

# Vorentwicklung eines automatischen Kommissioniersystems für die dezentrale Kommissionierung

Advance development of an automatic picking system for decentralized order picking

*Kim Schwäke  
Ilja Dick  
Rainer Bruns*

*Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik (MTL)  
Fakultät für Maschinenbau  
Helmut-Schmidt-Universität  
Universität der Bundeswehr, Hamburg*

**D**er vorliegende Beitrag befasst sich mit der Vorentwicklung und ersten Integration der Komponenten eines automatischen Kommissioniersystems für die dezentrale Kommissionierung. Neben der Vorstellung der geleisteten Entwicklungsschritte für die einzelnen Module wie Bildverarbeitung, Fahrzeug und Greifer wird auf die übergeordnete Gesamtsteuerung des Systems eingegangen.

*[Schlüsselwörter: Automatische Kommissionierung, Bildverarbeitung, Greiftechnik]*

**T**he present article deals with the predevelopment and first integration of the components of an automatic picking system for decentralized picking. In addition to the presentation of the development steps for the individual modules such as image processing, vehicle and gripper, the superior system control is discussed.

*[Keywords: Automatic picking, gripping technique, image processing]*

## 1 EINLEITUNG

In der Industrie und Wirtschaft nimmt der Grad der Automatisierung stetig zu. Deren Auswirkungen sind in zahlreichen Bereichen mit positiven Potentialentwicklungen spürbar, unter anderem in der Intralogistik. Der Einsatz von Technologien wie Robotern und automatisierten Systemen vermehrt in Verbindung mit künstlicher Intelligenz ermöglicht die Erhöhung der Effizienz bei gleichzeitiger Senkung des Kostenfaktors Personal. Güter können somit schneller, günstiger und ganztägig verarbeitet werden. Ein Teilbereich der Intralogistik entzieht sich weitestgehend dieser Entwicklung: die Kommissionierung. Dieser Vorgang ist hochkomplex und erfordert auf Grund der Hetero-

genität der zu greifenden Artikel kognitive Fähigkeiten sowie adaptive Greifwerkzeuge. Dies sind die Ursachen für das hohe Personalaufkommen, das gleichbedeutend mit hohen Kosten ist, in einem sonst stark automatisierten Wirtschaftszweig. Daher liegt der aktuelle Fokus der Forschung auf der Entwicklung technologischer Komponenten, die den Einsatz (voll-) automatisierter Kommissioniersysteme ermöglichen.

## 2 VORSTELLUNG DES GESAMTSYSTEMS

In diesem Beitrag wird ein vollautomatischer Kommissionierroboter präsentiert, der in dem Bereich der dezentralen Kommissionierung mit statischer Bereitstellung eingesetzt werden soll. Der Kommissionierroboter (Ko-Rob) besteht aus einem fahrerlosen Transportfahrzeug mit montiertem Leichtbau-Knickarm-Roboter, an dem Endeffektor und Kamerasystem installiert wurden. Der Kommissionierroboter arbeitet in einem definierten Kommissionierbereich autonom Kommissionieraufträge ab. Dazu ermittelt er nach Erhalt der Auftragsliste die bestmögliche Reihenfolge der Kommissionierung, bevor er die Warenlagerorte anfährt. Durch optische Bilderkennung mit einer Stereokamera wird der optimale Greifpunkt des jeweiligen Objekts bestimmt, bevor dieses mit dem pneumatisch betriebenen Greifer der Bereitstellungseinheit entnommen und in die Transporteinheit des Roboters überführt wird. Nachdem alle zu dem Auftrag gehörigen Artikel kommissioniert wurden, fährt der Roboter eine Entladeposition an, an der die Transporteinheit entnommen und weiterverarbeitet wird.

### 2.1 KOMMISSIONIERZONE

Das Kommissioniersystem soll in jeder Kommissionierzone für dezentrale Kommissionierung mit statischer Bereitstellung eingesetzt werden können. Daher wurde

Wert daraufgelegt, dass das System mit nur geringen Veränderungen in die jeweils bestehende Umgebung integriert werden kann. Dadurch wird eine skalierbare Automatisierung des Lagers ermöglicht.

Zur Erprobung des Systems wurde eine 5 m lange Kommissionierzone aufgebaut (siehe Abbildung 1). In den Regalen zu beiden Seiten des Ganges, in dem das Fahrzeug fährt, werden die Artikel auf zwei Ebenen sortenrein und einzeln durch Trays getrennt in Bereitstellungseinheiten gelagert. Die Regalebenen sind zum Gang hin um 30 ° geneigt und gegeneinander versetzt, um das Kommissionieren zu erleichtern.



Abbildung 1. Kommissionierzone

## 2.2 SORTIMENT

Das Sortiment in der Kommissionierzone besteht aus 10 Artikeln unterschiedlicher Form, Oberfläche und Masse (siehe Abbildung 2). Die Auswahl der Artikel wurde angelehnt an eine vorhergegangene Clusteranalyse [ISE13] getroffen, so dass mindestens ein Artikel je Cluster im Sortiment zu finden ist:

- Cluster 1: Quaderförmige, wenig nachgiebige Artikel
- Cluster 2: Zylindrische, leichte Artikel
- Cluster 3: Flache, leichte Artikel mit komplexer Geometrie
- Cluster 4: Quaderförmige, große Artikel
- Cluster 5: Konvolute Artikel

- Cluster 6: Zylindrisch, schwere Artikel



Abbildung 2. Sortiment

Die Artikel weisen eine Masse von bis zu 1,5 kg und eine maximale Abmessung von 300 mm auf. Um die Greifbarkeit zu gewährleisten, wurde eine minimale Kantenlänge von 10 mm nicht unterschritten.

## 3 FAHRZEUG

Das Fahrzeug ist als Bestandteil des automatischen Kommissioniersystems ein fahrerloses Transportfahrzeug. In diesem Versuchsaufbau sind auf beiden Seiten des Fahrzeugs sowohl auf der Vor- wie auch auf der Rückseite Führungsrollen angebracht, die ggf. eine Kollision zwischen dem Fahrzeug und den Regalen verhindern sollen. Da die beiden angetriebenen Räder synchron angesteuert werden, fährt das Fahrzeug freilaufend und ein Kontakt zwischen den Führungsrollen und dem Regal ist bis jetzt nicht aufgetreten.

