

# Konstruktive Gestaltung eines bio-inspirierten Kommissionier-Greifers für intralogistische Handhabungsaufgaben

Constructive design of a bio-inspired picking gripper for intralogistical handling tasks

Jan Isermann  
Stephan Ulrich  
Rainer Bruns

Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik (MTL)  
Helmut-Schmidt-Universität

**I**n diesem Beitrag wird ein neuartiger biologisch inspirierter Universalgreifer beschrieben. Dieser soll in einem automatisierten Kommissionier-Szenario selbstständig Waren aus Kisten greifen, anheben und an anderer Stelle ablegen um somit das manuelle Kommissionieren von Hand zu substituieren. Auf dem Weg zu einer ausgereiften Konstruktion werden zahlreiche Fragestellungen zur Gestaltung und Anordnung der Finger und deren Antrieb gelöst. Ein für diesen Anwendungsfall entwickelter Biegeaktor wird zur Krümmung der Finger eingesetzt und bietet als Alleinstellungsmerkmal ein nahezu verschleißfreies Gelenk bei einem sehr einfachen konstruktiven Aufbau.

[Schlüsselwörter: Automatische Kommissionierung, bio-inspirierter Greifer, Greiftechnik, Biegeaktor, Greifereigenschaften]

**I**n this paper, a proposal for a novel bio-inspired universal gripper is described. The gripper independently engage in an automated picking scenario goods from boxes gripping, lifting and dropping elsewhere, as to substitute the manual picking by hand. Towards a sophisticated design many questions about layout and arrangement of the fingers and their drive are solved. A bending actuator, developed for this application, is used to drive the finger. A unique feature offers a virtually wear-free joint with a very simple constructive structure.

[Keywords: Automatic picking, bio-inspired gripper, gripper technology, bending actuator, gripper properties]

## 1 EINLEITUNG

In der Kommissionierung wird noch immer überwiegend manuell gearbeitet. Die Nachteile dieses gering automatisierten Anwendungsfeldes kommen hier besonders negativ zum Tragen. Das Verfahren ist zwar in der Ausführung effektiv, aber ineffizient aufgrund der geringen menschlichen Leistung sowie der hohen Fehlerquote und Kosten. Für zukünftige automatisierte Kommissionierszenarien wurde daher ein großes Potenzial identifiziert.

Wesentlicher Bestandteil des Automatisierungsprozesses ist der Einsatz von Industrierobotern, die mit einem geeigneten Endeffektor, dem Greifer, ausgestattet werden müssen. Derzeit sind keine geeigneten und preiswerten technischen Greifsysteme auf dem Markt verfügbar, die so universell einsetzbar sind, dass sie bspw. ein typisches Handelswarensortiment ohne wesentliche Einschränkungen, Beschädigungen oder Verluste greifen können.

Im zu untersuchenden Automatisierungsszenario "Kommissionierzelle" wird der Greifer an einem verfahrenbaren Industrieroboter montiert. Aufgabe des Greifers ist es, sortenreine Greifartikel aus Kisten mittels Greifpunktbestimmung zu entnehmen, die in klassischen Kommissionierregalen eingelagert sind. Zum Erreichen verschiedener Regalbereiche ist der Roboter mit mehreren Gelenken und einer Hubeinrichtung ausgestattet und kann zudem parallel zur Regalreihe mittels eines Linearantriebes positioniert werden. Die einzelnen Artikel werden in einer weiteren Kommissionierkiste auf einem Förderband vor dem Roboter abgelegt und zu einer Kommission für den Weitertransport zusammengestellt (s. Abbildung 1).

Eine große Herausforderung für den Schritt der Substitution der manuellen Kommissionierung ist das Design und die Bereitstellung eines geeigneten Greif- und Antriebssystems, das ähnliche Eigenschaften resp. Geschicklichkeit wie die menschliche Hand aufweisen soll. Diese sehr komplexe Konstruktion des Menschen hat einen hohen Grad an Bewegungsfähigkeit und Freiheitsgraden. Des Weiteren verfügt der Mensch über ausgeprägte senso-

rische Fähigkeiten und ist zusammen mit seinen Sinnen und der langjährigen Erfahrung im Greifen von Gegenständen in der Lage, das Greifen nachzuregeln bzw. Griffe zu korrigieren und so stets den optimalen Prozessablauf zu finden und anzuwenden. Diese überragenden, aber im

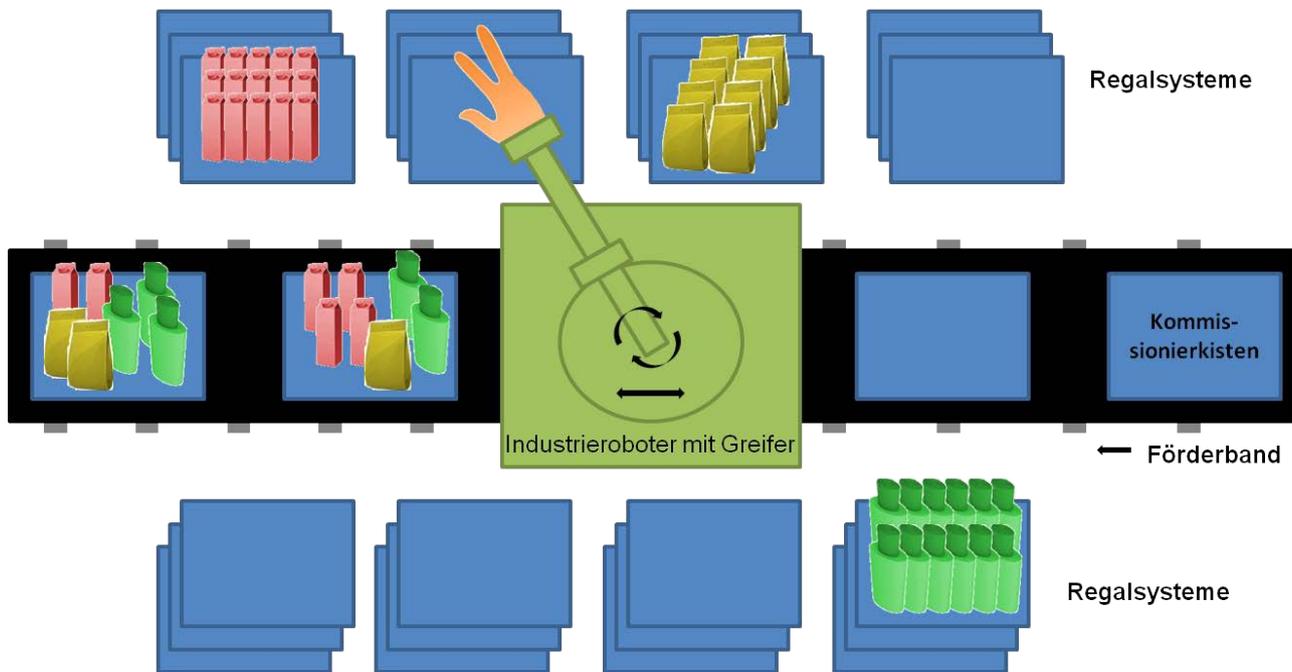


Abbildung 1. Automatisierte Kommissionierumgebung mit Industrieroboter und stilisiertem anthropomorphem Greifsystem

Ablauf komplexen menschlichen Eigenschaften unterstützen den manuellen Kommissionierprozess wesentlich.

Beim Greifvorgang des Menschen tragen somit die Verarbeitung von ermittelten Reizen in der Hand und die Anwendung von Erfahrungswissen zum strategischen Greifen bei. Dieses planvolle Greifen beherrschen Kinder erst mit acht bis neun Jahren [STÖ11]. So zeigt sich, dass für einen vollständig automatisierten Kommissionierprozess sowohl Hintergrundwissen über die Greifartikel, bspw. aus einer entsprechenden Artikeldatenbank sowie ein adaptiver Endeffektor von Nöten ist, der zudem selbstregelnde Eigenschaften auf Basis geeigneter Sensorik besitzt. Auf die oben skizzierte Greifaufgabe bezogen ist es somit angezeigt, diese Funktionen auf das technisch erforderliche Minimum abzubilden um das System beherrschbar zu gestalten.

