



Veranstaltungsort:

Heinz Nixdorf MuseumsForum
Fürstenallee 7, 33102 Paderborn

- **Mechatronische Produkte**
(neue Funktionalitäten, Industrie 4.0, Kosteneffizienz, Zuverlässigkeit, ...)
- **Ressourceneffizienz**
(Energie, Material, ...)
- **Automatisierte Mobilität**
(Konzepte, Modelle, Sensorik)
- **Systems Engineering und Entwicklungsmanagement**
(Prozesse, Verfahren, Software, ...)
- **Innovative Konzepte und digitale Geschäftsmodelle**
(Modelle, Regelung, Optimierung, Eco-Systeme)
- **Nutzerfreundlichkeit und Akzeptanz**
(Assistenzsysteme, Schnittstellen, Interaktion, Gesetzgebung, ...)
- **Systemvernetzung und Systemintegration**
(Konzepte, Verfahren, ...)
- **Smarte Aktoren**
(Konzepte, Beispiele, ...)
- **Serienfertigung mechatronischer Produkte**
(Fallbeispiele, Komponenten, Architektur, Qualitätsmanagement, ...)

www.VDI-Mechatroniktagung.de

PAROHA: Konzeptstudie eines Parallelkinematik-Roboter-Handgelenks für spezifische Handhabungsaufgaben in einem MRK-Szenario

PAROHA: Concept study of a parallel kinematic robot wrist for specific manipulation tasks in a co-robot context

Philipp Wabnitz, M.Sc., Dr.-Ing. Andreas Heine, Liang Chen, M.Sc., Dipl.-Ing. Carsten Teichgräber, Univ.-Prof. Dr. Ing. Maik Berger, Technische Universität Chemnitz, Professur Montage- und Handhabungstechnik, 09107 Chemnitz, Deutschland, philipp.wabnitz@mb.tu-chemnitz.de, andreas.heine@mb.tu-chemnitz.de, liang.chen@s2013.tu-chemnitz.de, carsten.teichgraeber@mb.tu-chemnitz.de, maik.berger@mb.tu-chemnitz.de

Kurzfassung

Im Kontext der kollaborierenden Robotik besteht ein Bedarf für Roboterhandgelenke, welche spezielle Anforderungen bei der Zusammenarbeit mit einem Menschen erfüllen müssen. Aufgrund von sicherheitsrelevanten Erwägungen besitzen kollaborierende Systeme oft Beschränkungen hinsichtlich der maximal möglichen Arbeitsgeschwindigkeit, weswegen Aufgaben in kleinen Arbeitsräumen nur vergleichsweise langsam durchführbar sind. Ein vielversprechender Ansatz im Roboterdesign ist deshalb die Verwendung eines weiteren, kleineren Roboters als Handgelenk, welcher in spezifischen Handhabungssituationen diesen Nachteil ausgleicht. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Konzeption, dem Aufbau und der Steuerung eines Handgelenks auf Basis einer Delta-Parallelkinematik, welche an einem kollaborierenden Roboter der Fa. Universal Robots zum Einsatz kommt. Bei dieser ersten Konzeptstudie werden vor allem die Schwierigkeiten bei der Auswahl der benötigten Antriebe, der Umsetzung der Steuerung und der Einhaltung von systembedingt begrenzenden Parametern wie Gewicht und Genauigkeit deutlich.

Abstract

In the context of collaborative robotics, there is a need for robot wrists that have to meet special requirements when working with humans. Due to safety-relevant considerations, collaborating systems often have limitations regarding the maximum possible working speed, which is why tasks in small workspaces can only be carried out to a limited extent. A promising approach in robot design is therefore the use of another, smaller robot as a hand joint, which compensates for this disadvantage in specific handling situations. This paper deals with the conception, design and control of a wrist on the basis of a delta parallel kinematics, which is used on a collaborating robot from Universal Robots. In this first concept study, the difficulties in selecting the required drives, in implementing the control system and in adhering to system-related limiting parameters such as weight and accuracy become clear.