In bzw. an dem Fahrzeug sind alle notwendigen Hard- und Softwarekomponenten des KoRobs untergebracht. Dies beinhaltet unter anderem die Steuerungseinheiten für die Positionierung anhand eines Laserabstandssensors, die Bilderkennung anhand einer Stereokamera, den Bewegungsablauf und das Greifen inklusive pneumatischer Ventile.

Um alle Einzelsysteme des KoRobs unabhängig voneinander entwickeln zu können, besitzt jedes von ihnen eine eigene Steuerung, die von der Gesamtsteuerung koordiniert wird. Dazu wird das Robot Operation System (ROS) eingesetzt. Der Grundgedanke dieses Software-Frameworks ist die Arbeitsteilung. Eine serviceorientierte Struktur ermöglicht das Entwickeln autonomer Lösungen, deren Kooperation von der ROS-Grundstruktur koordiniert wird.

Die Steuerung der Antriebe basiert auf einem Mikrocontroller, einem Arduino Mega 2560. Zur Regelung der Antriebe wurde eine Kaskadenregelung mit drei ineinander geschachtelten Regelkreisen als Basis verwendet. Der innerste Regelkreis ist ein Stromregelkreis. Dieser ist in einem Geschwindigkeits- bzw. Drehzahlregelkreis enthalten. Der übergeordnete Regelkreis ist ein Positionsregelkreis.

Die beiden inneren Kreise laufen auf den Steuerungseinheiten (SE) automatisch ab. Die Positionsregelung wird, unterstützt durch einen Lasersensor (LS), von dem Mikrocontroller (MC) übernommen, der Geschwindigkeitssollwerte an die Steuerungseinheiten übergibt. Der Mikrocontroller ist mit dem auf dem Fahrzeug verbauten PC verbunden, womit eine Anbindung an die Gesamtsteuerung gewährleistet ist. Folgende Abbildung 3 zeigt den Aufbau.

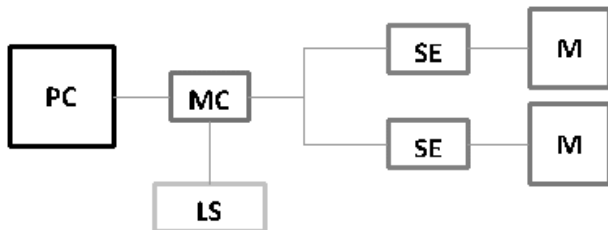


Abbildung 3. Aufbau des Antriebsstrangs

Die Regelung besteht aus einem Feedforward-Anteil (Vorsteuerung), um ausreichende Stabilität und Schnelligkeit zu gewährleisten und einem Feedback-Anteil, um eine genaue Positionierung realisieren zu können. Die Feedforward-Regelung berechnet den Fahrvorgang des Greiferfahrzeugs als Trapezverlauf.

Der zur Positionsbestimmung verwendete Laserabstandssensor ist ein SICK DT50 mit einem Messbereich von 200 bis 5000 mm bei einem Remissionswert von 6 %. Der Laser kann die Messstrecke millimetergenau auflösen. Durch den Einsatz des Mikrocontrollers, der eine Auflösung der seriellen Signale in 1024 bit bei einem Rauschen von 5 bit ermöglicht, steht für die gesamte Messstrecke von 5000 mm nur diese Auflösung zur Verfügung. Folglich schwankt die Positionierung des KoRobs um mehr als 10 mm. Um ein anhaltendes Nachkorrigieren der Steuerung zu vermeiden, wurde ein Toleranzbereich der Positionierung von  $\pm 30$  mm eingeführt. Diese Abweichung von der idealen Positionierung ist durch den Roboterarm und den Greifer problemlos ausgleichbar.

Zur Sicherheit wurde an der Vorder- und Rückseite des Fahrzeugs jeweils ein federgelagerter Anfahrerschutz angebracht. Bei Berührung mit einem Hindernis wird ein Notstop der Motoren initiiert, der erst durch eine manuelle Eingabe wieder aufgehoben werden kann. Dadurch wird sichergestellt, dass keine Menschen durch das Fahrzeug verletzt werden.

Wie auf Abbildung 1 zu sehen, erfolgt die Versorgung des KoRobs durch Strom und Druckluft im derzeitigen Versuchsstand stationär. Für den zukünftigen Einsatz ist es jedoch geplant, die Versorgung durch einen Drucklufttank und Akkuzellen in das Fahrzeug zu integrieren und an einem Ende der Kommissionierzone eine Ladestation einzurichten, die der KoRob bei Bedarf anfahren kann.

## 4 KAMERA

Um die zu kommissionierenden Objekte Greifen zu können, muss deren relative Position und Orientierung zum Roboter bestimmt werden. Die für diese Berechnungen zugrunde gelegten Daten werden mit einer aktiven Stereokamera gesammelt. Die Wahl dieser Technologie ist mit den Gegebenheiten des Einsatzszenarios begründet. Neben der reinen Punktwolke, wie sie bei Laser-Mess-Systemen erstellt wird, kann hier zusätzlich auf Texturen der Kamera bildsensoren zugegriffen werden. Dies ist insbesondere beim Identifizieren von Objekten ein großer Vorteil. Zugleich soll an dieser Stelle aber auch der Nachteil klar benannt werden. Das Messen/ Erstellen einer Punktwolke benötigt deutlich mehr Zeit als bei einem Laser-Mess-System. Vor allem die Berechnung der Disparitäten nimmt vergleichsweise viel Zeit in Anspruch.

Die Tiefeninformationen gewinnt die Stereokamera durch ihr zweites „Auge“, indem sie die oben erwähnte Disparität eines Punktes zwischen den beiden Bildsensoren misst. Dafür muss der Punkt in beiden Sensoren eindeutig identifiziert werden. Er muss also stark individuelle Merkmale aufweisen. Möchte man eine Fläche messen, so müssen sehr viele solcher Punkte vorhanden sein bzw. gefunden werden. Bei glatten Oberflächen, wie sie bei Regalen oder Bereitstellungseinheiten (Boxen) üblich sind, ist das Erstellen einer Punktwolke mit einer Stereokamera also so gut wie unmöglich. Deswegen kommt ein aktiver Part in Form eines Projektors zum Einsatz. Der Projektor projiziert ein Muster im Infrarotbereich auf den zu vermessenden Bildausschnitt, wodurch eine Vielzahl an individuellen Punkten künstlich erzeugt wird.