### 1.1 DIE CLUSTERANALYSE UNTERSTÜTZT DIE KONSTRUKTION

Bei der Entwicklung eines neuartigen Endeffektors ist zwangsläufig die Fragestellung zu beantworten, welcher Greifertyp im zu untersuchenden Anwendungsfall der

Geeignetste ist. Wesentlichen Einfluss auf diese Entscheidung hat die Geometrie und das Materialverhalten der Greifobjekte. Um die Eigenschaften sinnvoll analysieren und bewerten zu können, wurde in vorangegangenen Arbeiten die Methode der Clusteranalyse gewählt und angewendet. Das Ziel der Clusteranalyse liegt in der Bildung von Gruppen oder sog. Clustern aus einer größeren Menge von Objektdaten. Durch die Zusammenfassung von sich ähnelnden Objekten zu einer Gruppe findet eine Reduktion der Datenmenge statt. Die gebildeten Cluster werden als neue und eigenständige Objekte angesehen. Zunächst bestand der Wunsch, aus der anfangs sehr unübersichtlichen Anzahl unterschiedlicher Greifartikel Ähnlichkeiten zu identifizieren. So konnte am Ende der Analyse die Anzahl und die individuelle Bestückung der einzelnen Cluster mit zu kommissionierenden Artikeln einen Aufschluss über die Anforderungen an einen Universalgreifer geben.

Im Ergebnis der Untersuchung wurde eine Charakterisierung des erforderlichen Greifers bzw. eine Überprüfung der Annahme vorgenommen, welche den Fingergreifer als den optimalen Greifertyp für den Anwendungsfall beschreibt. Hierzu wurde die Anwend-

barkeit von bestimmten Greiforganen, Wirkpaarungen und Zugriffsarten für die Handhabung von den Gegenständen in den jeweiligen Clustern überprüft. Nach Abschluss der Bewertung konnte die oben formulierte Vermutung bestätigt werden, dass der Fingergreifer auf alle gefundenen Cluster, und damit auf alle untersuchten Greifartikel anwendbar ist [ISE13].

## 1.2 DAS MECHANISCHE KLEMMEN ALS UNIVERSALES WIRKPRINZIP

Mit der Wahl eines Fingergreifers erfolgt auch die Festlegung auf das physikalische Wirkprinzip beim Greifen: das mechanische Klemmen. Beim objektorientierten Greifen durch Klemmen ist zu beachten, dass hier nur sehr geringe Anforderungen durch die Greifobjekte an den Greifer zu berücksichtigen sind. Dies entspricht dem Wesen eines Universalgreifers. Weitere Vorteile bei der Verwendung eines Fingergreifers ergeben sich durch die grundsätzliche Möglichkeit zur Herstellung eines Formschlusses zwischen den Kontaktbereichen, um die erforderlichen Normalkräfte beim obligatorischen Kraftschluss zur Schonung der Greifobjekte reduzieren zu können.

## 2 KONSTRUKTIVE RANDBEDINGUNGEN

### 2.1 ALLGEMEINE ANFORDERUNGEN AN DIE GREIFERKONSTRUKTION

Aus den bislang erworbenen Erkenntnissen aus der Clusteranalyse und der Identifikation wichtiger Randbedingungen im Anwendungsszenario ergeben sich die folgenden, zunächst allgemein formulierten Anforderungen an den neuartigen Greifer:

- Hohes Maß an Flexibilität: Darunter versteht man in der Greiftechnik die Eigenschaft, für verschiedene Anwendungen selbstanpassungsfähig zu sein [HES 04]
- Geringe Komplexität: Im vorliegenden Anwendungsfall ist eine technisch überschaubare Lösung vorzusehen mit der ein moderates Anschaffungspreisniveau einhergehen soll. Viele bereits auf dem Markt befindliche künstliche technische Greifhände erfüllen dieses Kriterium nicht.
- Hohe Robustheit: In der Greiftechnik ist Robustheit als Unempfindlichkeit eines geplanten Griffes gegenüber Ungenauigkeiten bei der Positionierung der Finger und gegenüber kleinen Objektbewegungen zu verstehen, die durch die Schließbewegung der Finger hervorgerufen werden [BUT99].
- Möglichkeit mehrere Griffarten anzuwenden: Als Teilergebnis der Clusteranalyse konnte ermittelt werden, dass die untersuchten Greifobjekte zu unterschiedlich sind, als das sie mit nur einer Griffart ma-

nipuliert werden können. Der Universalgreifer muss über mindestens zwei Ausführungsvarianten in Bezug auf die Griffart verfügen können. Der "Zirkuläre Präzisionsgriff" (s. Abbildung 2) und der "Prismatischer Kraftgriff (Umklammernd)" (s. Abbildung 3) [vergl. ISE13] sind im vorliegenden Anwendungsfall besonders geeignet. Ergänzend können mit dem "Prismatischen Präzisionsgriff" (s. Abbildung 4) weitere Greifstrategien umgesetzt werden. Dieser Griff wird vom Greifer ebenfalls unterstützt. Nachfolgend sind die drei oben genannten Griffarten abgebildet:

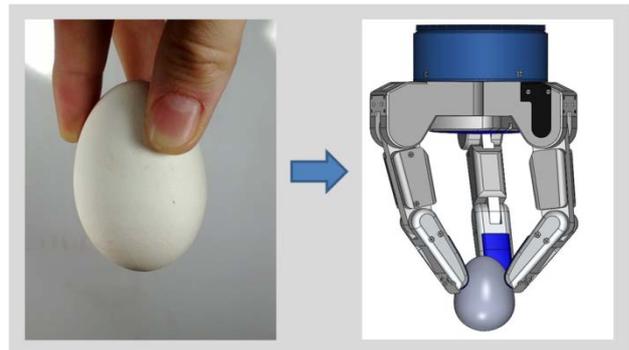


Abbildung 2. Zirkulärer Präzisionsgriff

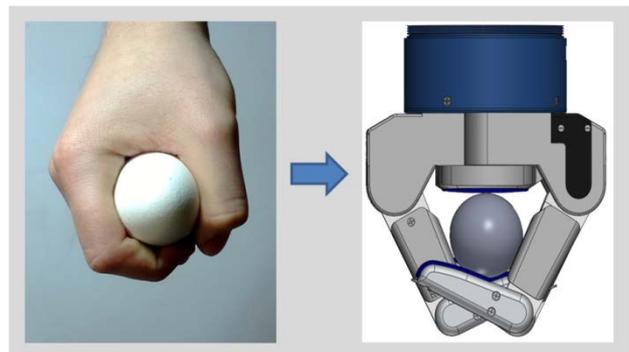


Abbildung 3. Prismatischer Kraftgriff (Umklammernd)

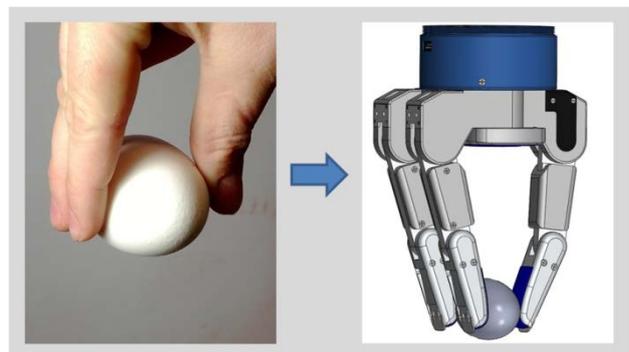


Abbildung 4. Prismatischer Präzisionsgriff

- Der menschlichen Hand ähnlich: Die Geometrieverhältnisse der menschlichen Hand werden als sinnvoll für die Entwicklung des Universalgreifers angesehen. Sie können somit übernommen werden. Die Originalmaße der menschlichen Hand sind hierbei jedoch

nicht geeignet. Für größere Greifobjekte ist die zweite Hand zur Unterstützung notwendig, was im Automatisierungsfall wiederum einen zweiten Roboterarm erfordert. Diese Variante erhöht den Technik- und Koordinationsaufwand und wird daher verworfen. Geeigneter erscheint eine Lösung mit hochskalierten Geometriedaten auf Basis der menschlichen Hand. Untersuchungen ergaben einen Faktor von 2,5 in Relation zu den Abmaßen der menschlichen Hand nach DIN Norm 33402-2 [DIN33402].