1 Einleitung

Mit der Verwendung kollaborierender Systeme bei Montage- und Handhabungsaufgaben wurde es möglich, Menschen in der Nähe von Robotern arbeiten zu lassen. Dabei kann auf große Teile der zuvor benötigten Sicherheitstechnik verzichtet werden, was eine Integration automatisierter Roboterprozesse in den manuellen Arbeitsablauf eines Werkers ermöglicht. Somit lassen sich beispielsweise kompaktere Montageplätze aufbauen, Arbeitsprozesse verkürzen oder gänzlich neue Handhabungsaufgaben erschließen, welche mit konventioneller Robotik nicht wirtschaftlich umsetzbar wären.

Derzeit kommerziell verfügbare kollaborierende Robotersysteme verfügen über eine serielle kinematische Struktur. Diese führt zwar zu großen Arbeitsräumen, verringert jedoch die erreichbare Steifigkeit und Positionierungsgenauigkeit. Ein weiteres Problem stellen die sicherheitsrelevanten Begrenzungen für die maximalen Verfahrensgeschwindigkeiten und -Beschleunigungen dar. Diese dienen dem Schutz des Menschen bei der Arbeit mit dem

Roboter, wirken sich allerdings nachteilig bei Handhabungsaufgaben aus, welche mit kurzen, schnellen Bewegungen ausgeführt werden können. Einen Lösungsansatz könnten hierbei parallelkinematische Handgelenke darstellen.

2 Stand der Technik

Parallelkinematiken finden sich häufig im industriellen Umfeld bei der Aktuierung von Fingergriffen [1]. Bei Robotern spielen sie abgesehen vom Einsatz des Deltaroboters bei Pick-and-Place-Aufgaben eine eher untergeordnete Rolle.

Eine Kombination aus einem Roboter mit serieller und einem weiteren Roboter mit parallelkinematischer Struktur bietet die Möglichkeit die Vorteile beider Systeme in einem hybriden Roboter zu vereinen. Yeshmukhametov et al. haben bereits eine erste Forschungsarbeit hinsichtlich Aufbau und Kinematik derartiger Systeme vorgestellt, wohingegen Zeng und Fang die strukturelle Synthese und Analyse mittels räumlicher kinematischer Ketten aufgezeigt haben [2][3]. Besonders interessant für die Verwen-

dung an einem Knickarmroboter erscheint hierbei die Deltakinematik dessen kinematische Eigenschaften in der Literatur bereits ausführlich beschrieben sind [4][5][6]. Ziel der vorliegenden Konzeptarbeit soll nun ein funktionsfähiges Modell eines Roboterhandgelenks sein, welches die Nachteile im dynamischen Verhalten kollaborierender Roboter ausgleicht. Hierbei müssen zwangsläufig Parameter wie das maximal zulässige Gewicht am Endeffektor eingehalten werden, weswegen auf eine möglichst leichte Struktur geachtet werden muss. Aufgrund der Verwendung einer Parallelkinematik bezeichnen wir dieses als Parallelkinematik-Roboter-Handgelenk (PAROHA).

3 Konzeption des Handgelenks

Im Folgenden werden zwei Iterationsschritte des Konzepts parallel dargestellt. Die erste Version wird als PAROHA I bezeichnet, wohingegen das Nachfolgemodell mit PAROHA II betitelt wird. Die konstruktive Umsetzung des PAROHA Konzepts unterlag verschiedensten Anforderungen. Hauptkriterium war ein kostengünstiges, leichtes und trotzdem den Belastungen gerechtes Design. So ist die gesamte Konstruktion parametrisch aufgebaut und mit entsprechend wenigen Einzelteilen auf das 3D-Druck-Verfahren FDM (Fused Deposition Modeling) angepasst. Alle zusätzlich notwendigen Kauf- und DIN-Teile sind dem Modellbau-Bereich entnommen.

