

Roboterbasierte Koordinatenmesstechnik – Wie präzise kann ein Roboter Bauteile vermessen?

Andreas Horn, Jan Schmitt

Short Facts

Förderträger: Hans-Wilhelm Renkhoff Stiftung

Projektlaufzeit: 01.04.2021 – 30.03.2022

1 AUSGANGSLAGE

In der industriellen Produktion findet die Qualitätssicherung von Bauteilen auf verschiedenen Ebenen statt. Bauteile mit hohen Toleranzanforderungen (wenige Hundertstel-Millimeter) und komplexen Messpunkten, die z.B. schwer zu erreichen sind, Kombinationsmaße oder Form- und Lagetoleranzen darstellen, werden abseits der Produktion taktil durch Koordinatenmessmaschinen oder optisch durch die sog. Streifenlichtprojektion vermessen. Messungen an wenigen »einfachen« Messpunkten (1–20), werden i.d.R. direkt in der Produktion durchgeführt, wobei die Toleranzen dieser Messpunkte ebenso im Hundertstel-Millimeter-Bereich liegen. In der Produktion bedienen sich Unternehmen zumeist präzisen Messuhren, von denen mehrere in bauteilspezifischen Aufnahmen integriert sind. Dies gilt sowohl für Metall- als auch für Kunststoffbauteile mit geringeren Toleranzanforderungen (wenige Zehntel-Millimeter) gleichermaßen. Beachtenswert bei den produktionsfernen Messmitteln sind deren Dimensionen (Koordinatenmessmaschinen haben zumeist Raumgröße). Produktionsnahe Messsysteme beinhalten oftmals mehrere Messmittel und spezifische Aufnahmen für genau ein Bauteil.

Es lässt sich somit festhalten: Koordinatenmessmaschinen und Messkammern für robotergeführte Streifenlichtprojektion sind flexibel, also für eine Vielzahl von Bauteilen anwendbar, benötigen jedoch einen großen Bauraum und sind im Vergleich kostenintensiv (ca. 100.000 bis 200.000 €). Aufbauten mit (analogen oder digitalen) Messuhren hingegen sind bauteilspezifisch, somit größenangepasst und erlauben eine Messung direkt in der Produktion. Die Kosten dieser manuellen Messstationen liegen aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen und der Vielzahl von Messstellen jedoch auch oft im 5-stelligen Bereich. Zudem ist es nicht möglich die Messaufgabe (teil-)automatisiert nach der Programmerstellung ablaufen zu lassen, wie es bei Koordinatenmessmaschinen und der robotergeführten Streifenlichtprojektion üblich ist.

Ferner unterliegen Produkte, deren geometrische Qualität gesichert werden muss, immer häufiger einem kürzeren Lebenszyklus und werden durch neue Varianten oder eine neue Generation abgelöst. Gleiches gilt für die spezifischen Messmittel. Zudem werden eine Vielzahl kleinerer Bauteile bspw. aus der Zuliefererindustrie von klein- und mittelständigen Unternehmen gefertigt, so dass bzgl. des Bauteilvolumens eine Messung nicht notwendigerweise durch große Messmaschinen erfolgen muss. Darüber hinaus ist die Qualitätssicherung von Bauteilen durch Messung ein nicht-wertschöpfender Prozess und somit Nebenzeit, welche die Gesamtanlageneffektivität und somit die Wirtschaftlichkeit schmälert. Daher ist es zielführender den Messprozess möglichst von einem Mitarbeiterinsatz zu entkoppeln.

Das beschriebene Spektrum an derzeit etablierten Messstrategien in Zusammenhang zu deren Charakteristika (Platzbedarf, Produktionsnähe etc.) findet sich in der nachfolgenden

Abbildung 1. Es zeigt sich in Bezug auf die Systemkosten, den Platzbedarf, die Flexibilität als Gegenspieler zur Bauteilspezifität, die Komplexität der Messaufgabe sowie den produktionsnahen Einsatz eine Lücke auf. Diese soll durch das RoKoMess-System geschlossen werden.