Grundsätzlich kann durch entsprechende Ausrichtung und Kalibrierung auch ein Laser-Mess-System mit einer zusätzlichen Monokamera die gewünschten Informationen als Punktwolke und Textur liefern. Auch eine Arbeitsteilung durch den Einsatz mehrerer Sensoren ist denkbar. Dabei müssen jedoch der Kostenaspekt und der Aufwand für die Integration der Sensoren beachtet werden. Unser Konzept eines Kommissionierroboters kommt daher mit nur einer einzigen aktiven Stereokamera aus. Aufgrund der Baugröße, der Messgenauigkeit und der Möglichkeit die Kamera auf unseren Arbeitsbereich einstellen zu können, verwenden wir eine Ensensio N35. Das Anpassen an den Arbeitsbereich erfolgt insbesondere durch die Wahl der passenden Objektive, sowie die Einstellung des Vergenzwinkels der beiden Bildsensoren.

### 4.1 POSITIONIERUNG

Die Messwerte der Kamera, Koordinaten der Punkte einer Punktwolke, liegen im Kamera-Koordinatensystem vor. Die Entfernung eines Punktes wird also relativ zu, in diesem Fall dem Ursprung des linken Bildsensors der Kamera, angegeben. Soll daraus ein Greifpunkt für den Roboter bestimmt werden, so müssen die Koordinaten in geeigneter Weise in das Roboter-Koordinatensystem überführt

werden. Dafür wird ein gemeinsamer Referenzpunkt für die beiden Teilsysteme benötigt.

Grundsätzlich lässt sich so ein gemeinsamer Referenzpunkt auf zwei Arten realisieren. Die erste Variante besteht darin ein globales (Welt-)Koordinatensystem einzuführen. Für die Koordinatentransformation müssen dann die Orientierung und der Translationsvektor des Kamera-KS und des Roboter-KS zum globalen-KS bestimmt werden. Bei diesem statischen System müsste jedes Fach mit einer Kamera ausgestattet oder eine Vorrichtung zum Verfahren der Kamera installiert werden. Das Ausstatten jedes Faches mit einer Kamera kann aus Kostengründen verworfen werden. Bei der verfahrenbaren Vorrichtung müsste nach jedem Fahrvorgang die Position sehr genau gemessen werden. Bereits kleine Abweichungen bei der Messung würden zu unbrauchbaren Ergebnissen führen.

Die erste Variante lässt sich in der Weise modifizieren, dass das globale-KS in den Ursprung eines der beiden Teilsysteme gelegt wird. Dadurch erhält man eine relative Transformationsbeziehung zwischen dem Roboter und der Kamera. Die Position der Kamera muss jedoch so gewählt sein, dass die Kamera den Inhalt der Bereitstellungseinheiten in den Regalen links und rechts aber auch oben und unten vollständig erfassen kann. Dies wäre nur mit einem erhöhten und unpraktikablen Aufwand verbunden.

Die zweite Variante, die auch gewählt wurde, sieht einen mobilen Einsatz der Kamera vor. Die Kamera wird auf dem „Handgelenk“ des Knick-Arm-Roboters positioniert. So kann die Kamera stets in eine gute Aufnahmeposition über eine Bereitstellungseinheit gebracht werden. Der gemeinsame Referenzpunkt wird in diesem Fall auf den tool-center-point (TCP) des Knick-Arm-Roboters gelegt. Der Abstand und die Orientierung des gewählten Referenzpunktes zur Kamera bleibt hierbei immer gleich und kann über ein Kalibrierverfahren bestimmt werden. Die Position des TCP ändert sich jedoch bei jeder Bewegung des Knick-Arm-Roboters. Die Position und Orientierung zur Roboter-Basis kann jedoch mit Hilfe der Winkelstellungen der Gelenke und mit den geometrischen Daten des Roboters über die Vorwärtskinematik berechnet werden.

Zu beachten ist noch, dass die Kamera am vorletzten Glied des Knick-Arm-Roboters befestigt ist. Damit kann der Greifer durch Rotation ausgerichtet werden, ohne dass die Kamera mitgedreht wird und dadurch in eine ungünstige, kollisionsgefährdete Position gebracht wird. Die Rotation des letzten Gliedes bestimmt jedoch die Orientierung des TCP. Bei der Koordinatentransformation vom Kamera-KS in das Roboter-KS muss die Orientierung des TCP stets bei gleicher Gelenkwinkelstellung des letzten Roboter-gelenks ausgelesen werden. Dies ist die gleiche Winkelstellung, die auch beim Kalibriervorgang gewählt wurde.

## 4.2 INTEGRATION

Für die Ensenso wird eine NxLib C/C++ API bereitgestellt, mit der die Ansteuerung der Kamera und das Auslesen der Bilddaten über ein C++ Programm erfolgen kann. Des Weiteren existieren inoffizielle grabber für das Robot Operating System (ROS) mit denen die Kamera direkt in ROS integriert werden kann. Obwohl ROS einen wesentlichen Bestandteil bei der Softwareentwicklung des Kommissionierroboters darstellt, haben wir uns gegen die grabber-Variante entschieden. Stattdessen nutzen wir die NxLib-Bibliothek um mit der Kamera direkt zu interagieren. Dadurch können die Kameraeinstellungen situationsabhängig angepasst und ein ressourcenschonender Betrieb ermöglicht werden.

Im Gegensatz zu der grabber-Variante nimmt die Kamera nicht kontinuierlich, sondern nur auf Anweisung Bilder auf und vermisst damit die Objekte. Wie bereits angesprochen nimmt die Berechnung der Disparitäten viel Zeit in Anspruch. Beim Erstellen einer Punktwolke werden nicht nur gemessene Werte aufgenommen, sondern je nach Einstellung mehr oder weniger Punkte interpoliert. D.h. die Punktwolke, die zum Auswerten der Szene vorliegt, entspricht nur zu einem gewissen Prozentsatz der Realität. Um ein besseres Messergebnis zu erhalten, besteht eine Aufnahme aus 2x8 Einzelaufnahmen, bei denen das projizierte Muster jeweils minimal verschoben ist. Dadurch erhält man mehr real gemessene Punkte, was sich gerade auf Konturgrenzen positiv auswirkt. Durch diesen Mehraufwand erreicht die Kamera jedoch nur eine Framerate von ca. 0,3 Bildern pro Sekunde. Damit ist eine kontinuierliche Aufnahme, gerade während einer Bewegung des Roboters, eine Ressourcenverschwendung, da die Bilder viel zu verschwommen für eine Auswertung sind.

## 5 GREIFER

Der Greifer stellt in der Kommissionierung eine Schlüsselkomponente dar. Im Gegensatz zu den vielfach erprobten Endeffektoren aus der Produktion, müssen Greifer in der Logistik vielseitig einsetzbar sein. Durch Vorversuche wurde in Anlehnung an die menschliche Hand ein dreigliedriger Dreifingergreifer als Endeffektor ausgewählt.