## 2.2 DAS LASTENHEFT

Im Zuge der weiteren Arbeiten wurde ein Lastenheft erstellt. Dieses dient dem Zweck, zu einer konkreten technischen Systembeschreibung für die Hand zu gelangen. Im Folgenden wird ein Auszug hieraus vorgestellt:

- Anzahl der Greiffinger: Wie oben bereits erwähnt, ist es für die Neukonstruktion des Greifers unabdingbar, die hochkomplexen Bewegungs- und Steuerungsmuster der menschlichen Hand auf das erforderliche Minimum zu reduzieren. Erste Untersuchungen haben gezeigt, dass eine künstliche technische Hand mit drei Fingern einen guten Kompromiss zwischen Variabilität und Steuerungsaufwand darstellt. 90 % aller industriell vorkommenden Griffe können mit einer Drei-Finger-Hand ausgeführt werden [HES04]. Eigene Ergebnisse zeigen, dass darüber hinaus mit den drei definierten Griffotypen (s. 2.1) über 75% der untersuchten Handelsprodukte aus der Clusteranalyse gegriffen werden können [vergl. ISE13].
- Erforderlicher Arbeitsraum: Untersuchungen der Greifartikel haben gezeigt, dass der Endeffektor eine Aufnahmemöglichkeit von Objekten > 2 mm Höhe, Objektdurchmesser > 14 mm und Objektbreite < 380 mm besitzen muss.
- Freiheitsgrade: Zur Erhöhung der Adaptivität beim Greifen bzw. der Ausführung der drei Griffvarianten (vergl. 2.1) sind drei Freiheitsgrade pro Finger und Gelenk, also neun voneinander unabhängige Freiheitsgrade umgesetzt worden. Dies entspricht in vereinfachter Form dem anthropomorphen Vorbild.
- Fingergestaltung: Zur Gestaltung der einzelnen Finger ist ein anthropomorpher Aufbau vorgesehen. Dieser besteht nach menschlichem Vorbild aus geführten Gelenken mit jeweils einem Freiheitsgrad und steifen Zwischenbereichen. Distal schließt der Finger mit einer Kuppe ab, die aufgrund ihrer Geometrie und Funktion auch für das Anheben flacher Gegenstände geeignet sein soll.
- Antrieb: Es werden Biegeaktoren mit einem Drehpunkt mit kleinstmöglicher Entfernung zur Greiffläche

benötigt. Diese müssen einen Bewegungsraum von bis zu 100 Grad abdecken, bezogen auf die beiden Wirkflächen der Aktoren (vergl. 3.6.4 und Abbildung 12).

## 3 KONSTRUKTIVE TEILLÖSUNGEN

Das folgende Kapitel zeigt Teillösungen des Greifers auf, um eine Gesamtlösung vorzubereiten. Hierbei werden insbesondere neuartige, konstruktive Details erläutert, die beim Greifvorgang einen wesentlichen Einfluss auf die Greifsicherheit haben.

### 3.1 ALLGEMEINE ANALYSE DER GREIFBEDINGUNGEN

Die Robustheit eines Greifers bestimmt die Sicherheit eines Griffes. In späteren Arbeiten wird ein "Maß zur Greifsicherheit" in praktischen Versuchen untersucht werden. Konstruktiv kann dieser Faktor durch die Ausbildung passender Greifflächen gestützt werden. Filigrane Formen oder knickempfindliche Oberflächen der Greifobjekte erfordern einen wohl dosierten Griff, um den Artikel im verkaufsfähigen Originalzustand zu erhalten. Generell muss die Greifkraft mit Hilfe eines Regelkreises stets so groß wie nötig und so klein wie eben möglich eingestellt werden. Geometrisch einfache Objekte, die bspw. eine quaderförmige Form aufweisen, können hingegen mittels umfassendem Kraftgriff gehandhabt werden.

Bei entsprechender Größe der Greifobjekte kann das Greifobjekt im Arbeitsraum des Greifers sogar vollständig umschlossen werden, sodass ein maximaler Formschluss entsteht. Durch den Fall eines hohen Grades an Formschluss zwischen den Kontaktpartnern ergibt sich der Vorteil, dass nur geringe Normalkräfte erforderlich sind, um das Greifobjekt zu halten.

### 3.2 GESTALTUNG DER GREIFFLÄCHEN ANHAND DER FINGERANORDNUNG

Im konkreten Anwendungsfall kann eine definierte Wahl der oben vorgestellten drei Griffarten nicht erfolgen, da im Gegensatz zu einigen bereits auf dem Markt befindlichen Greifern keine gezielte Positionierung bzw. Verdrehung um die Hochachse der Finger erfolgt. Der Greifer muss daher befähigt sein die oben beschriebenen Griffarten anzuwenden, ohne das dazu eine Neuausrichtung der Fingergrundgelenke an der Fingerbasis erfolgt. In genau diesem Umstand liegt jedoch ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal des MTL-Dreifingergreifers begründet. Durch die fehlende Antriebstechnik in diesem Bereich erringt sich der Steuer- und Regelungsaufwand sowie der Gelenkverschleiß des Greifers erheblich gegenüber Greifern, die einzelne Griffarten an der Fingerbasis

einstellen. Exemplarisch sei hier die Barrett-Hand genannt [TOW00].

Die Anordnung der Finger ist so gestaltet, dass ein Greiforgan den anderen opponierend positioniert ist. In Analogie zur menschlichen Hand wurden die Greiforgane als Daumen ( $D_i$ ) und Finger ( $F_i$ ) gekennzeichnet (s. Abbildung 5). Die Greifrichtung der Finger wird mittels Pfeil deutlich. Die Fingerkrümmung sei hierbei zunächst außer Acht gelassen.

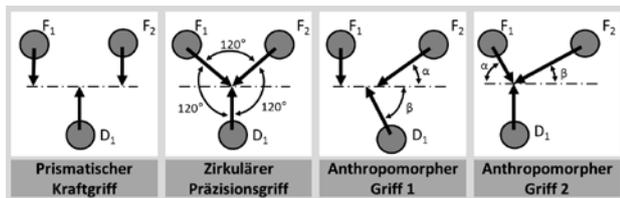


Abbildung 5. Mögliche Fingeranordnungen an der Fingerbasis

Die Gestaltung der geometrischen Form der Griffflächen der Greiforgane ist stark an die Fingeranordnung gekoppelt. Die Griffflächen im prismatischen Kraftgriff sowie im zirkulären Präzisionsgriff verlaufen stets senkrecht zur Bewegungsrichtung der Greiforgane. Zusätzliche Kontaktflächen seitlich der Finger sind zunächst nicht vorgesehen.

