
Konzeption und Entwicklung eines Condition Monitoring Systems mit Low Cost Sensoren zur Überwachung von Roboterschwingungen

Abele, E.; Haddadian, K.; Fertig, F.; Götzinger, R.; Haberstroh, V.; Hasenzahl, M.; Stauder, D.



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Institut für Produktionsmanagement,
Technologie und Werkzeugmaschinen

Dipl.-Ing. Kaveh Haddadian

Werkzeugmaschinen und Komponenten
Technische Universität Darmstadt
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)

Otto-Berndt-Str. 2
64287 Darmstadt
Tel.: +49 6151 16-20293
E-Mail: haddadian@ptw.tu-darmstadt.de

1. Kurzfassung / Abstract

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird ein Konzept zur Erfassung des Schwingungsverhaltens von Industrierobotern mit Hilfe von Low Cost Sensoren vorgestellt. Durch dieses sollen die dynamischen Eigenschaften des Industrieroboters im gesamten Arbeitsraum untersucht werden. Die Roboterstruktur wird dazu durch eine speziell konstruierte Unwuchtscheibe angeregt. Das Messsystem besteht aus einem Beschleunigungssensor, einem Arduino-Mikrocontroller und einem eigens entwickelten Mess- und Auswerteprogramm in der Softwareumgebung MATLAB®. Die Validierung des Konzeptes erfolgt jeweils mit Messreihen an einem Kragbalken sowie an einem Industrieroboter durch den Vergleich mit einem Referenzmesssystem der Firma Brüel & Kjaer. Durch das entwickelte Low Cost Condition Monitoring System lassen sich die Anregungsfrequenzen und –amplituden mit hinreichender Genauigkeit erfassen und Rückschlüsse auf das Schwingungsverhalten des Industrieroboters ziehen.

In this publication a concept for measuring vibration behavior of industrial robots using low-cost sensors is introduced. It was developed as a part of a condition monitoring system for monitoring the dynamic behavior of industrial robots in their entire work space. In this concept the robot structure is excited using a specially designed, unbalanced rotor. The measurement system consists of an acceleration sensor, an Arduino microcontroller and a custom measuring and evaluation software based on MATLAB® programming language. The validation of the concept is carried out in a series of measurements on a cantilever and an industrial robot by comparing the low-cost measurement system with a reference measurement system from Brüel & Kjaer. In a series of measurements, the influence of the robot's position on the vibration behavior of the robot structure is studied by using the low-cost measurement system. It can be stated that the low-cost condition monitoring system is able to detect the induced frequencies and amplitudes with sufficient accuracy.

2. Einleitung

Als weltweit führender Fabrikaurüster und Technologieführer [1] behauptet sich der Produktionsstandort Deutschland gegenüber Niedriglohnländern durch Facharbeiter, Flexibilität, Qualität und Stabilität [2]. Durch die Einführung neuartiger und innovativer Produktionsverfahren muss dieser Wettbewerbsvorsprung gesichert werden [3]. Dabei legt die messdatenbasierte Prognose unter anderem die Grundlage für eine hohe Produktivität und Agilität komplexer Wertschöpfungssysteme. Besonders in der Produktion entstehen Daten aus dynamischen Prozessen, die eine datenbasierte Überwachung und Steuerung dieser Prozesse zulassen. Die Erfassung der Daten für die Produktionsplanung, -steuerung und -überwachung erfolgt sowohl durch Sensoren als auch durch intelligente technische Systeme. Die intelligenten technischen Systeme werden oft auch als cyber-physischen Produktionssysteme (CPPS) bezeichnet und sind als Weiterentwicklung mechatronischer Systeme zu betrachten [4, 5]. Durch die Berücksichtigung neuer Marktanforderungen hinsichtlich der Personalisierung und Nachhaltigkeit bieten CPPS dem Standort Deutschland eine Chance die industrielle Produktion innerhalb des Landes zu halten und weiter auszubauen [6].

Der Einsatz des Industrieroboters (IR) als fester Bestandteil in der automatisierten Produktion wirkt dabei an der Wettbewerbsfähigkeit des Produktionsstandorts Deutschland mit. Durch CPPS und messdatenbasierter Prognose in der Produktion können die Einsatzfelder des Industrieroboters erweitert werden.

Im Vergleich zum Bearbeitungszentrum (BAZ) stellt der IR eine günstige und flexible Maschine mit großem Arbeitsraum dar. Das Verhältnis von Bearbeitungsfläche zu Aufstellfläche ist besonders günstig. Die Genauigkeit eines Industrieroboters spiegelt sich in der erreichbaren Toleranz bei der Handhabung und Fertigung von Werkstücken wieder. Im Gegensatz zum BAZ ergibt sich durch die serielle und mehrachsige Bauart von Industrierobotern eine geringere Steifigkeit und demzufolge eine hohe Schwingungsanfälligkeit.