### 5.1 AUFBAU

Als Aktoren dienen pneumatisch betriebene Bälge aus Elastomeren, die in der Abbildung 4 in blau dargestellt sind. Erfahren diese Aktoren einen Innendruck, wird dieser in eine Biegung umgesetzt. Durch eine definierte Änderung des Innendrucks kann ein gewünschter Winkel eingestellt werden. In jedem Finger sind drei unterschiedliche Aktoren verbaut, die drei Finger sind baugleich. Artgleiche Aktoren aller Finger werden von einem Ventil gesteuert, so dass für einen Greifer unabhängig von der Anzahl der Finger immer drei Ventile benötigt werden.

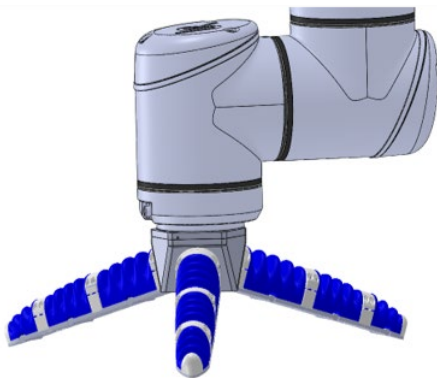


Abbildung 4. Aufbau des Dreifingergreifers

Die einzelnen Aktoren werden durch Aluminium-Schellen miteinander verbunden und an der 3D-gedruckten Versteifung aus Polypropylen befestigt. Die Versteifung, die mechanische Gelenke beinhaltet, ist an der Greiffläche mit Lamellen aus einem Elastomer ausgestattet, um den Reibungskoeffizienten zu erhöhen. Die Versteifung weist auf ihrer Kontur eine Phase von  $45^\circ$  auf, der die Lamellen folgen. Damit wird die Kontaktfläche beim Greifen quaderförmiger Objekte erhöht.

## 5.2 SIMULATION

Zur Feststellung der erforderlichen Geometrie der Aktoren wurden in einem MKS-Modell (siehe Abbildung 5) zunächst die Winkel aller Gelenke für das Greifen unterschiedlichster Artikel bestimmt. Der Greifprozess wurde dabei dem menschlichen Verhalten nachempfunden. Das proximale Gelenk (Gelenk 1), das sich am nächsten an der Handbasis befindet, soll dabei zuerst zustellen und einen größeren Winkel erreichen als das mediale Gelenk (Gelenk 2), das wiederum vor dem distalen Gelenk (Gelenk 3) zugestellt wird, das die kleinsten Winkel erreicht.

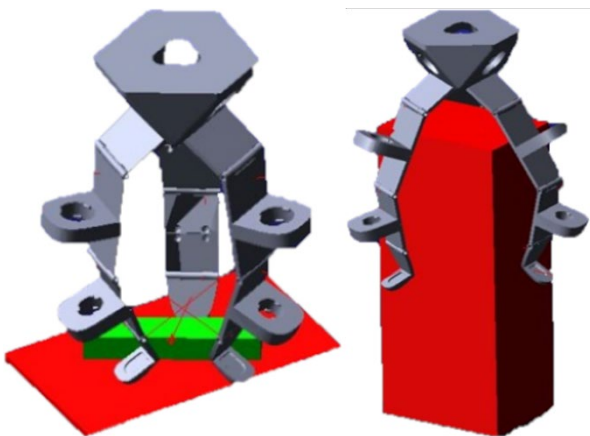


Abbildung 5. MKS-Modell

Für die Herstellung der Aktoren standen zwei Elastomere zur Verfügung, deren Eignung als Werkstoff für Balgaktoren in vorherigen Arbeiten erwiesen worden war: Polyurethan [ISE14] mit Shorehärte A70 und Silikon [ULR18] mit Shorehärte A40. Mittels einer FE-Berechnung wurde verifiziert, ob die konstruierten Balgaktoren aus beiden Werkstoffen die geforderten Winkel erreichen. Anschließend wurden die Aktoren im Handgussverfahren hergestellt und in Greifversuchen erprobt.

## 5.3 GREIFVERSUCHE

Als Vorversuche wurden anhand eines Fingers der erreichte Winkel sowie die Kraft in Abhängigkeit des Drucks gemessen. Die Ergebnisse des ersten Vorversuchs sind in Abbildung 6 dargestellt. Diese Daten bestätigen das durch die Simulationen erwartete Ergebnis. Die erreichten Winkel verringern sich von Gelenk 1 bis zu Gelenk 3, wodurch die Anforderung aus 5.2 erfüllt wurde. Des Weiteren lässt sich aus der Abbildung erkennen, dass wie errechnet die Aktoren aus Polyurethan bei gleichem Druck einen geringeren Winkel erzeugen als die Silikon-Aktoren. Dies lässt sich auf die höhere Härte des Werkstoffs zurückführen.

Die Summe der Winkel der Silikon-Balgaktoren sind bei 1,57 bar größer als  $90^\circ$ , womit sichergestellt ist, dass die Finger sich bei der vorgesehenen Anordnung (siehe Abbildung 4) im zusammengefahrenem Zustand an den Spitzen berühren.

Größere Winkel konnten in diesen Vorversuch nicht erreicht werden, da sich die Verbindungen zwischen den Aktoren, bei höherem Druck lösten. Dadurch wurde einerseits eine Überbelastung der Aktoren verhindert, andererseits konnten die Aktoren nicht bis an ihre Belastungsgrenze getestet werden.

Ein zweiter Vorversuch wurde zur Bestimmung der Kraft eines Greiferfingers in Abhängigkeit des Drucks durchgeführt. Dazu wurde ein Finger flach auf einem Kraftaufnehmer montiert, so dass keine Biegung des Fingers möglich war. Die Balgaktoren erfuhren dabei alle den gleichen Innendruck. Die Kraft wurde an der Fingerspitze gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt. Für das Greifen der Artikel werden ca. 15 N benötigt. Bei drei Fingern und einem angenommenen Reibungskoeffizienten von 0,3 erhält man eine benötigte Kraft von ca. 15 N pro Finger. Diese Kraft wurde in beiden Vorversuchen auf Grund des Lösens der Verbindungen nicht erreicht. Allerdings stellt man bei den PU-Aktoren einen annähernd linearen Druckanstieg bis 2,15 bar fest, während die Silikon-Aktoren sich nur bis 0,6 bar linear verhalten.