Der kleine und sehr leichte Deltaroboter setzt sich aus einer zweiteiligen Basis, den Servoarmen, den Koppelstangen und der Endeffektoraufnahme zusammen. Die zweiteilige Basis besteht zum einen aus einem Adapterflansch zur Montage des PAROHA an einen UR5 und zum anderen aus einer Motoraufnahme (siehe **Bild 1**). Durch genaue Tolerierung ist es gelungen, die Motoren ohne zusätzliche Hilfsmittel formschlüssig in der Basis zu integrieren.

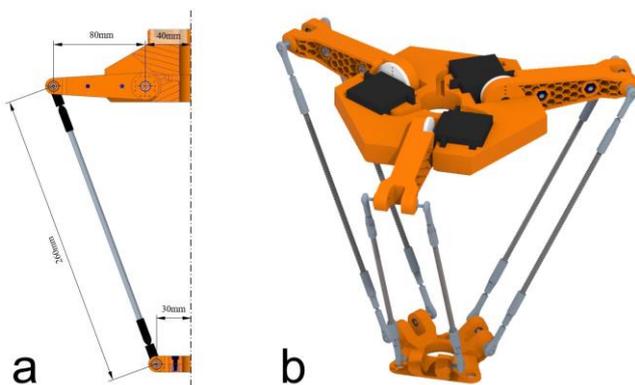


Bild 1 CAD-Konstruktion des PAROHA II. Abmessungen (a) und Rendering ohne Anschlussflansch (b)

Dynamische Handhabungsaufgaben erfordern ein hohes Nutzlast-zu-Gewicht Verhältnis, eine hohe Positioniergenauigkeit sowie hervorragende Steifigkeitseigenschaften. Aufgrund dessen mussten möglichst leistungsfähige Antriebe gefunden werden, welche bei geringen Stück-

kosten hohe Geschwindigkeiten und Traglasten erreichen. Hierfür wurden konventionelle Servomotoren aus dem Modellbausektor verwendet, da diese trotz kleinem Formfaktor hohe Stell- und Haltemomente bei kurzen Stellzeiten aufbringen können und im Gegensatz zu Schrittmotoren eine kompakte Bauform des Handgelenks bei geringen Kosten ermöglichen. Da Digitalservomotoren den eingestellten Nullpunkt präziser anfahren und Metallgetriebe eine längere Lebensdauer bedeuten, wurden im ersten Schritt ES09MD der Fa. Emax ausgewählt. In zweiter Iteration wurde das Handgelenk auf DES707BBMG der Fa. Graupner umgerüstet, da diese zwar einen größeren Bauraum beanspruchen, dafür aber wesentlich höhere Momente erzeugen können (siehe **Tabelle 1**).

Tabelle 1 Auszug aus Datenblättern der Servomotoren

	<i>PAROHA I</i>	<i>PAROHA II</i>
	<i>Emax</i>	<i>Graupner</i>
	<i>ES09MD</i>	<i>DES707BBMG</i>
Abmessungen [mm]	12 x 24,5 x 23	19,5 x 39 x 40
Stellzeit [s/60°]	0,08	0,21
Haltemoment [Ncm]	25	303
Stellmoment [Ncm]	15	150

Die maximale Traglast des UR5 beträgt 5 kg. Die Traglast ergibt sich aus der Summe aus Handgelenkskinematik, Endeffektor und aufgenommenem Werkstück. Zur Gewichtseinsparung war es demnach nötig, die Gestellbauteile und alle weiteren Komponenten möglichst leicht auszulegen. Die Gestellteile, die Servoarme und der Endeffektor des Handgelenks wurden mittels 3D-Druck-Verfahren aus PLA gefertigt (siehe **Bild 2**). Die Servoarme besitzen neben dem Endeffektor die größten bewegten Massen. Um diese möglichst gering zu halten und trotzdem eine ausreichende Steifigkeit zu gewährleisten, kamen hier spezielle Gitterstrukturen, ein Konstruktionsfeature der Software PTC Creo®, zum Einsatz. Die Koppelstangen bzw. die Unterarme des Deltaroboters sind, je nach Baugröße des Roboters, einstellbare Carbon-Stangen bzw. Carbon-Rohre mit Kugelkopfgelenken an beiden Enden. Je nach Größe und Ausführung dieser Gelenke ist auf eine entsprechende Verspannung der Koppelstangen zu achten, damit im Gesamtsystem so wenig wie möglich Spiel herrscht. Aufgrund des ebenfalls gedruckten Flansches nach ISO 9409-1-50-4-M6 stellt ein Anschluss an andere Robotersysteme kein Problem dar [7].