Die weiteren Ursachen für die geringe Präzision und Nichteinhaltung der Toleranzen sind in den meisten Anwendungsfällen durch die folgenden Punkte zu begründen [7]:

- Spiel in den Gelenken, Führungen sowie Getrieben
- Ungenügende Kalibrierung des Roboters
- Thermisch induzierter Dehnungen der Strukturkomponenten
- Bahnplanung und Programmierung
- Regelung der Antriebe

Bei dem Einsatz des Industrieroboters in der Bearbeitung ist sicherzustellen, dass die entsprechenden Zielpunkte angefahren werden können und dabei möglichst geringe Schwingungen auftreten. Das Schwingverhalten des IR im Arbeitsraum ist abhängig von der Position und der Orientierung des Tool Center Points (TCP). Dabei ändern sich sowohl die Schwingungsamplitude als auch die Schwingfrequenz des IR.

In dieser Veröffentlichung wird dafür eine Methode mit der Möglichkeit zur automatisierten Analyse der Schwingungseigenschaften des Industrieroboters, abhängig von der Position und Orientierung des TCP, mit einem Low Cost Messsystem präsentiert.

3. Messkette

Im nachfolgenden Kapitel werden zunächst das entwickelte Messsystem und dessen Messkette erläutert. Ziel war es ein kostengünstiges System auf Basis eines Arduino-Mikrocontrollers zu entwickeln, das konkurrenzfähig zu herkömmlichen Labormesssystemen ist. Die Messkette des Low Cost Messsystems besteht im Wesentlichen aus drei Bestandteilen: Low Cost Sensor, Mikrocontroller und Mess- bzw. Auswerteprogramm. Auf die einzelnen Komponenten wird im Folgenden genauer eingegangen.

Sensor

Die erste Komponente der Messkette ist der analoge, triaxiale Low Cost Sensor ADXL 337. Das mikro elektromechanische System (*Micro Electro Mechanical Systems; MEMS*) basiert auf dem kapazitiven Messprinzip mit einem Messbereich von $\pm 3,6$ g.

Der Frequenzbereich des Sensors liegt aufgrund der auf der Platine verlöteten Kondensatoren bei 500 Hz. Durch diesen Tiefpassfilter wird die Auflösung des Sensors verbessert und gleichzeitig die Gefahr von Aliasing vermieden [8].

Bei der Wahl des Sensors wurde die Kompatibilität des Sensors mit der Arduino-Infrastruktur, der ausreichend große Messbereich (Beschleunigung und Frequenz) sowie die gute Auflösung des Sensors berücksichtigt. Die zu erwartenden Anregungsfrequenzen f bei der Messung können analytisch aus der Gleichung 1 berechnet werden. Dabei ist n die Drehzahl des rotierenden Werkzeugs.

$$f = \frac{n}{60} \quad (1)$$

Im Allgemeinen werden für die präzise Messung von Schwingungen hochpreisige piezoelektrische Beschleunigungssensoren eingesetzt. Zur Bewertung der Güte des Low Cost Messsystems diente ein analoger 3-achsiger piezoelektrischer Beschleunigungssensor der Firma Brüel & Kjaer als Referenz. Das Low Cost Messsystem und das Referenzsystem unterscheiden sich im Wesentlichen durch das Messprinzip, den Mess- und Frequenzbereich und hieraus resultierend dem Anschaffungspreis. Im Referenzsystem wird zusätzlich ein Messverstärker der Firma PCB Piezotronics vom Typ 482C eingesetzt. Die Details zum Low Cost und Referenzsensor können Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Vergleich Referenzsensor mit Low Cost Sensor.

Sensoren		B&K Typ 4524B			ADXL 337		
Messprinzip		piezoelektrisch			kapazitiv		
Achsen		X	Y	Z	X	Y	Z
Messbereich		± 50 g			$\pm 3,6$ g		
Maximaler Stoß (nicht zerstörerisch)		5000 g			10000 g		
Empfindlichkeit in mV/g		95,10	98,45	97,65	270 – 330		
Rauschen (rms) in $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	10 Hz	16	8		175	175	300
	100 Hz	4	2				
	1000 Hz	2	1				
Frequenzbereich in Hz		Amplitude $\pm 10\%$			Keine Angabe		
		0,2 – 5,5 k	0,25 – 3 k		0,5 – 500		
Preis		> 2000 €			ca. 10-15 €		

Mikrocontroller

Die zweite Komponente der Messkette ist der auf der Open-Source Computing Plattform Arduino basierende Mikrocontroller Arduino DUE. Hierbei handelt es sich um einen 32-bit Controller mit einer Taktfrequenz von 86 MHz und einer ATSAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU von ATMEL. Er besitzt 54 digitale Ein- und Ausgänge sowie 12 analoge Eingänge mit integriertem 12-Bit Analog-Digital-Wandler. Zusätzlich zu den zwei vorhandenen USB-Schnittstellen verfügt der Controller über die Möglichkeit die angeschlossenen Peripheriegeräte direkt über 3,3 V oder 5,0 V zu speisen. Die Funktionen des Arduino können durch sogenannte „Shields“ erweitert werden. Diese sind Platinen, die auf die Mikrocontrollerplatine aufgesteckt werden können [9].

Messprogramm

Das Mess- und Auswertprogramm besteht aus einem Mess- bzw. Condition-Monitoring-Bereich sowie einem Bereich zur Auswertung. Es wurde in der Softwareumgebung MATLAB® entwickelt und läuft auf dem Messrechner.