Um mehrere Griffarten bestmöglich auszuführen, müssen die Griffflächen bei den anthropomorphen Griffen den Griffarten bestmöglich angepasst werden. Ein Beispiel dieser Anpassung findet sich am Beispiel des „Anthropomorphen Griffs 1“ in Abbildung 6. Hierbei sind die jeweils farblich gleich markierten Flächen (rot bzw. grün) kontaktierende Wirkpaarungen der jeweiligen Griffarten. Bewegen die Greiforgane sich aus dem offenen Zustand (links) zusammen, so wird ein prismatischer Kraftgriff (mitte, quaderförmiges Objekt in hellblau) dann sichergestellt, wenn die rot markierten Flächen Kontakt zum Objekt herstellen und parallel zueinander ausgerichtet sind. Im Idealfall sollte sich der Daumen stets zwischen den Fingern befinden, um kein Kippmoment zu erzeugen, welches die Greifsicherheit gefährdet.

Ein zirkulärer Präzisionsgriff (rechts, zylindrisches Objekt in hellblau) wird unterstützt, sofern die grün markierten Griffflächen Kontakt zum Objekt herstellen und parallel ( $F_1/D_1$ ) bzw. orthogonal ( $F_2/F_1$  und  $F_2/D_1$ ) zueinander ausgerichtet sind. Um zu verhindern das  $F_2$  das zwischen  $D_1$  und  $F_2$  geklemmte Greifobjekt aus dem Griff schiebt, kann  $F_2$  später so geregelt werden, dass dieser mit geringeren Kräften operiert als  $D_1$  und  $F_2$ .

Die dunkelblau markierten Flächen stehen für weitere, optional nutzbare Griffflächen. Je nach Orientierung (Drehung um die Hochachse) der Fingerbasis zum Greifobjekt können diese für das reine kraftschlüssige Greifen verwendet werden. Die Griffflächen müssen auf-

einander abgestimmt sein, da sonst ein Kollidieren der Finger bei sehr kleinen Objekten möglich ist.

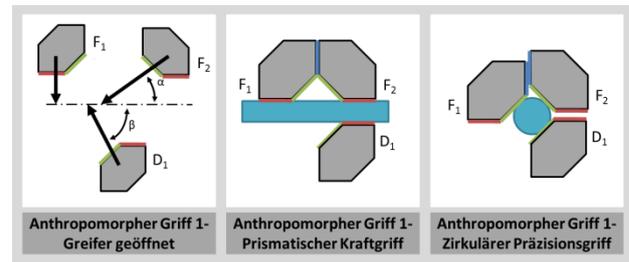


Abbildung 6. Kontaktierende Wirkpaarungen an den Kontaktflächen

### 3.3 GESTALTUNG DER KONTAKTFLÄCHEN

Die Kontaktfläche muss für einen sicheren Griff eine möglichst große Kontaktfläche ermöglichen (Formschluss) oder die Reibeigenschaften zwischen Finger und Objekt verbessern (Kraftschluss). Wie oben bereits erläutert ist eine formschlüssige Wirkpaarung gegenüber einer kraftschlüssigen stets zu bevorzugen. Aufgrund der Varianz der verschiedenen Objektgeometrien lässt sich nur selten ein reiner Formschluss realisieren. Einige Beispiele für mögliche Kontaktflächen sind in Abbildung 7 gezeigt. Ein adaptives Kissen (links außen) kann sowohl aktiv als auch passiv konstruiert sein. Aktive Kissen können z.B. durch Pressluftzufuhr steifer bzw. weicher justiert werden. Passive Kissen können aus porösem oder hochelastischem Material bestehen, welches sich an die Objektgeometrie anpasst. Eine Lamellenstruktur (links mitte) ermöglicht je nach Größe der Lamellen eine adaptive Anpassung bzw. einen erhöhten Reibwiderstand (z.B. Gecko-Material<sup>1</sup>). Finger mit Saugementen (rechts mitte) folgen dem Beispiel, der Tentakeln von Kraken. Hierbei wird eine zusätzliche Haftkraft durch Unterdruck aufgebracht, die jedoch stark von der Objekt-Oberflächenbeschaffenheit abhängig ist. Ein letztes Beispiel (rechts außen) verbessert die Eigenschaften eines kraftschlüssigen Griffes indem der Reibkoeffizient zwischen Greifobjekt und Grifffläche durch geeignete Oberflächen erhöht wird.

<sup>1</sup> Gecko-Prinzip: Nutzung von "Synthetic setae material". Mikroskopisch große Lamellen, welche sich je nach Beanspruchung verformen und verzahnen. Damit kann ein "Kleben" an einer Oberfläche erzeugt werden.

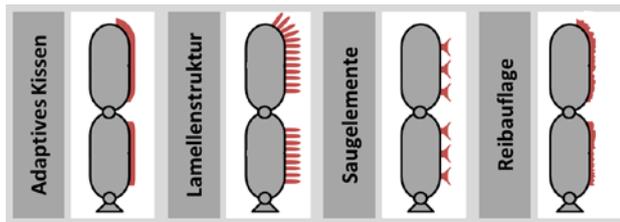


Abbildung 7. Kontaktierende Wirkpaarungen an den Kontaktflächen

### 3.4 GESTALTUNG DER FINGERKUPPE

Die Gestaltung der Fingerkuppen ist von relevanter Bedeutung. Weisen diese eine unvorteilhaft grobe Form auf, so sind flache Objekte nicht oder nicht ausreichend sicher zu greifen. Die menschliche Hand entgegnet dem mit Fingernägeln. Hierbei werden die Finger weiter gebeugt als notwendig, sodass die Nägel parallel zur Greifoberfläche "kratzen". Flache Objekte klemmen sich zwischen Nagel und Fingerkuppe und werden damit gehoben. Die Abbildung 8 zeigt drei Lösungsansätze für Fingerkuppen.

Die erste Variante (links) beinhaltet einen geformten starren Aufsatz, welcher auf das letzte Fingerglied aufgebracht wird. Dieser könnte jedoch je nach Annäherungsstrategie der Greiforgane zu Beschädigungen an den Greifobjekten führen. Das zweite Beispiel (mitte) steht für einen versenkbaren Nagel. Nach dem Vorbild der menschlichen Hand hat dieser erst nach dem Erreichen eines gewissen Winkels Kontakt mit dem Greifobjekt. Hierfür ist jedoch eine Kinematik notwendig, welche den Nagel entsprechend versenkt bzw. herausfährt. Ein freigeformter Finger (rechts) bietet viele Möglichkeiten, um auch flache Gegenstände an die Greiffläche heranzuziehen. Eine spitze Kante stellt ersten Kontakt zum Greifobjekt her. Dieses wird dann durch weiter aufgebracht Druck und eine Wölbung im Fingernagel an die Greiffläche angedrückt und so sicher gegriffen. Der Nachteil an letzterer Variante besteht in der für manch höhere Greifobjekte unvorteilhaften Form: Im geformten Innenbereich des „Nagels“ ergibt sich keine optimale Greiffläche.

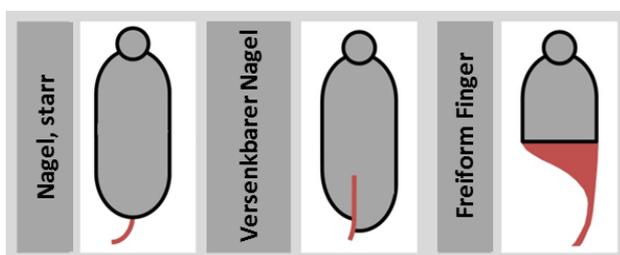


Abbildung 8. Umsetzungsvarianten für die Ausprägung eines technischen Fingernagels

### 3.5 ANTRIEB & AKTUATORIK

Für die kinematische Ausführung eines Biegeaktors als Antrieb zur Krümmung der Greiforgane kommen verschiedene Ausführungsvarianten in Frage. Hierfür sind in der folgenden Abbildung 9 beispielhaft einige Aktoren aufgeführt. Allen drei ist gemeinsam, dass ein fluidischer Energieträger genutzt werden kann. Variante 1 nutzt einen Längungsaktor, welcher außerhalb des Gelenks angebracht wird. Durch das Dehnen entsteht ein Gegenruck, welcher über einen Hebelarm eine Biegung um das Gelenk erzeugt [vergl. KAR07]. Variante 2 ersetzt das klassische Gelenk mit reibungsbehafteten und sich relativ zueinander bewegenden Flächen. Hier fungiert der Aktor gleichermaßen als Aktor, wie als elastisches Gelenk. In Variante 3 wird über einen Hebelmechanismus, angetrieben durch einen aufblähenden Aktor ein Gelenkmoment erzeugt [vergl. PYL00].