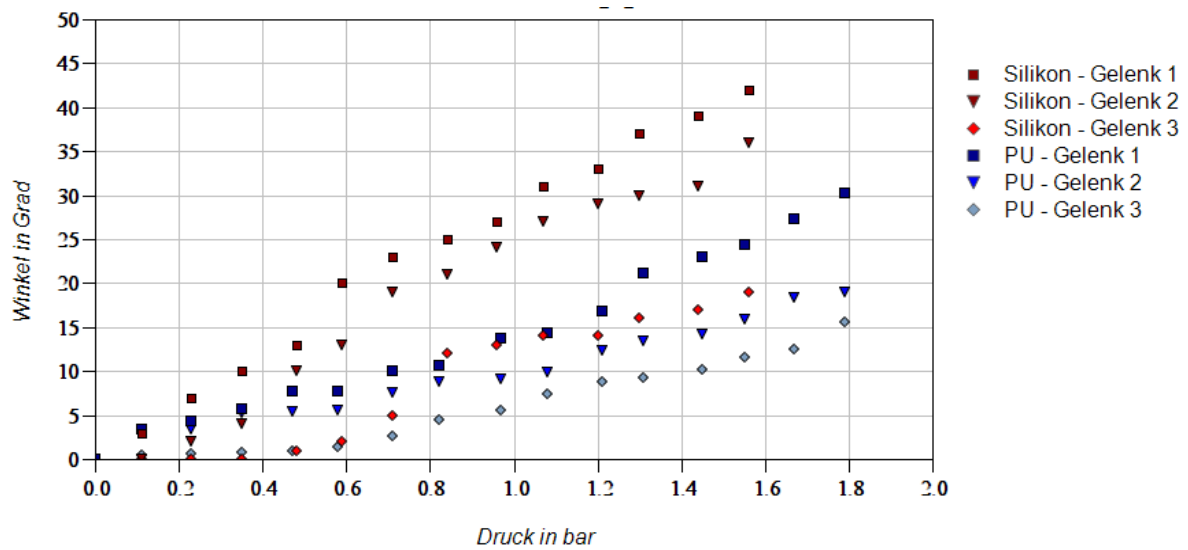


Abbildung 6. Winkel in Abhängigkeit des Drucks

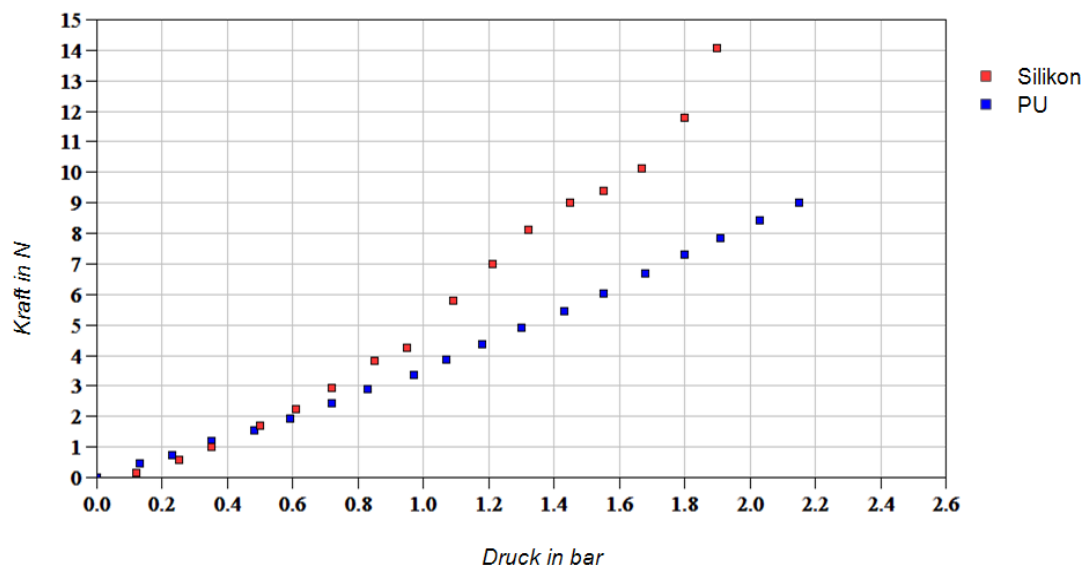


Abbildung 7. Kraft in Abhängigkeit des Drucks

Aufgrund dieser Vorversuche wurde davon ausgegangen, dass bei einer Verstärkung der Aktorverbindung ein Greifer aus PU bei gleichen Winkeln sehr viel höhere Kräfte aufbringen könnte als ein Greifer aus Silikon. Nach der Fertigung neuer Verbindungen wurden die Versuche mit den PU-Aktoren wiederholt, wobei eine starke Alterung des Materials festgestellt wurde. Die Aktoren sind versprödet, so dass eine große Differenz zu den initial gemessenen Werten festgestellt wurde. Bei einem Druck von 1,8 bar bildeten sich Risse in den Aktoren aus. Somit wurde der Werkstoff für diese Anwendung als untauglich deklariert und nur der Silikongreifer weiterverwendet.

Für den Silikongreifer wurden im Weiteren die Fingerpositionen an der Handbasis sowie die artikelspezifischen Greifpunkte und -aktordrücke sowie Anfahrtswege bestimmt. Die drei letzteren Punkte sind für jeden Artikel unterschiedlich. Während einige Artikel eine große Robustheit hinsichtlich dieser Kriterien aufweisen, beispielsweise ist der Greifpunkt zylindrischer Artikel in der z-Achse verschiebbar (vgl. Abbildung 8 links), sind die Größen bei anderen Artikeln in einem sehr engen Rahmen zu definieren, um ein erfolgreiches Greifen durchzuführen (vgl. Abbildung 8 rechts).

Das erfolgreiche Greifen wurde erfüllt, wenn der Artikel in 20 aufeinanderfolgenden Versuchen kommissioniert

wurde. Er wurde folglich, ohne sich aus dem Greifer zu lösen, aus der schräggestellten Bereitstellungseinheit des Regals entnommen und in der Transporteinheit des KoRobots abgelegt. Dabei mussten je nach Artikel Haltepunkte in der Bewegung des Roboters eingefügt werden, um eine Pendelbewegung, die durch das Lösen aus den Trays induziert wird, zu vermeiden.