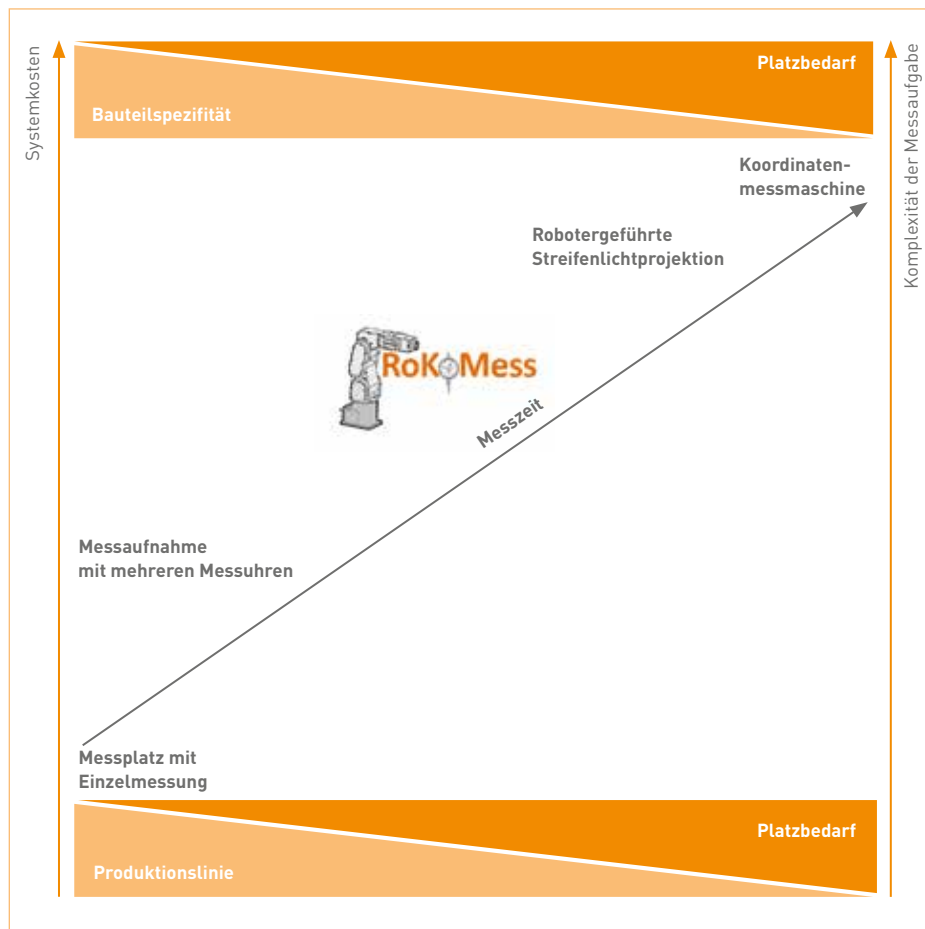


Abbildung 1: Spannungsfeld der industriellen Messtechnik

Das beschriebene Spannungsfeld aus Flexibilität, Bauraum, Kosten, Genauigkeit und automatisierter Messung soll in diesem Vorhaben mit der Realisierung einer größenangepassten, roboterbasierten Koordinatenmesstechnik begegnet werden. Als Herausforderung wird hierbei das Verfahren zur Optimierung der Genauigkeit (Kalibrierung) aus den gegebenen Randbedingungen (Kinematik, Steifigkeit) insbesondere des Roboters gesehen.

