základě navržené konstrukce vyroben nástrojový držák, do něhož bude systém implementován. Budou provedeny další pokusy, při kterých budou zkoumány vlastnosti, přesnost a spolehlivost systému. Ověřený systém bude nasazen za účelem kompenzací tepelné roztažnosti nástroje a upravení parametrů obrábění. V budoucnu je plánováno systém rozšířit o možnost bezdrátové aktualizace programu na vysílači.

10 Literaturverzeichnis

- [1] R. Neugebauer, Werkzeugmaschinen: Aufbau. Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen, Chemnitz: Springer Vieweg, 2012.
- [2] M. Fuchs, „Korrektur thermischer Werkzeugverformung beim Fräsen,“ Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2020.
- [3] R. Neugebauer, Digitalisierung: Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft, München: Springer Vieweg, 2018.
- [4] A. V. P und H. T., Industrie 4.0: Wie cyber-physische Systeme die Arbeitswelt verändern, Annweiler: Springer Gabler, 2017.
- [5] S. Gröger, Vorlesungsunterlagen Grundlagen der Messtechnik, Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse (IWP), Chemnitz: Technische Universität Chemnitz, 2019.
- [6] *DIN 1319-1 Ausgabe:1995-01.*
- [7] R. Lerch, Elektrische Messtechnik: Analoge, digitale und computergestützte Verfahren, Erlangen: Springer Vieweg, 2016.
- [8] R. Parthier, Messtechnik: Vom SI-Einheiten über Bewertung von Messergebnissen zu Anwendung der elektrischen Messtechnik, Mittweida: Springer Vieweg, 2020.
- [9] A. Hüchelhein, „Schematische Darstellung eines Thermoelements,“ [Online]. Available: <https://commons.wikipedia.org/wiki/File:Thermoschema.svg>. [Zugriff am 10. 2. 2022].
- [10] E. Schrüfer, Reindl, L., Zagar, B., Elektrische Messtechnik: Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen, München: Carl Hansen Verlag München, 2018.
- [11] 
- [12] Rohde&Schwarz, „UART verstehen,“ [Online]. Available: https://www.rohde-schwarz.com/de/produkte/messtechnik/oszilloskope/educational-content/uart-verstehen_254524.html#gallery-6. [Zugriff am 12. 12. 2022].
- [13] Pro-Micron, „Patentierete Zerspannkraftmessung,“ 2021. [Online]. Available: <https://www.pro-micron.de/wp-content/uploads/2021/12/spike%C2%AE-Technologie1.2-Vers.-2.pdf>. [Zugriff am 9. 3. 2022].
- [14] Pro-Micron, „Assistenzsystem, Your Process Buddy,“ 2021. [Online]. Available: https://www.pro-micron.de/wp-content/uploads/2021/12/spike%C2%AE_assistline-Vers.2.pdf. [Zugriff am 9. 3. 2022].
- [15] Pro-Micron, „Diagnosesystem für den Prozessexperten,“ 2021. [Online]. Available: https://www.pro-micron.de/wp-content/uploads/2021/12/spike%C2%AE_expertline-Vers.-2.pdf. [Zugriff am 9. 3. 2022].
- [16] Pro-Micron, „Überwachung in der Serienfertigung,“ 2021. [Online]. Available: https://www.pro-micron.de/wp-content/uploads/2021/12/spike%C2%AE_easyinline-Vers.2.pdf. [Zugriff am 9. 3. 2022].
- [17] Pro-Micron, „Spike,“ [Online]. Available: <https://www.pro-micron.de/spike/>. [Zugriff am 10. 3. 2022].
- [18] Schunk, „ITENDO2,“ [Online]. Available: https://schunk.com/de_de/startseite/itendo2/#c296959. [Zugriff am 10. 3. 2022].
- [19] Schunk, „Werkzeugeinsatz mit Fingergefühl, ITENDO2,“ 2021. [Online]. Available: <https://schunk.com/fileadmin/pim/docs/IM0042473.PDF>. [Zugriff am 10. 3. 2022].