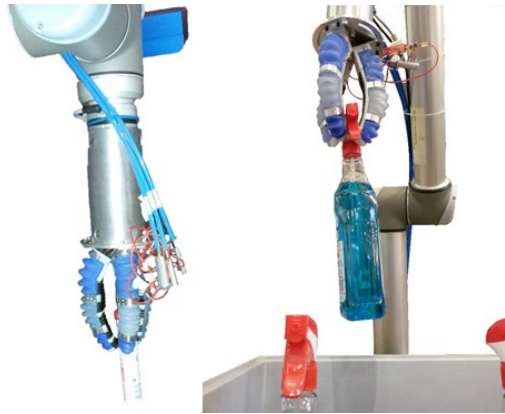


Abbildung 8. Greifversuche

#### 5.4 GREIFERSTEUERUNG

Die Greifersteuerung wurde wie die Steuerung der Fahrtriebe als eigenständiges Modul entwickelt, das später in die Gesamtsteuerung integriert wird. Die Steuerung des Endeffektors wird mit einem Microcontroller realisiert, namentlich einem Arduino Mega 2560. Die Anbindung des Greifers an das Gesamtsystem ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Recheneinheit (1.) sendet dem Microcontroller (2.) die aus den Versuchen bestimmten artikel- und balgspezifischen Drücke. Der Arduino rechnet die erhaltenen Daten in Spannungen um und legt diese als Sollwert an den entsprechenden Proportional-Druckregelventilen (5.) an. Dadurch wird der Greifer am Knickarmroboter (4.) mit definierter Druckluft (6.) betrieben. Der Sollwert der Ventile wird regelmäßig abgefragt, um eine Drucküberhöhung zu vermeiden. Wird diese gemessen, tritt ein Sicherheitsprotokoll in Kraft, um ein Bersten der Aktoren zu vermeiden. Sowohl der Microcontroller als auch der Leichtbauknickarmroboter melden der Recheneinheit den (nicht) erfolgreichen Abschluss des Greif- bzw. Bewegungsprozesses. Wurde ein Fehler gemeldet, muss der Verantwortliche (3.) diesen überprüfen und die Zone manuell wieder freigeben.

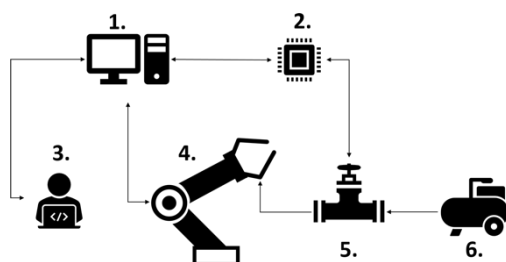


Abbildung 9. Greifsystem

Im weiteren Verlauf soll die Greifeinheit durch Sensoren erweitert werden, damit eine Greiferregelung das (nicht) erfolgreiche Greifen oder Rutschen feststellen und in letzterem Fall korrigieren kann. Dazu wurde zunächst an der Handgelenksbasis ein 6-Achs-Fraft-Momenten-Sensor integriert, der die Kräfte bei einem definierten Bewegungsablauf des Roboters während eines Kommissioniervorgangs einer Konservendose mit einer Gewichtskraft von 800 N aufzeichnete.

In Abbildung 10 wird die durch den Sensor gemessene Gesamtkraft dargestellt. Der Punkt 1 bezeichnet dabei den Kontakt mit dem Objekt beim Greifen, Punkt 2 den ersten Haltepunkt mit aufgenommenem Objekt, Punkt 3 den zweiten Haltepunkt und Punkt 4 die Objektablage. Die einzelnen Phasen der Kommissionierung lassen sich mit Hilfe dieses Sensors darstellen, allerdings sind weitere Untersuchungen notwendig, um die Eignung hinsichtlich der Rutschdetektion zu ergründen. Beispielsweise darf durch die starken Abfälle der Gesamtkraft bei der Bewegung des Roboters keine Meldung über den Verlust des Objektes erfolgen. Daher befindet sich die Einbindung dieses Sensors in dem Regelprozess noch in der Erprobung.

#### 6 GESAMTSTEUERUNG

Die Steuerung des Gesamtsystems ist in C++ programmiert. Bei der Entwicklung der übergeordneten Steuerung nimmt das ROS-Framework eine wesentliche Rolle ein. Mit ROS lassen sich die eigenständigen Module Greifer und Fahrzeug auf eine einfache Art und Weise in das gesamte System integrieren. Außerdem kann mit ROS auf ein fertiges Package für den eingesetzten Knick-Arm-Roboter, den UR10 von Universal Robots, zurückgegriffen werden. Nicht zuletzt wird auch das ROS-eigene Build System catkin für das Bauen der Software verwendet.

Die Integration der Teilmodule Greifer und Fahrzeug erfolgt über das zusätzliche Modul rosserial. Dieses beinhaltet ein Protokoll zur Kommunikation mit den verwendeten Arduinos über eine serielle Schnittstelle. Der eigentliche Quellcode zum Betreiben der beiden Teilmodule ist auf den Arduinos hinterlegt. Die Kommunikation mit der Gesamtsteuerung erfolgt über ROS-Messages. Da der Einsatz von ROS-Actions über rosserial nicht ohne weiteres möglich ist, wird an dieser Stelle auch auf die Services verzichtet. Damit ist sichergestellt, dass die Teilmodule den Ablauf des Hauptprogramms nicht blockieren. Für einen sicheren Betrieb wurden sowohl die Befehle als auch die Feedbacks über das Messagesystem realisiert.

Das aus ROS-Sicht offizielle Package für den UR10 beinhaltet einige Fehler, die zwar in entsprechenden Foren diskutiert, deren Lösungen jedoch nur teilweise in den letzten Branch eingeflossen sind. Das Package musste also an einigen Stellen angepasst und das Robotermodell um das Fahrzeug und den Greifer erweitert werden. Die Steuerung

des UR10 erfolgt über die MoveIt! Bibliothek. Damit lassen sich einfache Bewegungen ausführen, Kollisionsumgebungen erstellen und Pick&Place Aktionen ausführen.