Als Werkzeug wurde ein Sauggreifer der Fa. Schmalz an den Endeffektor des PAROHA befestigt. Die Erzeugung des Vakuums geschieht dabei mit Hilfe eines Ejektors unter Zufuhr von Luftdruck. Der Flansch des Endeffektors erlaubt es auch hierbei auf 3D-gedruckte Strukturen zurückzugreifen und somit das Gewicht auch mit Greifer gering zu halten.

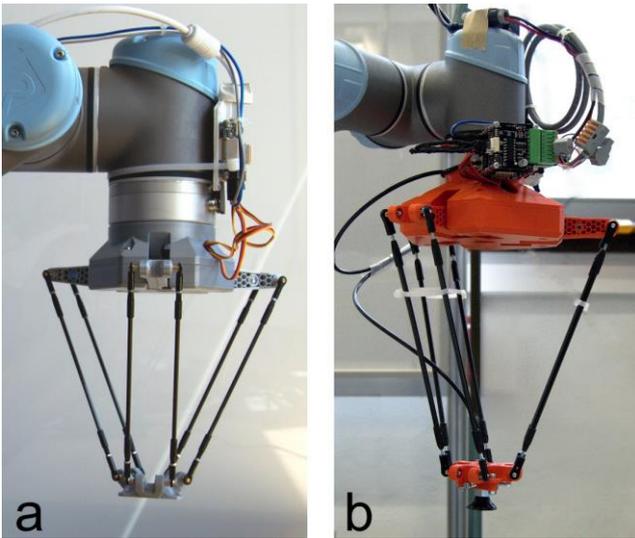


Bild 2 Bild des realen Systems mit Anschluss an den UR5 der Fa. Universal Robots in erster Iteration [PAROHA I] (a) und zweiter Iteration [PAROHA II] (b)

4 Steuerung des Systems

Entscheidend für die Funktionsfähigkeit des Systems ist zum einen die Möglichkeit der Steuerung durch den Menschen und zum anderen die Kommunikation des Deltaroboters mit dem UR5 (siehe **Bild 2**). Aufgrund der eingesetzten Modellbau-Servomotoren ist es möglich auf das Baukastensystem der Fa. Tinkerforge zurückzugreifen (siehe **Bild 4**). Zum Einsatz kommt hierbei ein Servobrick, mit dem bis zu 7 RC Servos mit einem maximalen Strom von 3A per USB angesteuert werden können. Die Vermittlung der je nach eingestellter Positions- und Geschwindigkeitsvorgabe benötigten PWM Signale übernimmt dabei vollständig die Brick interne Firmware. Zusätzlich zum Servobrick verfügt die Steuerung noch über je einen Industrial Digital Input und Industrial Digital Output Bricklet um digitale Signale auszuwerten oder selbst zu schalten. Des Weiteren ist ein Masterbrick angeschlossen, welcher die Erweiterung des Systems um Sensoren oder andere Bricklets erlaubt.