Die grundlegende Funktionalität umfasst das Einlesen der Messdaten aus der USB-Schnittstelle sowie die Verarbeitung und Abspeicherung der Daten. Parallel zu der internen Datenverarbeitung werden die Ergebnisse im Graphical User Interface (GUI) sowohl im Zeit- wie auch Frequenzbereich visualisiert (Abb. 1). Zusätzlich zum Messen bzw. Condition-Monitoring können die Daten im Auswertebereich des Programms tiefergehend analysiert werden.

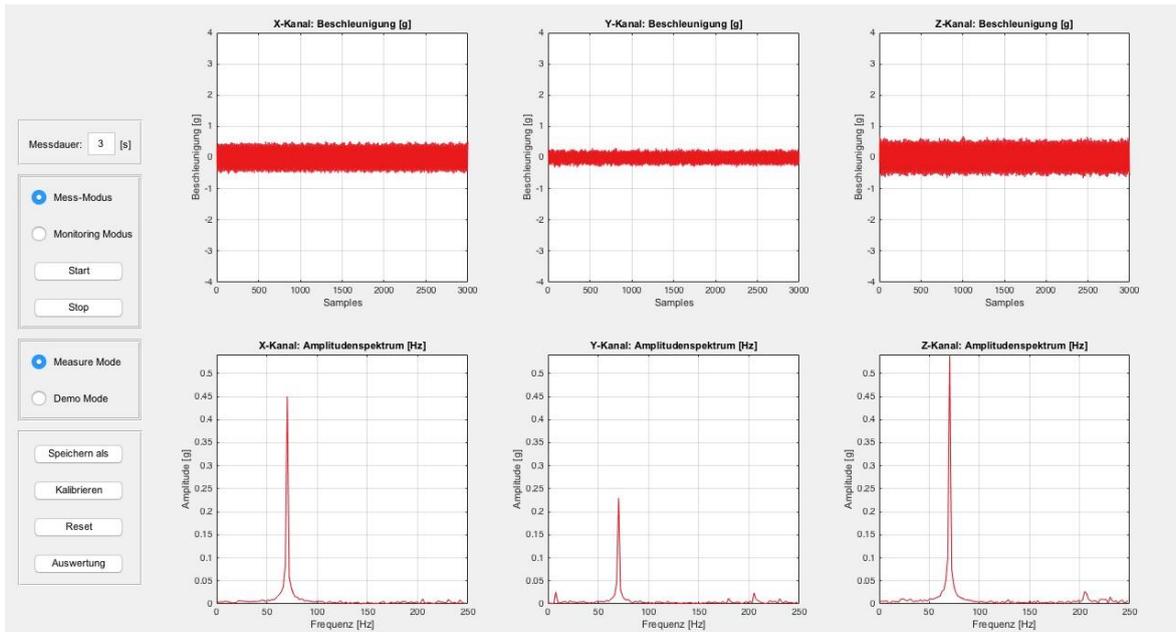


Abb. 1: GUI bei Anregung von 70 Hz.

Vorversuche

Das entwickelte Messsystem wurde in einem ersten Experiment an einem Versuchsbalken befestigt und auf dessen Funktionalität untersucht. Dabei sollten etwaige Fehler vor einer Verwendung am Industrieroboter identifiziert und behoben werden.

Beim Versuchsbalken handelt es sich um einen Kragbalken aus Stahl mit quadratischer Querschnittsfläche und einer Länge von 950 mm (Abb. 2) befestigt. Hierdurch ergeben sich analytisch drei Eigenfrequenzen des mechanischen Systems im Frequenzbereich bis 200 Hz, die vom System erfasst werden sollen. Diese drei Eigenfrequenzen liegen bei 11,3 Hz, 70,9 Hz und 198,5 Hz. Zur Verifizierung des Low Cost Messsystems wurden die Beschleunigungssignale mit denen des Brüel & Kjaer Sensors verglichen. Den Aufbau des Versuchs zeigen die Abb. 2 und Abb. 3.

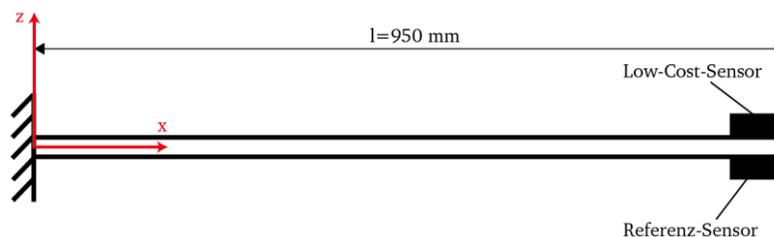


Abb. 2: Aufbau des Versuchsbalkens.

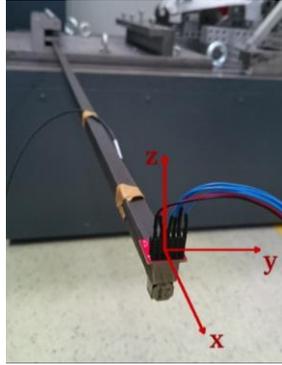


Abb. 3: Sensorkoordinatensystem.