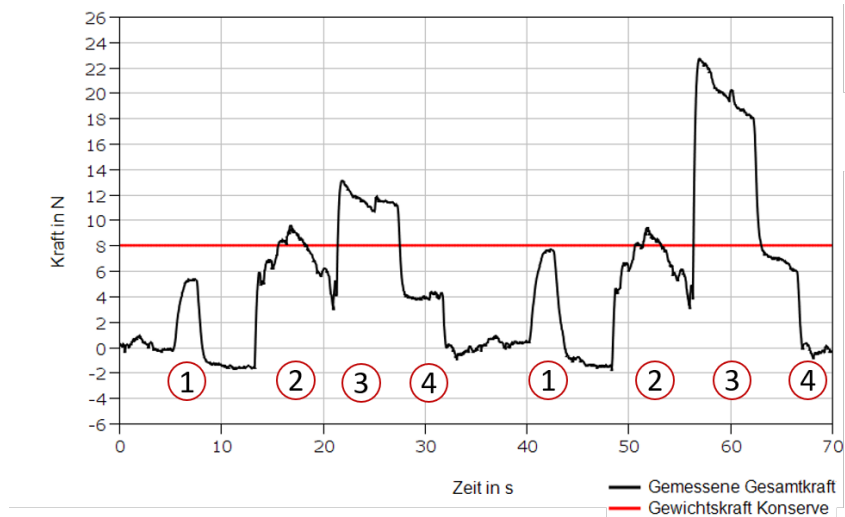


Abbildung 10. Kraftverlauf während eines Kommissioniervorgangs einer Konservendose

## 6.1 KOMMISSIONIERABLAUF

Das Programm läuft in einer Dauerschleife ab, in der es Auftrag für Auftrag und Artikel für Artikel abarbeitet. Neue Aufträge können über eine auf der Festplatte des Hauptrechners gespeicherte Datei eingelesen oder über eine ROS-Message übergeben werden. Ein Auftrag besteht aus einer Auftragsnummer, einer beliebigen Anzahl an Artikelnummern und der zu kommissionierenden Menge des jeweiligen Artikels. Der Erfolg oder Misserfolg eines Kommissioniervorgangs bzw. eines Auftrags wird über das ROS-Logging-System protokolliert.

Damit der Kommissionierroboter mit den Artikelnummern etwas anfangen kann, wurde eine Datenbank angelegt, die ein Minimalwarenwirtschaftssystem simuliert. Diese beinhaltet z.B. die Zuordnung der Artikel zu ihren Lagerfachnummern in der Kommissionierzone, die Fahrzeugpositionen für die Lagerfächer und einige Standardpositionen für den Knick-Arm-Roboter. Des Weiteren wurden Daten zu den Dimensionen der Artikel (Länge, Breite, Höhe) und die artikelspezifischen Drücke für den Greifer hinterlegt.

Der grundsätzliche Ablauf eines Kommissioniervorgangs besteht aus den folgenden Teilschritten:

- Fahrzeug zur Position des zu kommissionierenden Artikels verfahren
- Kamera über die Bereitstellungseinheit positionieren
- Bildaufnahme und Vermessung

- Erstellen eines Kollisionsmodells aus den Messdaten
- Artikel greifen und zum Sammelbehälter bewegen
- Ablageposition suchen
- Prüfen ob geforderte Menge/ alle Artikel kommissioniert wurde/ wurden
- Zum Übergabepunkt des fertigen Kommissionierauftrags fahren

## 6.2 BILDVERARBEITUNG

Das Einsatzszenario sieht vor, dass wir in einer Kommissionierzone mit sortenrein gelagerten Artikeln in den Bereitstellungseinheiten agieren. In dieser Zone ist der Lagerort eines jeden Artikels bekannt. Des Weiteren nehmen wir an, dass die Artikel alle an ihrem richtigen Platz liegen, d.h. es gibt keine falsch zugeordnete Ware. Aufgrund dieser Bedingungen können wir, zumindest im ersten Schritt, auf das Identifizieren der Artikel verzichten. Die Bildverarbeitung hat somit die Aufgabe die einzelnen Artikel voneinander abzugrenzen und deren relative Position zum Roboter zu bestimmen.

Diese Informationen erhalten wir durch das Auswerten einer Punktwolke, die von der Kamera erstellt wird. Die Punktwolke wird so aufgearbeitet, dass sie mit den Methoden der 2-dimensionalen Bildverarbeitung ausgewertet werden kann. Dazu wird sie in eine Matrix überführt, in der ein Matrixeintrag einem Pixel entspricht. Die Messpunkte werden entsprechend ihrer Werte in der x-y-Ebenen auf die



Matrix verteilt. Dabei wird darauf geachtet, dass ein Sprung um eine Zeile einem Sprung um 1 mm in der y-Ebene der Messpunkte entspricht. Das gleiche gilt für einen Sprung um eine Spalte in der x-Ebene. Der entsprechende orthogonale Abstand eines Punktes zur Kamera in z-Richtung wird als Intensität des Pixelwertes kodiert.

Das so generierte Bild dient dazu Konturen von den gesuchten Objekten zu finden. Durch die Skalierung des Bildes auf 1 mm pro Pixel lassen sich die Länge der Konturkanten und der Flächeninhalt einer Kontur unabhängig vom Abstand des Objektes zur Kamera berechnen. Um zu entscheiden, ob es sich bei einer gefundenen Kontur um den gesuchten Artikel handelt, werden die geometrischen Informationen, mit denen aus der Datenbank für den Artikel abgeglichen. Fällt der Abgleich positiv aus, werden die Koordinaten der Eckpunkte und die Orientierung um die z-Achse des Objekts gespeichert. Aus diesen Daten wird im Weiteren, nach einer Koordinatentransformation in das Roboter-KS, ein Kollisionsobjekt erzeugt.

Die Orientierungen um die x- und die y-Achse werden bereits im Vorwege über die Identifizierung der Bereitstellungseinheit ermittelt. Für die Bereitstellungseinheit wird der Normalenvektor berechnet und die Kamera auf diesen ausgerichtet. Damit gehen die Werte für die Orientierungen um die x- und die y-Achse im Kamera-KS gegen Null. Dies ist notwendig um die gemessene Orientierung des Objektes um die z-Achse auch wirklich als reine Rotation um die z-Achse betrachten zu können. Die real vorhandene und von Null verschiedene Orientierung um die x-y-Achse wird bei der Koordinatentransformation in das Roboter-KS über die Orientierung des TCP während der Bildaufnahme berücksichtigt.