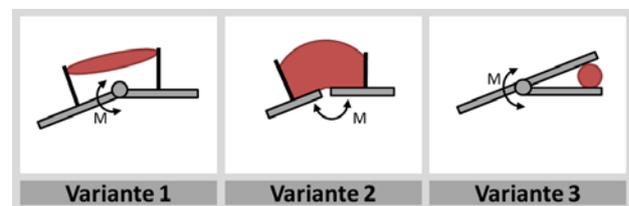


Abbildung 9. Lösungen für Anordnungsvarianten der Aktoren zur Generierung einer Biegebewegung

### 3.6 ENTSCHEIDUNGSFINDUNG UND VORSTELLUNG DES LÖSUNGSKONZEPTES

Mit Hilfe eines morphologischen Kastens wurden die oben vorgestellten Teillösungen untereinander gewertet und mit Festlegung auf einen jeweiliges Merkmal zu einem Lösungskonzept geführt. Die Auswahl wurde unterstützt durch das Lastenheft, mit dem die Teillösungen verglichen wurden. Im Folgenden sind die Einzelmerkmale mit Begründung zur Auswahl vorgestellt.

#### 3.6.1 FINGERANORDNUNG

Die Entscheidung zur Anordnung der Greiffinger fällt auf den anthropomorphen Griff 1 (vergl. 3.2). Hier wird neben der Gewährleistung der geforderten Griffarten auch ein hoher Analogiegrad an das anthropomorphe Vorbild erreicht. Dies eröffnet die Option für weitere, sinnvolle Fingerfreiheitsgrade. In Analogie zur Hand bewegen sich Daumen ( $D_1$ ) und Zeigefinger ( $F_2$ ) von einer gedachten Mittellinie weg, wohingegen der Mittelfinger ( $F_1$ ) sich nahezu parallel dazu bewegt. Mit der Wahl der so gestalteten Fingerorientierung kann zudem eine wichtige Eigenschaft der menschlichen Hand realisiert werden, der Einsatz des Daumens ( $D_1$ ) als Antagonisten zu Zeigefinger ( $F_2$ ) und Mittelfinger ( $F_1$ ). Ist  $\alpha < \beta$  so ist bei gleicher Beugungsgeschwindigkeit der Finger der Dau-

men stets zwischen den gegenüberliegenden Fingern positioniert.

### 3.6.2 KONTAKTFLÄCHEN

Die konkrete Ausführung der Kontaktflächen erfordert eine geeignete Objektbegutachtung unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der Clusteranalyse. Saugelemente sind auf glatte bzw. unporöse Oberflächen angewiesen. Diese Eigenschaft kann nur eine geringe Anzahl der Objekte sicherstellen. Lamellenstrukturen sind in ihrer Anwendung sehr komplex, denn sie erfordern im aktuellen Entwicklungsstadium ein gezieltes Ablösen der Oberflächen. Es wird erwartet, dass dieses mit dem vorliegenden Konzept beim Klemmgreifen nicht realisiert werden kann. Aus Vereinfachungsgründen wird daher eine Reibauflage aus neopreneähnlichem Material gewählt. Das Material bietet je nach Greifobjekt einen minimalen Formschlusseffekt sowie einen entsprechend hohen Reibkoeffizienten für den Kraftschluss. In späteren Szenarien ist ein adaptives Kissen, möglicherweise mit intelligent schaltbarem Verformungsverhalten zur Erhöhung des Formschlusses vorstellbar.

### 3.6.3 FINGERKUPPE

Die Lösung zum Einsatz eines versenkbaren Nagels bietet einen guten Kompromiss aus verfügbarer Filigranität und einer stumpfen Abrundung bei empfindlichen Greifobjekten. Hierfür ist eine Kinematik notwendig, welche den Nagel herausfährt, sofern er benötigt wird. Nach Vorbild der menschlichen Hand berührt der Fingernagel, abhängig von seiner Länge, erst ein Objekt, sobald das distale Gelenk einen bestimmten Winkel eingenommen hat. Eine Verknüpfung von Länge des Nagels sowie Winkel des distalen Gelenkes wurde daher konstruktiv umgesetzt.

### 3.6.4 DER BIEGEAKTOR

Aufgrund der hohen Anforderungen an notwendige Kinematiken für elektromechanische Antriebe und besondere Umweltaspekte beim Einsatz hydraulischer Antriebe scheiden diese als Energieträgervariante aus. Aufgrund vielversprechender Erfahrungen mit pneumatischen Aktoren (vergl. [ULR12]) rücken diese auch beim Antrieb des Fingergreifers in den Fokus. Eine angepasste Geometrie und ein polyurethanbasierter gummiähnlicher Werkstoff führen zu einem neuartigen Biegeaktor, bei dem Antriebselement und Gelenk in einem (modernen) Maschinenelement vereint sind. Die damit vorliegende Konstruktion wird gegenüber Antrieben anderer Roboterhände deutlich vereinfacht und ist nahezu verschleißfrei, da sich keine relativ zueinander bewegenden Flächen ergeben. Biegeaktoren werden direkt am gedachten Gelenk platziert und einzeln über Druckluftzufuhr angetrieben. Die einzelnen Bestandteile des Aktors sind in den nachfolgenden Abbildungen 10 und 11 einzusehen:

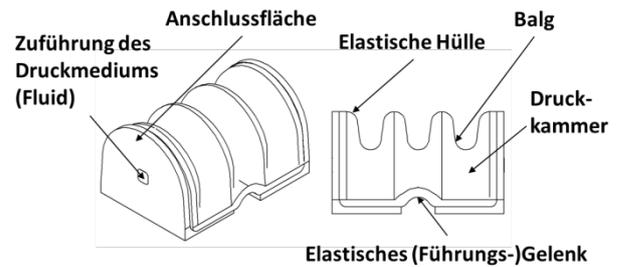


Abbildung 10. Einzelteilbezeichnungen des Biegeaktors mit elastischem Gelenk

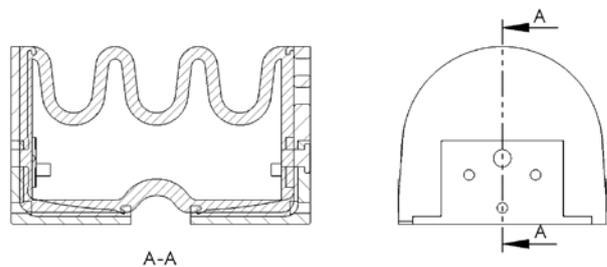


Abbildung 11. Schnitt durch die Seitenansicht des Biegeaktors

Der Aktor besteht aus zwei L-förmigen Stützkörpern an jeder Seite (Anschlussfläche). An diese ist eine innere Stützstruktur angeschlossen, die Teile der elastischen Hülle mit Shore A 60 Werkstoffeigenschaften formschlüssig umschließt. Die elastische Hülle entsteht mittels eines Vakuum-Gießverfahrens. Damit die spätere Druckkammer als Hohlraum hergestellt werden kann, wird ein Wachskern mit in die Gießform eingelegt, welcher nach Aushärtung der elastischen Hülle im Wärmeofen ausgeschmolzen wird. Das elastische Führungsgelenk besteht ebenfalls aus dem gummiähnlichen Gießwerkstoff und wird mittels spezieller Einlagen gegen Materialdehnung in Längsrichtung versteift.