2 DAS RoKoMess AUFBAUKONZEPT

Mit dem Ziel die Genauigkeit eines größenangepassten, roboterbasierten Koordinatenmesssystems zu bestimmen und zu optimieren, wird ein hochgenauer 6-Achs-Roboter mit einem taktilen Messsystem als Endeffektor ausgestattet und auf einer Grundplatte montiert. Nachfolgend zeigt die Abbildung 2 den realisierten Versuchsstand sowie eine Darstellung der maßgebenden Komponenten.

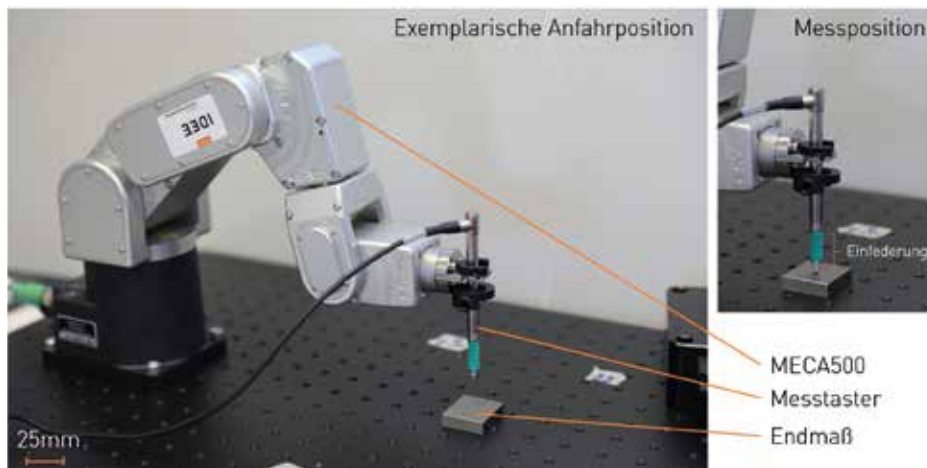


Abbildung 2: RoKoMess Aufbau

Ein hochpräziser MECA500 6-Achs-Roboter mit einer Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,005$ mm sowie ein TESA GT62 taktile Messtaster mit einer Wiederholbarkeit von $24 \mu\text{m}$, einer Linearitätsabweichung von $8,8 \mu\text{m}$ und einem Federweg von ± 5 mm als Endeffektor sind auf einer Thorlabs Grundplatte PBG12118 mit einer Gradheit von $\pm 0,15$ mm über $0,3 \text{ m}^2$ montiert. Über die Python-Entwicklungsumgebung wird der Roboter programmiert, der Controller ist in der Basis des Roboters integriert. Durch die Sperrung der drei rotatorischen Freiheiten wird es möglich Messungen im kartesischen Raum (drei translatorische Freiheiten x, y, z) durchzuführen.

In bisherigen Ansätzen mit Robotern geometrische Messaufgaben zu realisieren stellt sich heraus, dass Roboter zwar hoch flexibel sind was ihre Einsatzmöglichkeiten betrifft [6] und eine hohe Wiederholgenauigkeit bieten [1]. Die niedrige absolute Positioniergenauigkeit (mehrere Zehntel Millimeter) im Arbeitsraum stellt dabei allerdings eine entscheidende Limitierung dar. Diese Messunsicherheit hat verschiedene Ursachen und lässt sich in fünf Kategorien einteilen [2]:

- **Umwelt:** z.B. durch Temperatureinflüsse
- **Parametrisch:** z.B. Fertigungs- und Montagetoleranzen
- **Messtechnisch:** z.B. Auflösung der Motordrehgeber
- **Rechnerisch:** z.B. Rundungsfehler der Steuerung
- **Applikation:** z.B. Fehler bei der Installation

Diese Einflüsse führen dazu, dass die im Steuerungscontroller hinterlegten Parameter zur Bestimmung der Roboterkinematik nicht mit der realen Roboterstruktur übereinstimmen [3]. Ein möglicher Ansatz, um die absolute Positionierungsgenauigkeit so weit wie möglich zu optimieren (und somit die Messunsicherheit zu minimieren), ist die sogenannte numerische Kalibrierung [4]. Dabei sind Messfehler durch andere Ursachen gering: Die Messunsicherheit ist zu 90 % auf geometrische Fehler zurückzuführen, die zu einer Verschiebung bzw. Rotation der Koordinatensysteme der Robotergelenke führen [5].