Die Sensoren wurden dabei am freien Balkenende befestigt, da für die betrachteten Eigenfrequenzen (bzw. zugehörigen Eigenformen) an dieser Stelle keine Schwingungsknoten zu erwarten und somit Beschleunigungsamplituden messbar sind. Weiterhin wurden die Sensoren coaxial befestigt, was einen einfachen Vergleich der Messergebnisse möglich macht. In der Versuchsdurchführung wurde der Balken durch einen Hammerschlag nacheinander in Y- und Z-Richtung angeregt und die Eigenschwingungen mit den Sensoren erfasst. Es wurden pro Anregungsrichtung jeweils 5 Messungen durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse einer Messung in Z-Richtung beispielhaft dargestellt (Abb. 4).

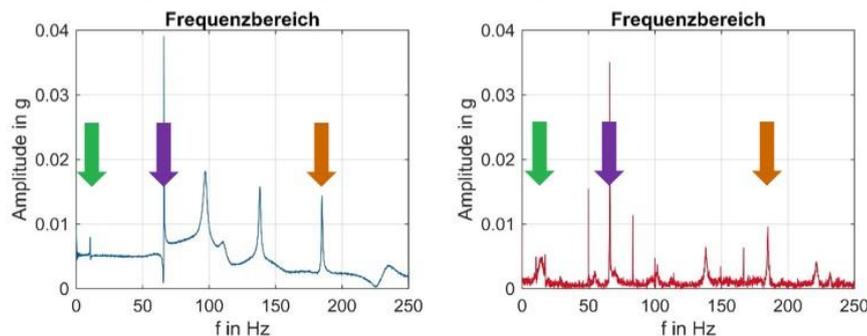


Abb. 4: Balkenmessung – Frequenzbereiche Referenzsystem (links) und Low Cost Messsystem (rechts).

Die bereits oben erwähnten Eigenfrequenzen von 11,3 Hz, 70,9 Hz und 198,5 Hz wurden vom Low Cost Messsystem erfasst und sind mit der Messung des Referenzsystems deckungsgleich. Weiterhin treten im Bereich von 100 Hz und 140 Hz zwei Peaks auf, die von beiden Systemen gemessen wurden. Die Ursache dafür können Eigenfrequenzen der Lagerung oder Sensorkabel sein.

Darüber hinaus sind der Messung des Low Cost Messsystems fehlerhafte Peaks überlagert, die in Netzrauschen begründet sind. Letzteres wurde durch die Verwendung eines besser geschirmten Kabels behoben. Weiterhin hat das Signal des Low Cost Sensors bedingt durch die höhere Dämpfung in der Anbindung über die Leiterplatine einen bereiten Verlauf.

Zusammenfassend betrachtet lässt sich aus der Machbarkeitsstudie an dieser Stelle ableiten, dass eine Verwendung der vorhandenen Low Cost Sensorik zur Schwingungsmessung prinzipiell möglich ist. Zwar unterscheiden sich die gemessenen Amplituden von denen des Referenzmesssystems, die absoluten Höhen sind laut Shi et al. [11] für eine Zustandsüberwachung aber weniger relevant. Vielmehr von Interesse sind Veränderungen in den Signalen über eine größere Messdauer, woraus sich Fehler im Maschinenbetrieb erkennen lassen. Letzteres ist mit einer qualitativen Frequenzanalyse, wie oben gezeigt wurde, möglich, denn das Low Cost Messsystem entspricht in weiten Teilen den Erwartungen der Vorauslegung und den Messungen des Brüel & Kjaer Systems.

4. Validierung und Auswertung

Aufbau und Durchführung

Die Validierung der beiden Messsysteme im Betrieb fand an einem Industrieroboter vom Typ KR300 R2500 QUANTEC ultra der Firma KUKA® statt. In der Validierungsmessung wurden insgesamt neun Messposen des Industrieroboters untersucht, welche sich aus jeweils drei hintereinander liegenden Messpunkten im Arbeitsraum und drei Orientierungen (0° , 45° und 90°) des Endeffektors um die X-Achse zusammensetzen (Abb. 5 und 6).

Die Anregung der Roboterstruktur erfolgte dabei mithilfe einer eigens konstruierten Unwuchtscheibe, welche mit einer Drehzahl von 4200 U/min für 5 Sekunden betrieben wird. Dies entspricht einer Anregungsfrequenz von 70 Hz und resultiert in einer Anregungskraft von ca. 45 N.

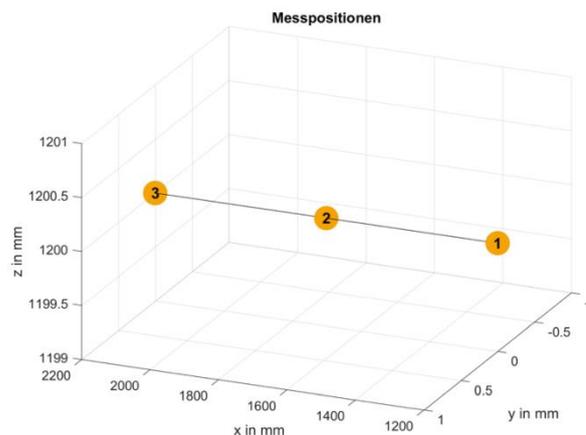


Abb. 5: Messpositionen 1, 2 und 3 in dem Arbeitsraum des Industrieroboters.