Unter Druckluftbeaufschlagung verformt sich die elastische Hülle so, sodass die drei Bälge sich aufweiten bzw. strecken. Durch diese einseitige Verlängerung wird eine Biegebewegung generiert. Auf den nachfolgenden Abbildungen sind drei Aktorzustände bei verschiedenen Druckniveaus dokumentiert:

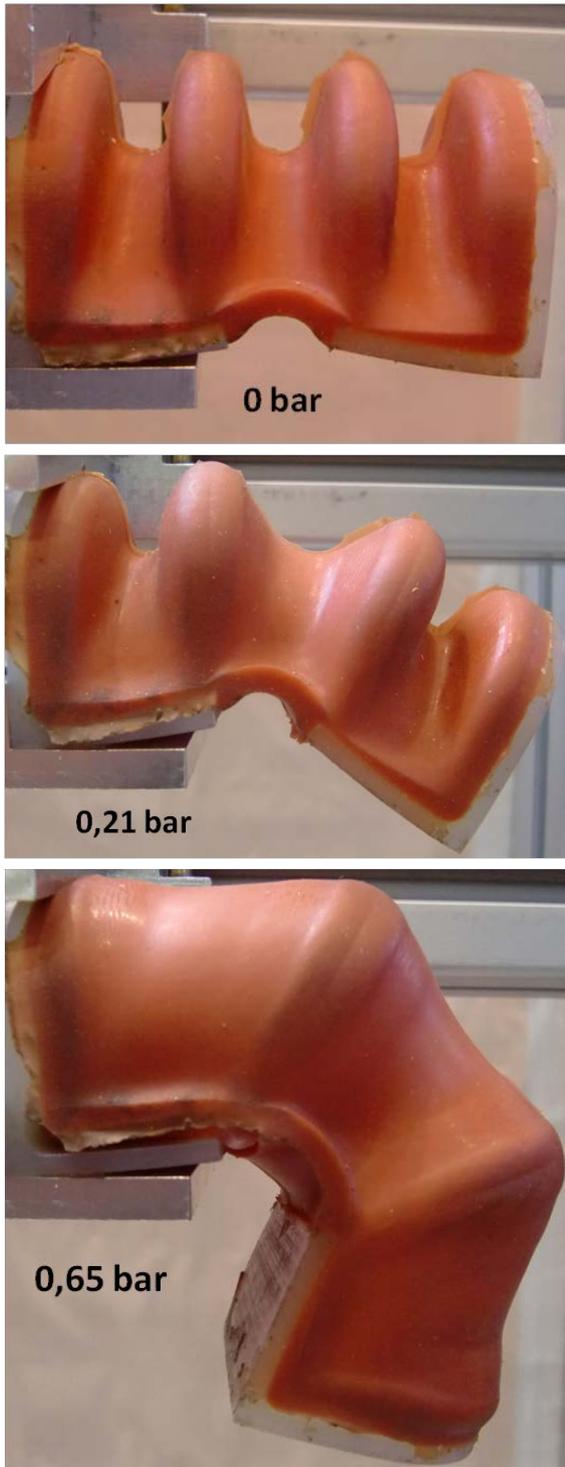


Abbildung 12. Verformung des elastischen Biegeaktors

Prinzipbedingt lässt sich bei Druckabfall die gespeicherte Energie auch bei der Aktorrückbewegung ähnlich einer gespannten Feder nutzen. Erste messtechnische Untersuchungen des Aktors im Labor zeigten bereits aufschlussreiche Ergebnisse. Das verfügbare Drehmoment wurde am rechten freien Ende der Anschlussfläche gemessen (s. Abbildung 12). Im Versuch wurden Biegewinkel bis 110 Grad gemessen.

Größere Winkel erscheinen aktorseitig möglich, haben aber anwendungstechnisch im hier vorgestellten Szenario wenig Bewandtnis. Die beiden folgenden Abbildungen charakterisieren das Verhalten des Biegeaktor-Prototypen:

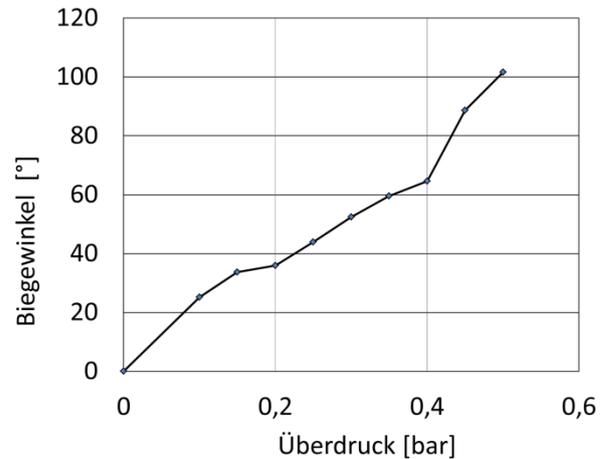


Abbildung 13. Biegung des Aktors in Abhängigkeit vom Überdruck

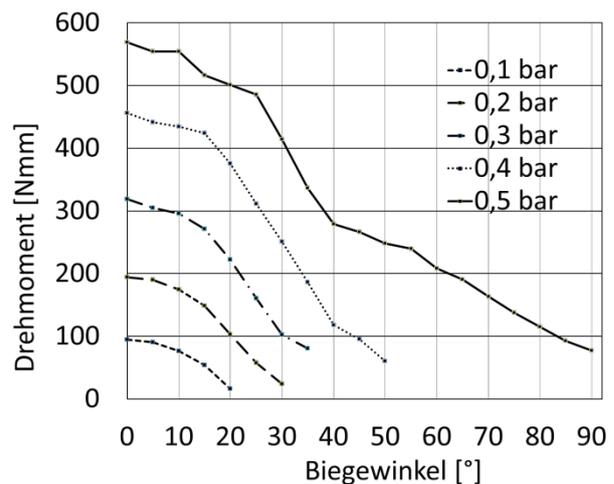


Abbildung 14. Aktor-Drehmoment in Abhängigkeit vom Biegewinkel

### 3.7 UMSETZUNG VOM 3D-CAD-MODELL ZUM PROTOTYPEN

#### 3.7.1 HANDBASIS

Die Handbasis des Greifers wird als Aluminiumkonstruktion gefertigt. Die unter 3.2 erläuterten Fingeranordnungen werden mittels dieses Bauteils vom Winkel her vorgegeben, indem die Greifschalen in ausgefräste Taschen eingesetzt werden. Der Korpus ermöglicht die Montage von Kabeln sowie ggf. die Unterbringung von Elektronik. Am Fuß der Handbasis ist ein Flansch zum Roboter vorgesehen. Eine Trennstelle sorgt dafür, dass der Greifer jederzeit vom

Roboter samt Druckluftschlauchpaket getrennt werden kann. Eine Abbildung findet sich unten stehend:

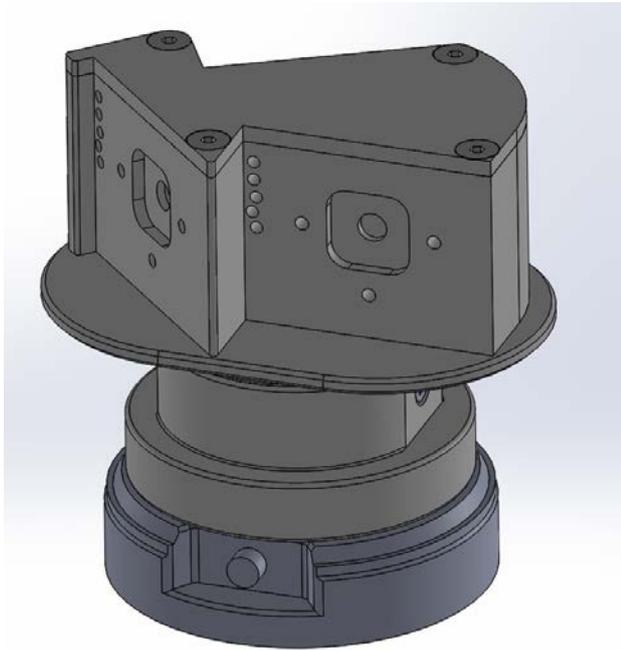


Abbildung 15. Handbasis des Greifers aus Aluminium: Die eingefrästen Taschen zentrieren die Greifschalen

### 3.7.2 GREIFSCHALEN

Die Greifschalen stellen ein Verbindungsglied zwischen Biegeaktor und der Greiferbasis da. Im späteren Einsatzfall stellen die außen liegenden Greifflächen den Kontakt zum Greifobjekt her. Der Aktor wird an jeweils einer seiner Anschlussflächen mit einer im 3D-Druckverfahren hergestellten Greifschale verbunden. In Abbildung 16 ist eine Greifschale im unverbauten Zustand aufgeführt.