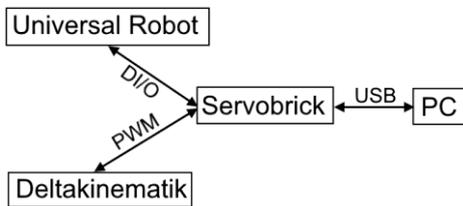


Bild 3 Übersichtsdiagramm des Systems und dessen Schnittstellen

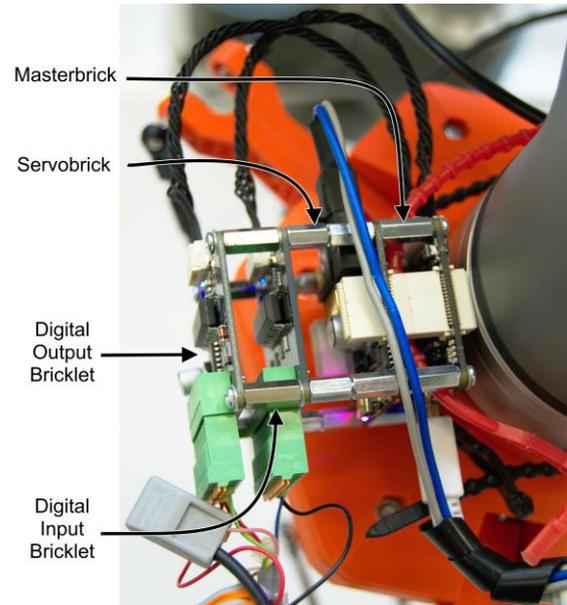


Bild 4 Steuerungskomponenten aus dem Tinkerforge Baukastensystem (PAROHA II)

Auf Seiten des UR5 wird dessen Werkzeug-Schnittstelle des Typs Lumberg RKMV 8-354 verwendet. Diese bietet mit je zwei digitalen Input- und Output-Ports eine einfache Möglichkeit elektrische Signale zu übertragen und somit Vorgänge zu schalten bzw. den aktuellen Zustand des Handgelenks an den UR5 zu kommunizieren. Zwar kann ebenfalls die dort anliegende 12 bzw. 24V Spannungsversorgung genutzt werden, diese bietet jedoch auf Dauer lediglich einen Durchsatz von 600mA, weswegen die Servomotoren extern mit Energie versorgt werden müssen [8].

Als Steuereinheit des Handgelenks kommt ein handelsüblicher PC auf Basis eines Windows- oder Linuxsystems zum Einsatz. Die Tinkerforge Bindings des Servobricks ermöglichen den Zugriff auf die API mittels diverser Hochsprachen. Da das zur Virtualisierung und Visualisierung erstellte Programm mit der Godot Engine erstellt wurde (siehe **Bild 5**), ist die Wahl hierbei auf C# gefallen, da somit die selbe Programmiersprache für die Berechnung der Rückwärtskinematik und für die Ansteuerung der Servomotoren verwendet werden konnte.

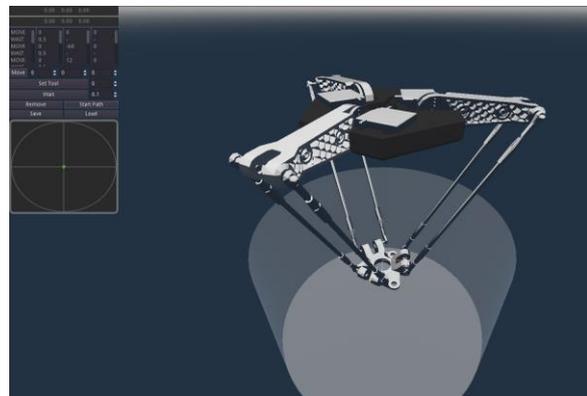


Bild 5 Visualisierung und Teach-In-Programmierung

Um eine Interaktion des Arbeiters mit dem Handgelenk zu ermöglichen und den Teach-In-Prozess zu vereinfachen wurden diverse Möglichkeiten der Eingabe von Steuerbefehlen implementiert. Grundsätzlich kann der Deltaroboter mit Hilfe einer rudimentären Syntax basierend auf den Befehlen MOVE (Verfahrbefehl), TOOL (Werkzeugbefehl) und WAIT (Wartebefehl) programmiert werden. Die direkte oder inkrementelle Positionierung des TCP erfolgt dabei mittels Tastatureingaben. Daneben wurde eine Controllersteuerung entwickelt, mit der die Verfahrgeschwindigkeit mittels Eingabeintensität beeinflusst werden kann und somit eine präzisere Positionierung ermöglicht wird. Vibrationen geben dem Nutzer bei dieser Eingabevariante Rückmeldungen über das Erreichen von Arbeitsraumgrenzen der Kinematik. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die menschliche Hand zur Positionierung einzusetzen. Hierbei ermittelt der Handtracker der Fa. Leap Motion, Inc. die Lage des Handflächenmittelpunktes welcher als Referenzpunkt in Relation zum Sensor gemessen und somit in eine direkte TCP-Eingabe übersetzt wird (siehe **Bild 6**).