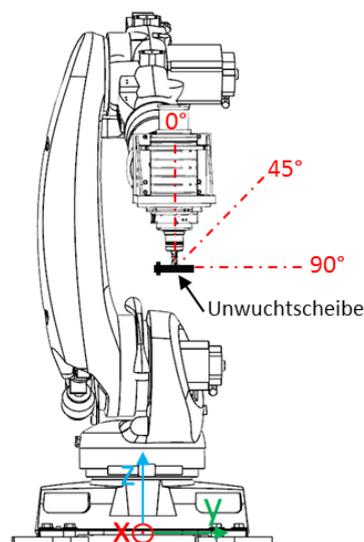


Abb. 6: 45° -Drehung des Endeffektors um die X-Achse.

Auswertung

Im Zeitbereich unterscheiden sich die Systeme sehr deutlich. Die erfassten Amplituden des Referenzsystems sind höher als die erfassten Amplituden des Low Cost Messsystems. In Z-Richtung ist der Unterschied in der Amplitude zwischen Referenz- und Low Cost Messsystem am größten: Die Amplitude des Referenzsystems ist nahezu doppelt so hoch wie die des Low Cost Messsystems (Abb. 7 und 8).

Der zu erwartenden Peak bei 70 Hz liegt sowohl bei dem Referenzmesssystem der Firma Brüel & Kjaer als auch bei dem Low Cost Messsystem in gleicher Größenordnung. Allerdings treten bedingt durch seine höhere Genauigkeit bei dem Referenzmesssystem in dem Frequenzbereich weitere Peaks auf. In dem Frequenzspektrum des Low Cost Messsystem sind nur vereinzelt kleinere, also weniger stark ausgeprägte Peaks zu erkennen.

Vibrationen, beispielsweise durch die Spindel, Kühl- und Schmiersystem, oder aber auch andere Störungen durch Maschinen in der Maschinenhalle können für die Peaks verantwortlich sein.

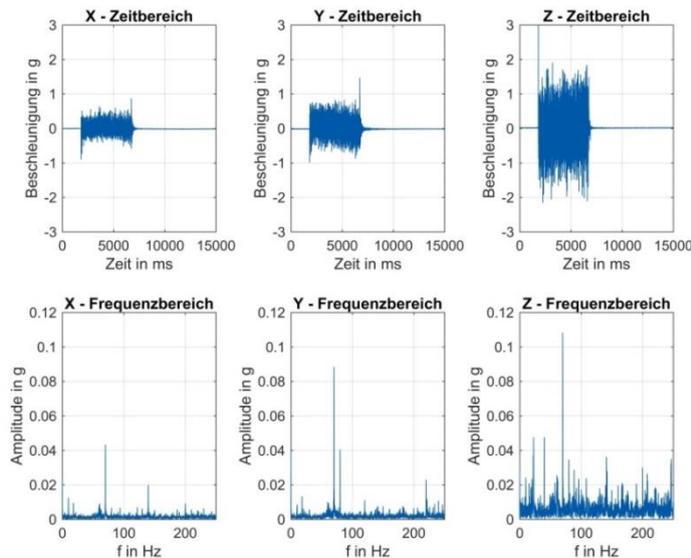


Abb. 7: Gemessene Schwingungen mit dem Referenzsystem der Firma Brüel & Kjaer, Position 3, Endeffektorstellung 90°.

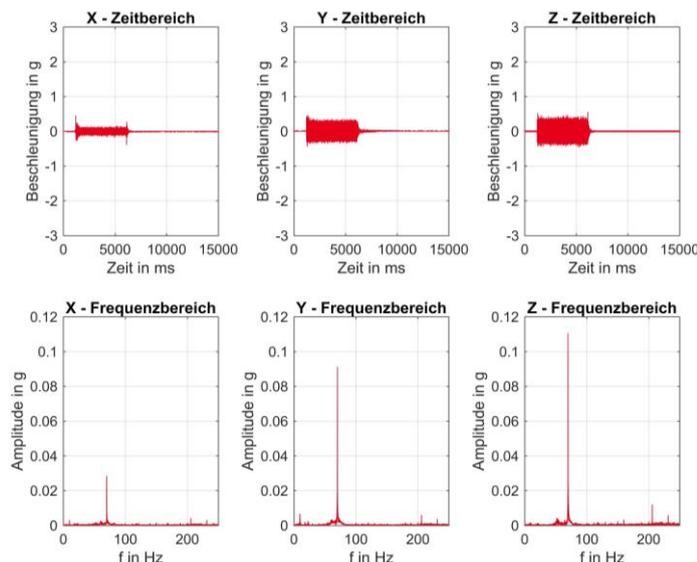


Abb. 8: Gemessene Schwingungen mit dem Low Cost Messsystem, Position 3, Endeffektorstellung 90°.

Zusammenfassend lässt sich aus der Validierung des Low Cost Messsystems schließen, dass es in der Lage ist mit hinreichender Genauigkeit die Schwingungen der Anregungsfrequenz wiederzugeben. Der größte Unterschied zwischen Referenz- und Low Cost Messsystem liegt in der Erfassung weiterer Schwingungen außerhalb der Anregungsfrequenz.