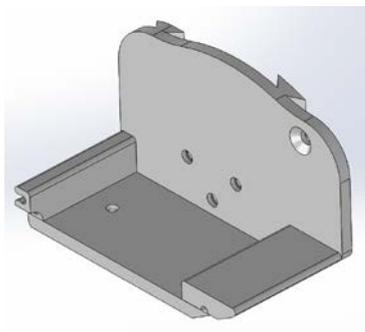


Abbildung 16. Greifschale ohne Anbauteile

### 3.7.3 ZUSAMMENBAU I: FINGER

Eine Aneinanderreihung von drei Baugruppen (zwei Greifschalen, ein Biegeaktor, eine Dichtung und

Verbindungselemente) sowie einer Fingerkuppe (s. 3.4 und 3.6.3) führt zu einem anthropomorphen Greiffinger mit je einem proximalen, medialen und distalen Fingerglied. Einen solchen Zusammenbau zeigt die unten stehende Abbildung 17:

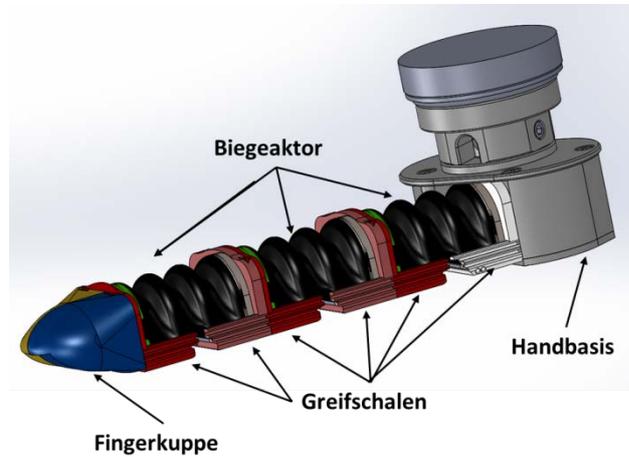


Abbildung 17. Zusammenbau eines Einzel-Greiffingers mit Biegeaktoren und montierten Greifschalen an der Handbasis

### 3.7.4 ZUSAMMENBAU II: GREIFERGESAMTMODELL

In vollständig montierten Zustand ergibt sich vom Greifer das folgende Bild:

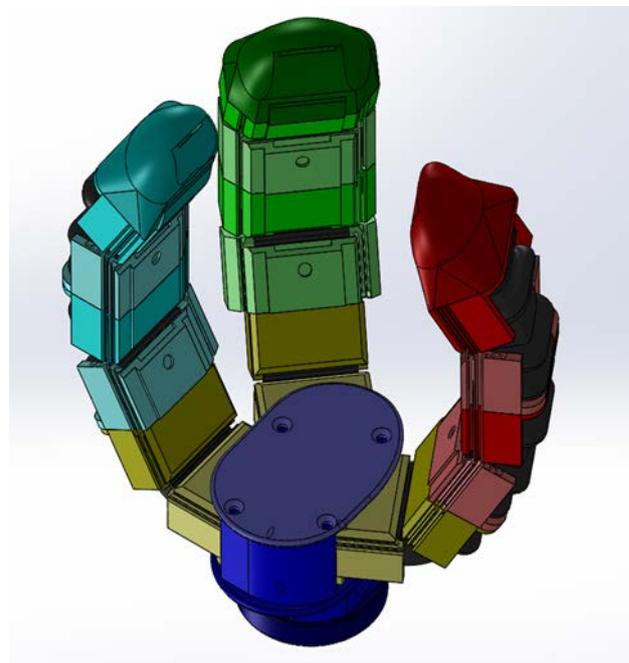


Abbildung 18. Greifergesamtmodell, zur besseren Unterscheidung mit farblich unterschiedlichen Greiffingern illustriert

Mit den oben beschriebenen Fingeranordnungen ergeben sich die gewünschten Wirkpaarungen der

Kontaktflächen, die in nachfolgender Abbildung 19 markiert sind:

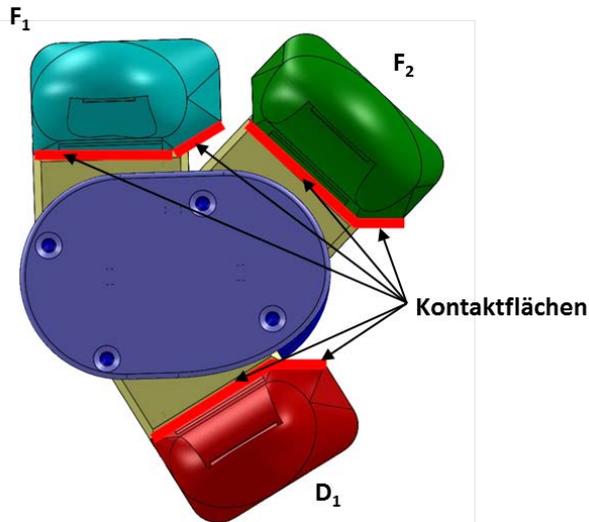


Abbildung 19. Mögliche Kontaktflächen beim Greifen am Gesamtmodell in der Draufsicht bei nahezu geschlossenen Fingern

Da alle für die Bewegung der Finger notwendigen Aktoren innerhalb der Finger verbaut sind, ist der Greifer nach [WEG07] den modular aufgebauten Greifern zuzuordnen. Das Gegenteil wäre die integrierte Bauweise, bei der die Aktorik aus dem Handgehäuse ausgelagert und die Kraftübertragung mittels Seilzügen, Gestängen oder pneumatisch mit Schlächen von einer zusätzlichen Konstruktion im Unterarm aus erfolgt.

#### 4 BEWERTUNG DES GREIFERMODELLS

Der neuartige MTL-Greifer wurde nach Abschluss der vorbereitenden Arbeiten mit zwei für das Anwendungsszenario ebenfalls geeigneten Greifern verglichen, die bereits die Marktreife erreicht haben bzw. schon seit einigen Jahren käuflich zu erwerben sind. Die modular aufgebaute Drei-Finger „Barrett-Hand“ ist ein geschickter Mehrfingergreifer, der in der Lage ist Objekte unterschiedlicher Größe, Form und Lageorientierung sicher zu greifen (vergl. [TOW00]). Als zweite Vergleichsmöglichkeit dient die in integrierter Bauweise konstruierte „Shadow Dexterous Hand“ [KOC05]. Bei dieser hochentwickelten antropomorphe Fünf-Finger Greifhand, angetrieben durch 36 pneumatische Aktoren, wurde die menschliche Handphysiologie bestmöglich abgebildet. Beide Greifmodelle sind mit eingebauten taktilen Sensoren vielseitig regelbar.

Nach einer ersten Gegenüberstellung, wo technische Rahmenbedingungen wie Aufbau, Greifflexibilität und Kenndaten verglichen wurden, brachte eine im Anschluss durchgeführte Nutzwertanalyse (Tabelle 1) weitere Erkenntnisse.