### 6.3 ROBOTERSTEUERUNG

Der Kommissionierroboter bewegt sich in einem schmalen Gang, in dem er beim Rotieren des Knick-Arm-Roboters gegen die Regale und die Bereitstellungseinheiten stoßen kann. Aus diesem Grund ist ein Abbilden der Umgebung durch ein Kollisionsmodell dringend angeraten. Die Kommissionierzone besteht aus wenigen Elementen, die sich oft wiederholen. Ebenfalls hat sie einen statischen Charakter. Mit unerwarteten Hindernissen oder anderen Fahrzeugen ist in diesem Bereich nicht zu rechnen. Eine permanente Vermessung der Umgebung und Darstellung in Form einer Octomap, so wie es der übliche Ansatz vorsehen würde, erscheint hier nicht als zweckdienlich. Stattdessen wurde ein Ausschnitt des Regals als 3D-Modell erstellt und in die Umgebung eingefügt. Je nach dem in welcher Position sich das Fahrzeug befindet, wird das Modell der Regale entsprechend verschoben.

Während des Greifvorgangs muss das Kollisionsmodell die real vorhandene Situation möglichst wahrheitsgemäß abbilden. Neben den bereits vorhandenen Regalen wird die Umgebung in zwei weiteren Schritten aufgebaut. Als erstes wird die Bereitstellungseinheit platziert. Da es

sich hier um eine Euro-Box mit Standardmaßen handelt, verwenden wir hier ebenfalls ein 3D-Modell. Für dieses 3D-Modell wird anhand der Messdaten aus der Bildverarbeitung die Position und Orientierung bestimmt.

Im zweiten Schritt wird die Bereitstellungseinheit mit Objekten gefüllt. Die aus der Bildverarbeitung ermittelten Objektdaten werden zum Erstellen von Objektkollisionsmodellen genutzt. Dabei wird nicht die genaue Form des Objekts nachgebildet, sondern lediglich eine Hülle um das Objekt gelegt. Die Orientierung des Objekts errechnet sich aus der Orientierung der Bereitstellungseinheit, korrigiert um die Rotation des Objektes um die z-Achse.

Relativ betrachtet werden die Objekte gerade von oben gegriffen. Da die Bereitstellungseinheiten jedoch geneigt sind, muss der Greifer entsprechend in Position gebracht werden. D.h., der Greifer muss, auf den nach unten zeigenden Normalenvektor der Bereitstellungseinheit, ausgerichtet werden. Dazu wird eine Quaternion berechnet, die eine Rotation der Roboter-z-Achse auf den Normalenvektor der Bereitstellungseinheit beschreibt.

Die Auswahl, welches Objekt gegriffen werden soll, erfolgt zufällig. Für jedes Objekt wird ein aus der Bildverarbeitung berechneter Greifpunkt und eine berechnete Orientierung vorgegeben. Der Kinematik-Solver versucht nun eine zulässige Lösung zu finden, bei der der angegebene Greifpunkt angefahren werden kann, ohne dass die Greiffinger mit anderen Objekten kollidieren. Um eine zulässige Lösung finden zu können, muss ein gewisser Toleranzbereich für die Abweichung von den Zielvorgaben definiert werden. Bei der Positionierung muss genug Spiel vorhanden sein, um die Greiffinger in eine zulässige Position bringen zu können, jedoch darf das Spiel dabei nicht so groß ausfallen, sodass die Greiffinger über dem zu greifenden Objekt stehen und der Greifer in Leere greift. Ähnliches gilt für die Orientierung. Der Greifer soll zum Einen von oben greifen, zum Anderen jedoch möglichst flexibel um die z-Achse gedreht werden können um die Greiffinger auszurichten.

Ein gegriffenes Objekt kann als solches markiert und zum Robotermodell hinzugefügt werden. Dadurch soll es z.B. bei der Kollisionsabfrage mit der Umgebung berücksichtigt werden. In der Praxis hat es sich gezeigt, dass das nicht immer der Fall ist. Auch die Trajektorieberechnung ist alles andere als gut, sobald Kollisionsobjekte berücksichtigt werden sollen. Hier müssten weitere Kinematik-Solver auf ihre Leistungsfähigkeit untersucht werden.

## 7 AUSBLICK

Neben den in den Beschreibungen der Module erwähnten Verbesserungsmöglichkeiten, muss das Kommissioniersystem im weiteren Verlauf auf seine Performance hin untersucht werden. Angestrebt wird eine mittlere Pick-

zahl von 120 Artikeln pro Stunde bei einer Kommissioniersicherheit von 95 %. Dabei sind in der Pickzeit das Erkennen der Objekte, die Berechnung des Greifpunktes, die Bewegungsplanung, das Greifen und das Ablegen des Artikels enthalten. Die Definition des erfolgreichen Kommissionierens umfasst das Greifen, Transportieren und Ablegen des laut Auftrag zu kommissionierenden Artikels. Dies schließt die Auswahl des korrekten Artikels, die verlustfreie Überführung des Artikels aus der Bereitstellung in die Transporteinheit sowie die gänzliche Abarbeitung des Kommissionierauftrags ein.

## LITERATUR

- [ISE13] Isermann, Jan; Ulrich, Stephan; Bruns, Rainer: Generierung von Konstruktionsmerkmalen zur Entwicklung eines bioinspirierten Kommissionier-Greifers für die Intralogistik mittels Clusteranalyse. In: Tagungsband zum 9. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e.V. (WGTL), S. 177-188, Dortmund, 2013
- [ISE14] Isermann, Jan; Ulrich, Stephan; Bruns, Rainer: Konstruktive Gestaltung eines bioinspirierten Kommissionier-Greifers für intralogistische Handhabungsaufgaben. In: Tagungsband zum 10. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e.V. (WGTL), München, 2014
- [ULR18] Ulrich, Stephan; Buhrdorf, Christoph; Klitsch, Christopher; Bruns, Rainer: Entwicklung eines Baukastensystems für universelles Greifen mit flexiblen Aktoren. In: Tagungsband zum 14. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e.V. (WGTL), Wien, 2018

---

**Kim Schwäke, M.Sc.**, Research Assistant at the Institute of Machine Elements and Technical Logistics, Helmut-Schmidt-University, Hamburg.

Address: Institute of Machine Elements and Technical Logistics, Helmut-Schmidt-University, Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg, Germany, E-Mail: kim.schwaeke@hsu-hh.de

**Ilja Dick, M.Sc.**, Research Assistant at the Institute of Machine Elements and Technical Logistics, Helmut-Schmidt-University, Hamburg.

Address: Institute of Machine Elements and Technical Logistics, Helmut-Schmidt-University, Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg, Germany, E-Mail: ilja.dick@hsu-hh.de

**Prof. Dr.-Ing. Rainer Bruns** hat Luft- und Raumfahrt an der Technischen Universität Braunschweig studiert und ist seit 1992 Leiter des Lehrstuhls für Maschinenelemente und Technische Logistik an der Helmut-Schmidt-Universität in Hamburg.