In den letzten Jahren wurden verschiedenste Kalibriermethoden entwickelt und vorgestellt:

Quelle	Kalibrierstrategie
Gaudreault et al. 2018 [1]	Bestimmung der Position des Endeffektors mit Hilfe von TriCal
Du & Zhang 2013 [3]	Kalibrierung mit Hilfe einer Kamera und eines Schachbrettmusters als Referenz
Jiang et al. 2020 [6] Luo et al. 2018 [7]	Kalibrierung der Roboterparameter mit Hilfe eines Neuronalen Netzes
Jing et al. 2016 [8]	Product-of-Exponential und Gauß-Prozess Regression
Möller et al. 2016 [9]	Kalibrierung mit Hilfe eines Stereo-Kamera-Systems
Nubiola & Bonev 2014 [2]	Kalibrierung mit Hilfe eines Kreisformmessgeräts
Shi et al. 2020 [10]	Kalibrierung über die Bestimmung und Manipulation der Roboterparameter

Allerdings erzielt keine dieser Kalibriermethoden eine Genauigkeit von kleiner 0,1 mm. Das ist in erster Linie auf die eingesetzten Industrieroboter und deren Einsatzzweck zurückzuführen. Für typische Robotik-Anwendungen, wie Materialhandling, Schweiß- oder Lackieranwendungen werden häufig mittlere bis große Industrieroboter mit entsprechendem Arbeitsraum eingesetzt. Eine zunehmende Größe der Roboterkinematiken wirkt sich allerdings negativ auf die absolute Positioniergenauigkeit aus, weshalb roboterbasierte messtechnische Anwendungen eine Herausforderung darstellen [4]. Mit dem im Projekt RoKoMess eingesetzten, größenangepassten Roboter soll dieser inhärente Nachteil zu Gunsten einer reduzierten Messunsicherheit minimiert werden.

3 NUMERISCHE KALIBRIERUNG ALS ANSATZ ZUR GENAUIGKEITSSTEIGERUNG

Ein vielversprechender Ansatz die Absolutgenauigkeit von Robotern zu steigern und dessen Anwendbarkeit für den dargestellten Untersuchungsgegenstand »Roboterbasierte Messtechnik« ist die genannte numerische Kalibrierung. Dabei wird der Arbeitsraum, in konkretem Falle Messraum, durch eine Gitterstruktur diskretisiert [11]. Jeder Punkt des Gitters wird angefahren und die Position des Endeffektors gemessen. Da der gezeigte RoKoMess-Aufbau selbst ein 2-dimensionales, präzises Messmittel als Endeffektor besitzt (Hub 0–10 mm) kann somit die Position in einem Freiheitsgrad (z-Koordinate) ermittelt werden. Das Residuum zwischen

programmierter und tatsächlich erreichter Pose wird in einer Matrix hinterlegt. Das so entstehende 3-dimensionale Vektorfeld eignet sich für Prognosen über den zu erwartenden kartesischen Fehler in z-Richtung. Um den gesamten Messraum, und nicht nur die Gitterpunkte, kann zwischen den Punkten und in weiteren Koordinatenebenen interpoliert werden. Hierzu stehen eine Reihe von Verfahren u.a. das maschinelle Lernen zur Verfügung, deren Güte im Laufe des Vorhabens weiter evaluiert werden. Nachfolgend ist die Prozedur zur beschriebenen numerischen Kalibrierung gezeigt (siehe Abbildung 3).