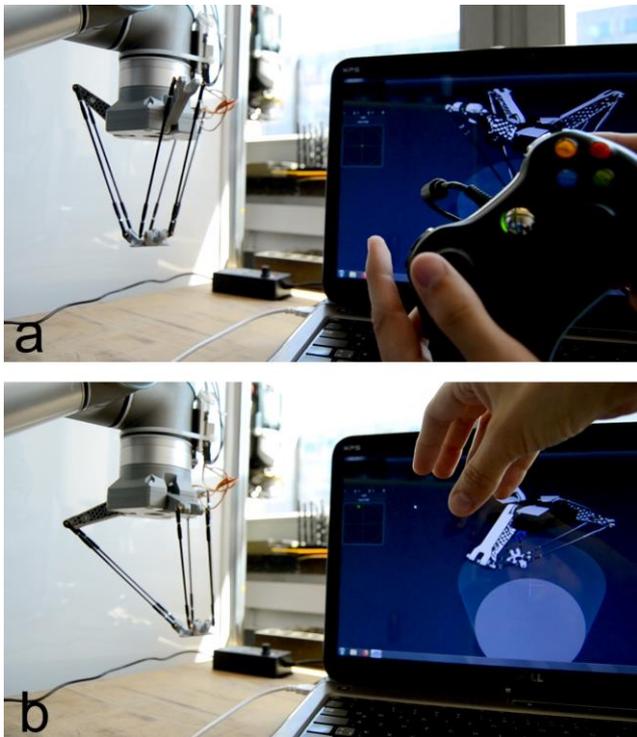


Bild 6 Steuerung mittels Controller (a) und Leap Motion (b) (PAROHA I)

5 Untersuchung in MRK-Szenario

Das vorgestellte Modell soll auf seine Funktionsfähigkeit geprüft werden. Hierbei wird es in einem beispielhaften MRK-TestszENARIO eingesetzt und hinsichtlich seiner systemtechnischen Eigenschaften untersucht.

Im TestszENARIO sind der Mensch und UR5 an einem Arbeitstisch gegenübergestellt. Der Tisch ist in mehrere Zonen eingeteilt, in denen unterschiedliche Handhabungsaufgaben stattfinden (siehe **Bild 7**). In der Pick-and-Place-

Zone (1) platziert der Deltaroboter die einzelnen Bauteile einer Baugruppe in einer vorgegebenen Reihenfolge in eine Montagehilfe. Diese wird dann in die Transferzone (2) bewegt, indem das PAROHA seine Nullposition beibehält und der UR5 dessen Sauggreifer als Werkzeug nutzt. Anschließend entnimmt der Arbeiter die Montagehilfe aus der Transferzone und fügt die Baugruppe (siehe **Bild 8**) innerhalb des eigenen Arbeitsraums (3). Nachdem die Baugruppe wieder in die Transferzone gelegt wurde, gibt der Mensch das Signal für den Roboter diese in die Ablagezone (4) zu transportieren. Während des Fügevorgangs bereitet der Deltaroboter eine weitere Baugruppe zur Montage vor. Der reale Versuchsaufbau ist in **Bild 9** dargestellt.