- [20] Schunk, „Prozesstransparenz inklusive,“ 2019. [Online]. Available: https://schunk.com/ch_de/aktuell/highlights/markt-technik/article/30263-prozesstransparenz-inklusive/. [Zugriff am 13. 3. 2022].
- [21] Kistler, „Rotierende Dynamometer (RCD) messer Zerspankräfte direkt an der Schneide,“ [Online]. Available: <https://www.kistler.com/de/loesungen/messtechnik-testloesungen-fuer-die-forschung-und-entwicklung/dynamometer-fuer-die-schnittkraftmessung/rcd-rotierende-dynamometer-fuer-die-zerspankraftmessung/> . [Zugriff am 13. 3. 2022].
- [22] Kistler, „Datenblatt, Typ 9170A...,“ [Online]. Available: <https://www.kistler.com/files/document/000-995d.pdf?callee=frontend>. [Zugriff am 13. 3. 2022].
- [23] Kistler, „Datenblatt Typ 9171A...,“ [Online]. Available: <https://www.kistler.com/files/document/003-155d.pdf?callee=frontend>. [Zugriff am 13. 3. 2022].
- [24] Fraunhofer IPT, „Funktionsprinzip des multisensorischen Werkzeughalters,“ 2015. [Online]. Available: <https://www.ipt.fraunhofer.de/de/projekte/sense4tool.html>. [Zugriff am 9. 3. 2022].
- [25] Schunk, „ITENDO2 pad, Montage- und Betriebsanleitung,“ 2021. [Online]. Available: <https://schunk.com/fileadmin/pim/docs/IM0044220.PDF>. [Zugriff am 13. 3. 2022].
- [26] H. Nebeling, „Wechselwirkung zwischen Maschinenstruktur, Antrieben, Regelung und Zerspanprozess - Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen,“ Hochschule Reutlingen, 2017.
- [27] [REDACTED]
- [28] R. Förster und A. Förster, Einführung in die Fertigungstechnik, Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- [29] Deuss Maschinen Werkzeuge, „DEUSS-Katalog,“ 2007. [Online]. Available: <http://deuss.de/resource/DEUSS-Katalog.pdf>. [Zugriff am 12. 9. 2022].
- [30] Mouser Electronics, „Mill-Max 807-22-001-30-003101,“ [Online]. Available: <https://www.mouser.de/ProductDetail/Mill-Max/807-22-001-30-003101?qs=pjml9%2F2fuKX1Eq3fCPPBww%3D%3D>. [Zugriff am 10. 12. 2022].
- [31] Rewex GmbH, „Materialien für den 3D Druck,“ 2022. [Online]. Available: <https://rewex.de/materialien/>. [Zugriff am 10. 12. 2022].
- [32] [REDACTED]
- [33] Nordic Semiconductor, „Interface MCU,“ 12. 3. 2022. [Online]. Available: <https://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp?topic=%2Fcom.nordic.infocenter.nrf52832.ps.v1.1%2Fsaadc.html>. [Zugriff am 21. 11. 2022].
- [34] Nordic Semiconductor, „Introduction to Bluetooth Low Energy,“ 15. 5. 2020. [Online]. Available: <https://webinars.nordicsemi.com/introduction-to-bluetooth-low-6>. [Zugriff am 20. 11. 2022].
- [35] M. Afaneh, „Bluetooth 5 speed, How to achieve maximum throughput for your BLE application,“ 6. 9. 2017. [Online]. Available: <https://novelbits.io/bluetooth-5-speed-maximum-throughput/>. [Zugriff am 21. 11. 2022].

- [36] [REDACTED]
- [37] [REDACTED]
- [38] [REDACTED]
- [39] [REDACTED]
- [40] D. Veilleux, „Intro to ShockBurst/Enhanced ShockBurst,“ Devzone.Nordicsemi, 8. 2. 2015. [Online]. Available: <https://devzone.nordicsemi.com/nordic/nordic-blog/b/blog/posts/intro-to-shockburstenhanced-shockburst>. [Zugriff am 20. 11. 2022].
- [41] DMG MORI, „DMC V Baureihe,“ 2022. [Online]. Available: <https://de.dmgmori.com/produkte/maschinen/fraesen/vertikal-fraesen/dmc-v>. [Zugriff am 18. 11. 2022].
- [42] [REDACTED]

Strany 75 – 87 nejsou na základě směrnice TU Chemnitz číslo 21/2008 „Prüfungsordnung für den konsekutiven deutsch-tschechischen Studiengang Produktionssysteme mit dem Doppelabschluss (double degree) Master of Science (M. Sc.) und Inženýr (Ing.) an der Technischen Universität Chemnitz vom 11. Juli 2008“ o závěrečných pracích zpracovávaných v režimu utajení veřejné.

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.

Chemnitz, 6.2.2023