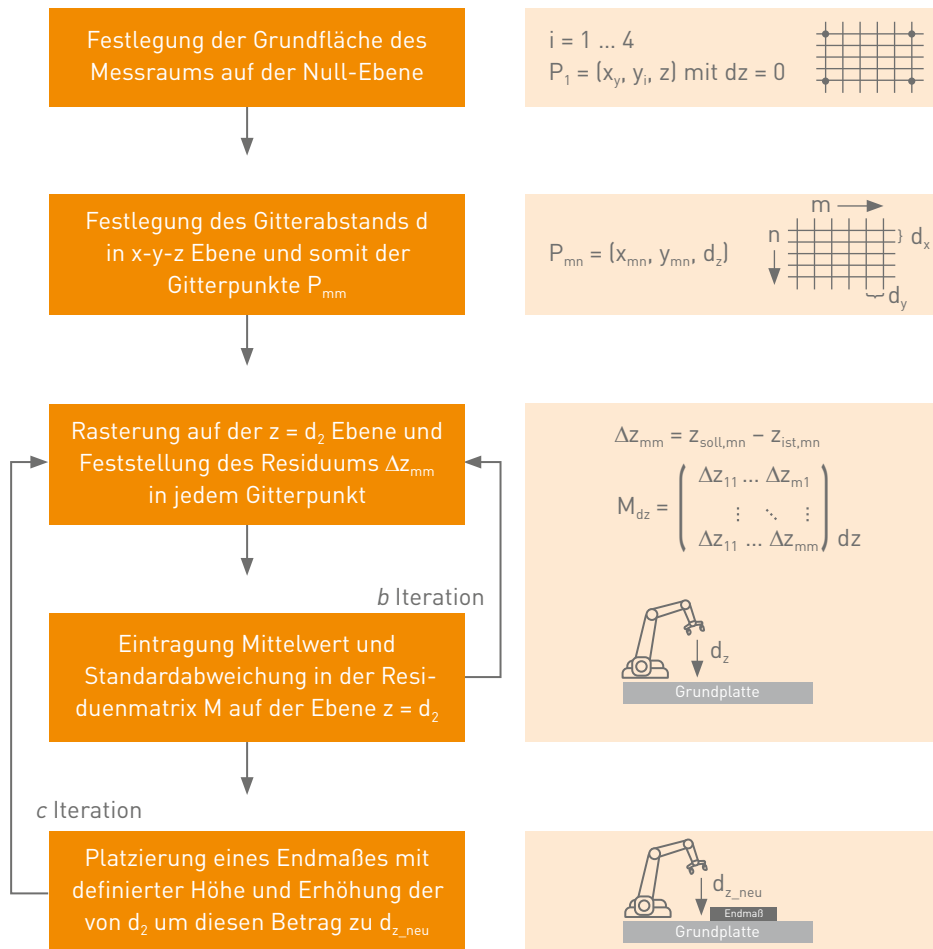


Abbildung 3: Ablauf der numerischen Kalibrierung

4 ERSTE ERGEBNISSE

Wie den Spezifikationen des RoKoMess-Aufbaus zu entnehmen ist, gibt es eine inhärente Schiefe der Grundplatte. Diese kann mit dem vorgestellten Verfahren als Offset berücksichtigt werden, um eine möglichst einheitliche Nullebene zu erzeugen. Die nachfolgende Abbildung zeigt die resultierende Residuenmatrix zwischen der Grundplatte $z_0 = 0$ mm, den absoluten Fehler ohne Kalibrierung in einer Ebene $z_3 = 3$ mm sowie deren Kalibrierung in Abhängigkeit der x - und y -Koordinate.