5. Erfassung der dynamischen Eigenschaften des Industrieroboters in verschiedenen Positionen im Arbeitsraum

Nach den Validierungsmessungen wurde eine weitere Messreihe am Industrieroboter durchgeführt. Ziel hierbei war es Tendenzen im Schwingungsverhalten des Roboters mithilfe des Low Cost Messsystems zu erkennen. Dafür wurden 8 Messpositionen (4-11) angefahren, die in Abb. 9 gezeigt sind. An jeder Messposition wurde der Endeffektor um 0° , 45° und 90° um die X-Achse gedreht (Abb. 6). Anschließend wurden 3 Messungen pro Pose und Messposition durchgeführt. Der Roboter wurde wieder durch die Unwuchtscheibe mit einer Frequenz von 70 Hz (4200 U/min) über eine Dauer von 5 s angeregt.

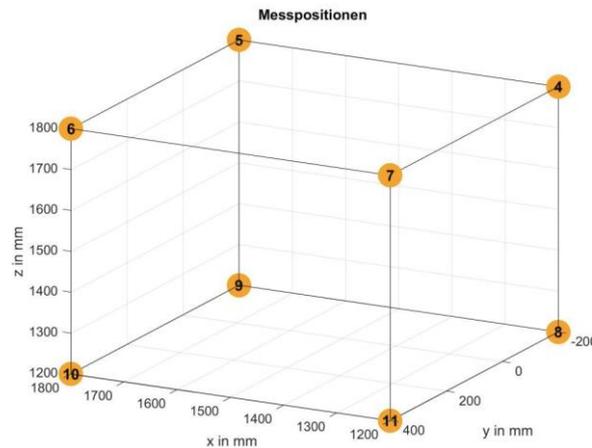


Abb. 9: Messpositionen 4-11.

Bei der Analyse liegen die erfassten Schwingungen in dem Koordinatensystem des Sensors vor. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde aus den erfassten Amplituden der quadratische Effektivwert der Schwingungsamplituden (RMS; Root Mean Square) gebildet. Die Durchmesser der Kreise symbolisieren hierbei die RMS Maxima an den unterschiedlichen Posen des Industrieroboters.

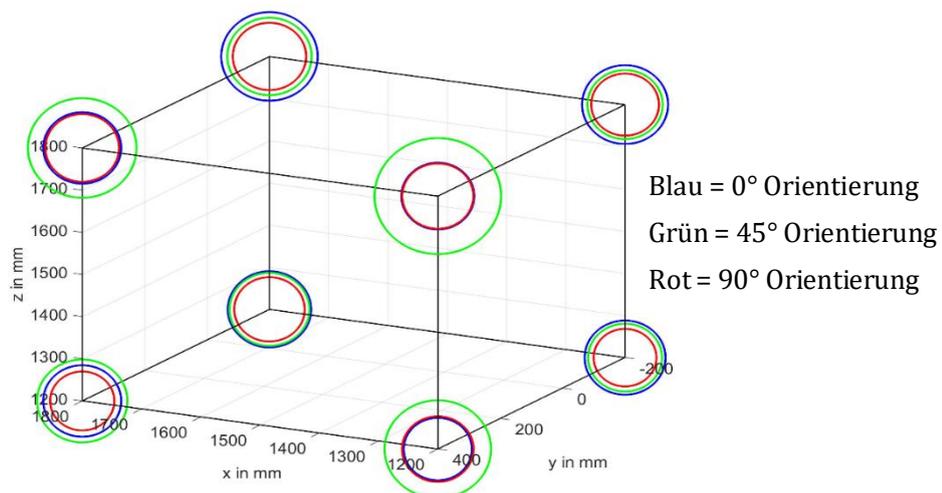


Abb. 10: Darstellung der RMS Maxima als Kreise an den Messpositionen 4 bis 11.

Das geringste Schwingverhalten tritt in Position 8 bei 90° bei einer Beschleunigung von $a = 0,09 \text{ g}$ auf und das höchste in Position 7 bei 45° bei einer Beschleunigung von $a = 0,36 \text{ g}$.

Es wurden zudem noch die durch den Messwürfel aufgespannten Ebenen verglichen: Die Ebenen normal zur X-Richtung werden durch die Positionen 4, 7, 8, 11 (Ebene X1) und 5, 6, 9, 10 (Ebene X2) aufgespannt. In Abb. 11 ist zu erkennen, dass für beide Ebenen die 90°-Stellung den niedrigsten RMS-Wert aufweist. Bei den beiden äußeren Winkelstellungen weist die erste Ebene X1 gegenüber der zweiten Ebene X2 einen geringeren Effektivwert der Schwingamplituden auf, wobei sich bei 45° diese Tendenz umkehrt.

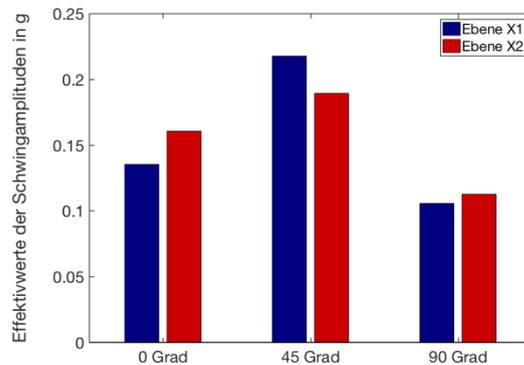


Abb. 11: Vergleich der ermittelten RMS-Werte in X-Richtung.