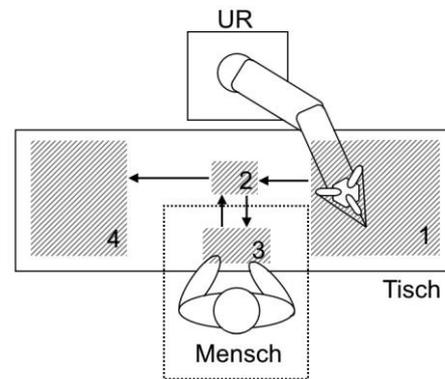


Bild 7 Schematischer Versuchsaufbau. Pick&Place-Zone (1), Transferzone (2), Menschlicher Arbeitsraum (3) und Ablagezone (4) wurden gekennzeichnet

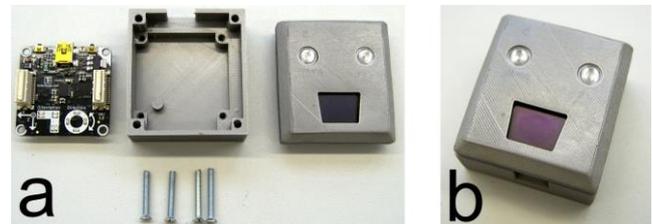


Bild 8 Bauteile (a) und montierte Baugruppe (b)

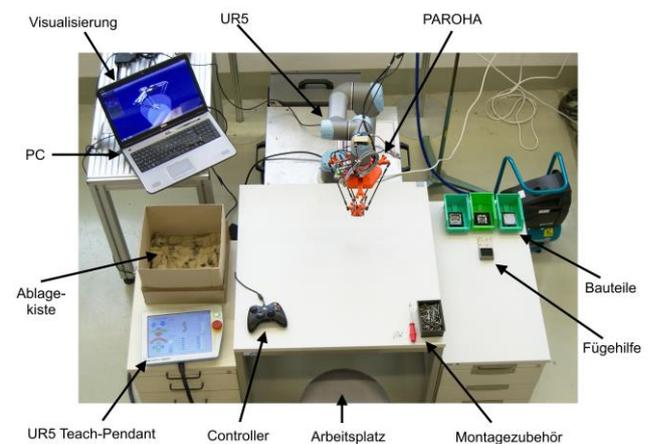


Bild 9 Realer Versuchsaufbau mit PAROHA II

6 Ergebnisse

Die Aufgabe im Testszenario konnte mit dem PAROHA II erfolgreich durchgeführt werden. Die Bauteildimensionen der Baugruppe waren jedoch derart klein, dass es einer exakten Vorpositionierung der Fügehilfe bedurfte, um der durch das Getriebespiel bedingten Positionsungenauigkeit entgegen zu wirken.

Das PAROHA I ist zwar mit seinen 300g Gesamtgewicht wesentlich leichter als das Nachfolgemodell PAROHA II mit knapp 700g, jedoch ist das vor allem auf die mit 54g dreieinhalb-fach schwereren Servomotoren zurückzuführen. Diese erbrachten dafür auch die nötige Leistung, um die Bauteile aufzunehmen und kontrolliert bewegen zu können. Ab 100g Bauteilgewicht bilden sich beim PAROHA I Schwingbewegungen aus, da die Haltekraft der Servomotoren nicht ausreicht um den dynamischen Belastungen am Endeffektor entgegen zu wirken. Das PAROHA II hat hingegen auch bei 2 kg Lastwirkung eine vorgegebene Position anfahren können, wengleich hierbei die Leistungsgrenzen der Motoren hörbar erreicht werden (siehe **Tabelle 2**).

Tabelle 2 Systemeigenschaften in der Übersicht

	PAROHA I	PAROHA II
Gewicht [kg]	0.3	0.7
Lastmaximum [kg]	0.1	2.0
Nutzlast-zu-Gewicht	0.33	2.85
Winkelgeschwindigkeit [°/s]	837	314
Wiederholgenauigkeit [mm]	± 5	± 5

Bei einer schnellen Verfahrbewegung des UR5 während das PAROHA die Montagehilfe gegriffen hat, wirkt sich die gegriffene Masse aufgrund der einsetzenden Fliehkräfte verstärkt auf die Kinematik aus. Hierbei kommt es bei großen Lasten nahe der maximalen Traglast des Handgelenks zu einem Schwingen des Endeffektors, da die Servomotoren versuchen ihre Position zu halten, jedoch durch die dynamisch wirkenden Kräfte wieder in entgegengesetzte Richtung belastet werden. Dies verringert die Genauigkeit der Positionierung des TCP bei derartigen Manövern zusätzlich.