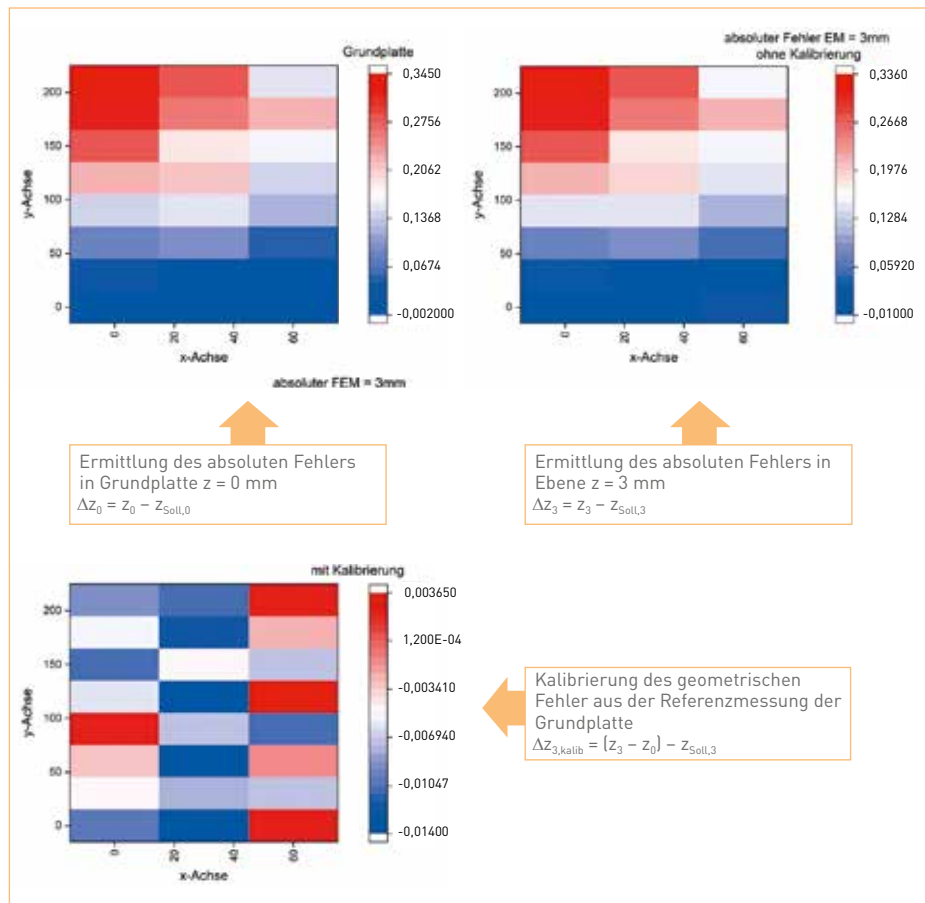


Abbildung 4: Residuen in 3 verschiedenen Ebenen

In Abbildung 4 zeigt sich, dass der maximale Fehler auf der Ebene maximal 0,34 mm beträgt. Dieser setzt sich aus der Messunsicherheit des Roboters, verursacht durch kinematische Fehler, sowie der Schiefe der Grundplatte (maßgeblich in y-Richtung zusammen). In der Kalibrierebene $z = 3$ überträgt sich diese Messunsicherheit nahezu mit gleichem Betrag. Wird nun diese Ebene zur Veranschaulichung mit der Residuenmatrix der Ebene $z = 0$ kalibriert, ergibt sich eine maximale Sollwertabweichung über den gesamten Messbereich von 0,0177 mm. Mit einem sehr ähnlichen Verfahren werden nun weitere Ebenen im Messraum kalibriert. Nach der vollständigen numerischen Kalibrierung kann ein zu vermessendes Bauteil im Messraum platziert werden. Durch die Interpolation und Kalibrierung des, durch das dargestellte Verfahren, ermittelten Messfehlers im aufgespannten Messraum, soll eine fähige Bauteilvermessung (mindestens in einer Raumachse) möglich werden. Notwendig ist hierbei die ungefähre Kenntnis der Lage des Messobjekts im Messraum, um einen Bezug zum Messpunkt und Ortsfehler herstellen zu können.