Die Ebenen normal zur Y-Richtung werden durch die Positionen 4, 5, 8, 9 (Ebene Y1) und 6, 7, 10, 11 (Ebene Y2) gebildet. Die Ergebnisse sind in Abb. 12 zu sehen. In der Ebene Y1 nimmt der RMS-Wert mit zunehmendem Winkel ab. Der geringste RMS-Wert wird bei 90° und der höchste bei 0° erreicht. In der zweiten Ebene Y2 ist eine klare Tendenz nicht zu beobachten. Der höchste RMS-Wert wird bei 45° und der geringste RMS-Wert bei 90° Orientierung erreicht. Bei dem Vergleich der beiden Ebenen hinsichtlich der Schwingungsanfälligkeit ist festzustellen, dass in der 90° Stellung der Industrieroboter eine höhere dynamische Steifigkeit vorweist.

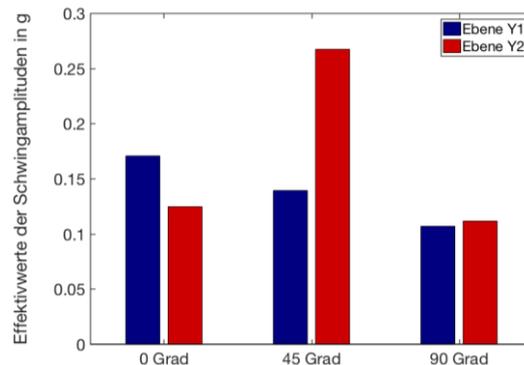


Abb. 12: Vergleich der ermittelten RMS-Werte in Y-Richtung.

Die Ebenen normal zur Z-Richtung werden durch die Positionen 4, 5, 6, 7 (Ebene Z1) und 8, 9, 10, 11 (Ebene Z2) dargestellt. In Abb. 13 ist zu erkennen, dass sich bei der Betrachtung der beiden Ebenen hinsichtlich der Effektivwerte der Schwingungsamplituden des Industrieroboters gleiche Tendenzen wie beim Vergleich der Ebenen in X-Richtung erkennen lassen. In beiden Ebenen wird der geringste RMS-Wert bei der 90° Orientierung erzielt und die höchste bei der 45° Orientierung. Des Weiteren weist der Industrieroboter in der ersten Ebene Z1 im Vergleich zur zweiten Ebene Z2 höhere RMS-Werte auf.

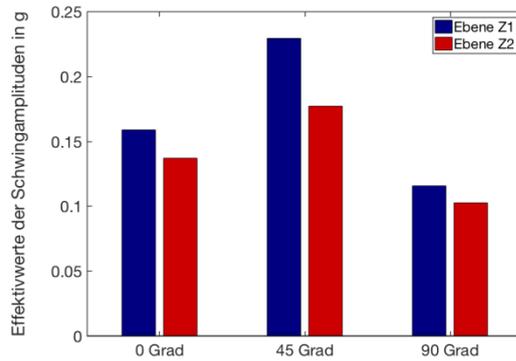


Abb. 13: Vergleich der ermittelten RMS-Werte in Z-Richtung.

Aufgrund des hohen dynamischen Steifigkeitseinflusses des Industrieroboters auf die Oberflächenqualität des Bearbeitungswerkstücks soll diese bei der Bearbeitung berücksichtigt werden. Bei der Analyse der dynamischen Robotersteifigkeit wurde die 90° Orientierung als die Orientierung mit der höchsten dynamischen Steifigkeit identifiziert. Dahingegen weist der Industrieroboter in der 45° Orientierung eine deutlich geringere Steifigkeit auf.

6. Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wurde ein Konzept zur Erfassung des Schwingverhaltens von Industrierobotern mit Hilfe eines Low Cost Messsystems entwickelt.

Zum Einsatz kam ein Low Cost Messsystem mit einem analogen, kapazitiven Beschleunigungssensor (ADXL 337). Die Entwicklung der Programme zum Auslesen und Auswerten des Mikrocontrollers Arduino Due wurde in MATLAB® durchgeführt. Das Low Cost Messsystem wurde zum einen über eine Balkenmessung und zum anderen über eine Messung am Industrieroboter validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Amplituden der gemessenen Schwingungen des Low Cost Messsystems von denen des Referenzsystems unterscheiden. Bezüglich des qualitativen Verlaufs im Frequenzbereich stimmen das Low Cost Messsystem und das Referenzsystem mit ausreichender Genauigkeit überein.

Für die Validierungsmessung am Industrieroboter wurden der Referenzsensor sowie der Low Cost Sensor am Roboterflansch befestigt. Die Anregung des Roboters erfolgte dabei mithilfe einer rotierenden Unwuchtscheibe, welche mit einer Drehzahl von 4200 U/min, respektive 70 Hz, für 5 Sekunden betrieben wurde. Die Validierung des Low Cost Messsystems hat gezeigt, dass es in der Lage ist mit hinreichender Genauigkeit die Schwingungen der Anregungsfrequenz wiederzugeben. Der größte Unterschied zwischen dem Referenz- und dem Low Cost Messsystem liegt in der Erfassung weiterer Schwingungen außerhalb der angeregten Frequenz. Die Ursachen hierfür könnten in der höheren Auflösung des Referenzsystems liegen. Die finale Vermessung des Roboterarbeitsraums hinsichtlich des variablen Schwingverhaltens des Roboterarms wurde anhand von möglichst weit auseinanderliegenden Messpunkten durchgeführt. Es ließen sich zu jeder Winkelstellung die Positionen isolieren, in denen die höchsten und die niedrigsten Werte der resultierenden Schwingamplituden vorlagen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass das Low Cost Messsystem kleinere Schwingamplituden als das Referenzsystem erfasst. Der Zeitverlauf und das Amplitudenfrequenzspektrum beider Systeme stimmen jedoch qualitativ gut überein (Abb.7 und Abb.8). Der Anschaffungspreis des Low Cost Messsystems beträgt nur einen Bruchteil des Referenzmesssystems, wodurch das Low Cost Messsystem für den serienmäßigen Einsatz in einem zukünftigen Condition Monitoring System zur messdatenbasierten Prognose geeignet ist.