Es zeigt sich außerdem, dass Servomotoren aus dem Modellbaubereich trotz einer sorgfältigen Kalibrierung aufgrund ihres hohen Getriebespiels lediglich eine Wiederholgenauigkeit im Millimeterbereich erreichen. Dies ist für Handhabungsaufgaben, die einer hohen Präzision bedürfen von Nachteil.

Zum jetzigen Zeitpunkt sind noch keine weiteren Sicherheitsaspekte implementiert, mit Ausnahme, dass sich der kollaborierende Roboter nur dann bewegt, wenn sich die Deltakinematik im Stillstand befindet – und umgekehrt. Bei einem Eingriff des Menschen in den Arbeitsraum des PAROHA kann es zu Verletzungen kommen. Dementsprechend sollten optische Messsysteme oder Vorhersagealgorithmen zum Einsatz kommen, wie sie beispielsweise Mainprice und Berenson vorgestellt haben [9].

7 Zusammenfassung

Es wurde ein Parallelkinematik-Roboter-Handgelenk im Rahmen einer Konzeptstudie für die Verwendung an einem kollaborierenden Roboter entwickelt und in einem Testszenario untersucht. Das geringe Gewicht, die Stabilität und erreichbare Geschwindigkeit sind vielversprechende Faktoren für die Verwendung bei spezifischen, hochdynamischen Handhabungsaufgaben. Es konnte gezeigt werden, dass mit günstigen Antrieben und Steuerungskomponenten bereits ein funktionsfähiges Modell erstellt werden kann. Die kostengünstige Mechanik bildet dabei die Basis für den Einsatz als Forschungsmodell im Bereich hybrider Robotersysteme.

Auf dem vorgestellten Konzeptmodell aufbauend, kann ein kinematisch und konstruktiv optimiertes Handgelenk entwickelt werden, welches im industriellen Umfeld eingesetzt werden könnte. Hierzu sind allerdings noch weitergehende Fragestellungen hinsichtlich der Sicherheit beim Einsatz in MRK-Szenarien zu bearbeiten.

Abgesehen davon sehen die Autoren auch im Bereich der Lehre Chancen für eine weitergehende Verwendung.

8 Literatur

- [1] Birglen, L., und Schlicht, T.: *A statistical review of industrial robotic grippers*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 49 (2018): S. 88-97.
- [2] Yeshmukhametov, A., et al. *Design and kinematics of serial/parallel hybrid robot*. Control, Automation and Robotics (ICCAR), 2017 3rd International Conference on. IEEE (2017).
- [3] Zeng, Q., und Fang, Y.: *Structural synthesis and analysis of serial-parallel hybrid mechanisms with spatial multi-loop kinematic chains*. Mechanism and Machine Theory 49 (2012): S. 198-215.
- [4] Clavel, R.: *Delta, a fast robot with parallel geometry*. Proceedings of the 18th International Symposium on Industrial Robots, Lausanne, Frankreich, 26-28 April 1988, S. 91-100.
- [5] Carp-Ciocardia, D. C.: *Dynamic analysis of Clavel's Delta parallel robot*. Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on. Vol. 3. IEEE (2003)
- [6] López, M., et al. *Delta robot: inverse, direct, and intermediate Jacobians*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science 220.1 (2006): S. 103-109.
- [7] ISO 9409-1:2004. *Manipulating industrial robots - Mechanical interfaces - Part 1: Plates*
- [8] Universal Robots: *UR5 / CB3 - Version 3.8 - Original instructions (en)*. Universal Robots A/S. (2018). S. I-38f
- [9] Mainprice, J., und Berenson, D.: *Human-robot collaborative manipulation planning using early prediction of human motion*. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE (2013).