5 FAZIT UND AUSBLICK

Nachdem die Ausgangssituation sowie das RoKoMess-Aufbaukonzept vorgestellt und die numerische Kalibrierung als Ansatz zur Genauigkeitssteigerung roboterbasierter Messtechnik beschrieben wurde, zeigen die ersten Ergebnisse dessen Tragfähigkeit im Problemfeld. Weitere Forschungsarbeiten betreffen die gesamte Kalibrierung über den Messraum mit Hilfe von End-

maßen, die Exploration geeigneter Interpolationsalgorithmen zwischen den Messgitterebenen (klassische Interpolation vs. maschinelles Lernen) sowie die Messsystemanalyse Typ 3 mit einem Referenzbauteil. Dieses Verfahren findet bei Messsystemen Anwendung, die vollautomatisch arbeiten und somit keinerlei Bedienendeneinfluss unterliegen. Wenn die Genauigkeit des RoKoMess-Aufbaus über dieses Verfahren in einer translatorischen Raumachse (z) sichergestellt ist, sollen die verbleibenden translatorischen Freiheiten (x und y) als Messachsen in das Gesamtsystem einbezogen werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] **Gaudreault, M.; Joubair, A.; Bonev, I.** (2018), »Self-Calibration of an Industrial Robot Using a Novel Affordable 3D Measuring Device«, *Sensors* 18 (10), Basel, verfügbar in: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/10/3380>
- [2] **Nubiola, A.; Bonev, I. A.** (2014), »Absolute robot calibration with a single telescoping ballbar«, *Precision Engineering* 38 (3), S. 472–480.
- [3] **Du, G.; Zhang, P.** (2013), »Online robot calibration based on vision measurement«, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 29 (6), S. 484–492.
- [4] **Olabi, A.; Damak, M.; Bearee, R.; Gibaru, O.; Leleu, S.** (2012), »Improving the accuracy of industrial robots by offline compensation of joints errors« *IEEE International Conference on Industrial Technology 2012, ICIT 2012, Athens*, S. 492–497.
- [5] **Wu, Y.; Klimchik, A.; Caro, S.; Furet, B.; Pashkevich, A.** (2015), »Geometric calibration of industrial robots using enhanced partial pose measurements and design of experiments«, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 35, S. 151–168.
- [6] **Jiang, Y.; Yu, L.; Jia, H.; Zhao, H.; Xia, H.** (2020), »Absolute Positioning Accuracy Improvement in an Industrial Robot«, *Sensors* 20 (16), Basel, verfügbar in: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/16/4354>
- [7] **Luo, R. C.; Wang, H.; Kuo, M.-H.** (2018), »Low cost solution for calibration in absolute accuracy of an industrial robot for iCPS applications«, *IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS) 2018, St. Petersburg*, S. 428–433.
- [8] **Jing, W.; Tao, P. Y.; Yang, G.; Shimada, K.** (2016), »Calibration of industry robots with consideration of loading effects using Product-Of-Exponential (POE) and Gaussian Process (GP)«, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2016, Stockholm*, S. 4380–4385.
- [9] **Möller, C.; Schmidt, H. C.; Shah, N. H.; Wollnack, J.** (2016), »Enhanced Absolute Accuracy of an Industrial Milling Robot Using Stereo Camera System«, *Procedia Technology* 26, S. 389–398.

- [10] Shi, G.; Zhao, S.; Hu, B. (2020), »A Practical Method to Improve Absolute Positioning Accuracy of Industrial Robot«, Journal of Physics Conference Series 1453:012121, verfügbar in: https://www.researchgate.net/publication/339683272_A_Practical_Method_to_Improve_Absolute_Positioning_Accuracy_of_Industrial_Robot
- [11] Wiest, U. (2001), »Kinematische Kalibrierung von Industrierobotern«, Dissertation, Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe (TH), verfügbar in: <https://www.wiest-ag.de/de/assets/media/files/dissertation.pdf>