Bei der Analyse des Schwingverhaltens des Industrieroboters wurde festgestellt, dass der Effektivwert der Schwingungsamplitude (RMS) bei der 90° Orientierung in allen Positionen am

geringsten ist. Dahingegen weist die 45° Orientierung in fast allen Positionen den höchsten RMS-Wert auf.

Aufgrund des offenen kinematischen Aufbaus des Industrieroboters und des stark anisotropen Steifigkeitsverhaltens des Industrieroboters ist das dynamische Schwingverhalten des Industrieroboters im gesamten Arbeitsraum genauer zu untersuchen. Dadurch kann die optimale Position und Pose mit dem geringsten Schwingverhalten identifiziert werden.

7. Abkürzungsverzeichnis

BAZ	Bearbeitungszentrum
CPPS	Cyber-Physische Produktionssysteme
CPU	Central Processing Unit
GUI	Graphical User Interface
IR	Industrieroboter
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
RMS	Root Mean Square
TCP	Tool Center Point
USB	Universal Serial Bus

8. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: GUI bei Anregung von 70 Hz.	4
Abb. 2: Aufbau des Versuchsbalkens.	5
Abb. 3: Sensorkoordinatensystem.	5
Abb. 4: Balkenmessung – Frequenzbereiche Referenzsystem (links) und Low Cost Messsystem (rechts).	5
Abb. 5: Messpositionen 1, 2 und 3 in dem Arbeitsraum des Industrieroboters.	7
Abb. 6: 45°-Drehung des Endeffektors um die X-Achse.	7
Abb. 7: Abb. 7: Gemessene Schwingungen mit dem Referenzsystem der Firma Brüel & Kjaer, Position 3, Endeffektorstellung 90°.	8
Abb. 8: Abb. 8: Gemessene Schwingungen mit dem Low Cost Messsystem, Position 3, Endeffektorstellung 90°.	8
Abb. 9: Messpositionen 4-11.	9
Abb. 10: Darstellung der RMS Maxima als Kreise an Messpositionen 4-11.	10
Abb. 11: Vergleich der ermittelten RMS-Werte in X-Richtung.	11
Abb. 12: Vergleich der ermittelten RMS-Werte in Y-Richtung.	11
Abb. 13: Vergleich der ermittelten RMS-Werte in Z-Richtung.	11

9. Literaturverzeichnis

- [1] KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J.: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern, Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0.
URL: https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf
Überprüfungsdatum: (2016-08-09).
- [2] GANSCHAR, O.; GERLACH, S.; HÄMMERLE M., KRAUSE, T.: SCHLUND, S.: Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. URL: <http://www.iao.fraunhofer.de/lang-de/images/iao-news/produktionsarbeit-der-zukunft.pdf>
Überprüfungsdatum: (2016-08-09).
- [3] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG REFERAT IT-SYSTEM: Zukunftsbild „Industrie 4.0“: Hightech-Strategie.
URL: https://www.bmbf.de/pub/Zukunftsbild_Industrie_40.pdf
Überprüfungsdatum: (2016-08-09).
- [4] HÜNER, K. M.; SCHIERNING, A.; OTTO, B.; ÖSTERLE, H.: Product data quality in supply chains: The case of Beiersdorf, *Electronic Markets* 21, (2011).
- [5] YEGANEH, N. K.; SADIQ, S.; SHARAF, M. A.: A framework for data quality aware query systems, *Information Systems* 46, (2014).
- [6] BAUERNHANSL, T.; HOMPEL, M.; VOGEL-HEUSER, B.: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, (2014).
- [7] WEIGOLD, M.: *Kompensation der Werkzeugabdrängung bei der spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern*. erschienen in der Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik", Diss. TU Darmstadt, Shaker Verlag, (2008).
- [8] ANALOG DEVICES Inc.: ADXL337 (Rev. 0).
URL: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Accelerometers/ADXL337.pdf>
Überprüfungsdatum: (2016-01-19).
- [9] ATMEL CORPORATION: SAM3X/SAM3A Series: Atmel | SMART ARM-based MCU. DATASHEET. URL: http://www.atmel.com/Images/Atmel-11057-32-bit-Cortex-M3-Microcontroller-SAM3X-SAM3A_Datasheet.pdf
Überprüfungsdatum (2016-02-02)
- [10] SHI, D.; AXINTE, D. A.; GINDY, N. N.: Development of an online machining process monitoring system: a case study of the broaching process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 34 Nr. 1, S. 34–46, (2006).