Tabelle 1. Nutzwertanalyse zum MTL-Greifer im Vergleich mit etablierten Greifermodellen

Kriterium	Gewichtung	Dreifinger-Greifer I		Dreifinger-Greifer II		Fünffinger-Greifer	
		Barrett Hand	MTL-Greifer Modell	Barrett Hand	MTL-Greifer Modell	Shadow Dexterous Hand	Shadow Dexterous Hand
<b>Aufbau</b>		40		35		25	
Geringe Komplexität	10	6	60	8	80	2	20
Geringer Steuerungsaufwand	10	5	50	8	80	4	40
Kompakte Bauweise	5	8	40	7	35	8	40
Gute Robustheit	5	5	25	7	35	9	45
Möglichkeit von Zusatzsystemen	5	7	35	8	40	9	45
<b>Flexibilität</b>		25		25		25	
Hohe Geschwindigkeit	5	7	35	5	25	9	45
Realisierung benötigter Griffarten	5	10	50	10	50	10	50
Größe der Kontaktfläche	10	6	60	10	100	8	80
Möglichkeit der Griffkorrektur	5	6	30	5	25	8	40
<b>Wirtschaftlichkeit</b>		10		10		10	
Erwartete Beschaffungskosten	5	6	30	9	45	2	10
Erwartete Unterhaltskosten	5	7	35	8	40	4	20
<b>Anwendungsfall</b>		25		25		25	
Sensible Manipulation der Objekte	10	6	60	8	80	7	70
Greifbarkeit der Objekte	15	9	135	9	135	9	135
<b>Nutzwert Gesamtpunktzahl</b>		<b>100</b>	<b>645</b>	<b>770</b>	<b>640</b>		

Das MTL-Greifermodell verfügt über einen einfachen konstruktiven Aufbau. Das wird durch die integrierte Konstruktion der Biegeaktoren erreicht. Sein Robustheitsmaß und die Fähigkeit zur Griffkorrektur sind Greifereigenschaften, die aufgrund des Fehlens passender Sensorik zurzeit nur durch Annahmen zu bewerten sind. Für einzelne Greifobjekte werden mitunter Nachteile erwartet, da der Grad der sensorischen Ausstattung und Freiheitsgrade beim MTL-Greifer nicht das Niveau der Shadow-Hand erreichen soll. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass in der Logistik technisch überschaubare und finanzielle gut stemmbare Lösungsvarianten im Fokus stehen sollen, um eine rasche Marktakzeptanz erreichen zu können.

Das aktuelle Modell verfügt über die für den Anwendungsfall notwendigen Griffarten. Weitere Griffarten sind vorerst nicht vorgesehen. Der Bewertungspunkt „Wirtschaftlichkeit“ ist aufgrund der geringen Komplexität sowie der einfachen Fertigbarkeit und Montage insbesondere bei den Biegeaktoren, für den MTL-Greifer als hoch anzusetzen.

Eine Nutzbarkeit für den Anwendungsfall ist als Grundlage vorausgesetzt. Es wird jedoch angenommen, dass die Oberflächeneigenschaften einzelner Greifobjekte einen reproduzierbaren und robusten Greifvorgang erschweren können. Eine entsprechende Greifstrategie und die Erprobung im praktischen Laborversuch werden hier Aufschluss liefern. Daher sind Bewertungspunkte, wie die Anwendbarkeit auf den Anwendungsfall sowie die Wirtschaftlichkeit nur geschätzte Größen.

Die jeweiligen Greifkräfte wurden in der Nutzwertanalyse nicht dezidiert untersucht, da die Forschungstätigkeiten an den Biegeaktoren noch nicht abgeschlossen sind. Es wird angenommen, dass die momentan am Biegeaktor nutzbaren Momente noch nicht ausreichen, um das gesamte zur Verfügung stehende Greifobjektspektrum zu erfassen und anzuheben. Die noch nicht abschließend zu beurteilende Spannungsverteilung in der elastischen Hülle und die Kompensation großer Kräfte in der Stützstruktur bzw. über die Anschlussflächen (vergl. Abbildung 10) bieten noch Forschungsbedarf. Hierzu sind weitere simulative und experimentelle Arbeiten an den Aktoren mit einer Variation der Aktorgeometrie und des elastischen Polyurethansystem notwendig. Erste Versuche mit einer Shorehärte A 80 sind vielversprechend.

Schlussendlich liefert das MTL-Greifermodell bei der hier durchgeführten Nutzwertanalyse die höchste Punktzahl. Dies ist vornehmlich dem Umstand geschuldet, dass der hauseigene Greifer speziell für den vorliegenden Anwendungsfall in der Logistik entwickelt wurde. Eine Anwendung in einem späteren automatisierten Kommissionier-Szenario stellt besondere Anforderungen an den Endeffektor des Roboters wie mechanische Haltbarkeit, Robustheit beim Greifen, einfacher Aufbau und preiswerte Beschaffungs- und Wartungsmodalitäten. Die beiden Vergleichsgreifer „Barret Hand“ und Shadow Dextrous-Hand“ weisen in diesen Punkten zum Teil erhebliche Defizite auf, da ihre Stärken eher im Forschungsumfeld oder der Manipulation von Objekten im Hochtechnologiebereich anzusiedeln sind.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Ausgangsfrage der hier skizzierten Arbeiten lag in der Identifizierung eines geeigneten Greifermodells für ein automatisiertes Kommissionier-Szenario. In einer solchen „Kommissionierzelle“ soll ein Industrieroboter selbstständig Waren aus Kisten erkennen, erfassen und in einer anderen Kiste diese ablegen umso eine Kommission mit weiteren Artikeln zu bilden. Für diese spezifische Greifaufgabe wurden Anforderungen an den Greifer formuliert und konstruktiv umgesetzt. Es stellte sich heraus, dass das Klemmgreifen das universellste Greifverfahren darstellt, da es die geringsten Anforderungen an die Greifartikel stellt. In vorangegangenen Arbeiten wurde bereits mit Hilfe der Clusteranalyse ermittelt, dass die aus dem Drogeriebereich stammenden Greifartikel zu unterschiedlich sind, als das ein gängiges Standard-Industriegreifermodell hierfür geeignet wäre.

In darauf folgenden Schritten wurden weitere wichtige Greifermerkmale wie die Anzahl und Ausführungsvarianten der Griffarten, die Anordnung der Finger relativ zur Greiferbasis, die Gestaltung der Greifflächen und die Eigenschaften der Fingerkuppe (Fingernagel) festgelegt. Sie alle prägen nachhaltig das Einsatzspektrum des MTL-Greifers. Zur Vereinfachung der Steuerung bietet der

Greifer bis zu drei Griffarten an, ohne die Finger um die Hochachse drehen zu müssen.

Zum Antrieb der drei Greiffinger wurden pneumatische Biegeaktoren entwickelt. Der Vorteil in dieser Konstruktion besteht in der Integration eines elastischen, verschleißfreien Gelenks innerhalb des Aktors, was einen Drehpunkt unmittelbar am Aktor erlaubt. Dies ermöglicht sehr kleine und kompakte Knickradien der Finger, was wiederum die Ausführung der benötigten Griffarten erleichtert und einen größtmöglichen Formschluss auch für kleinere Greifobjekte realisiert. Im Bereich der nutzbaren Biegeaktor-Drehmomente besteht noch weiterer Forschungsbedarf, da die maßgeblichen Wirkzusammenhänge noch besser verstanden und konstruktiv umgesetzt werden müssen. Die vorliegende Aktorvariante eröffnet jedoch weitreichendes Potential für eine Anpassung der erzeugbaren Kräfte oder eine Variation des Bauraums.

Abschließend bleibt zu bemerken, dass mit dem vorliegenden Greifer-Prototypen eine vielversprechende und vielseitig erweiterbare Konstruktion zur Lösung der oben skizzierten Greifaufgabe gelungen ist. Es wird erwartet, dass die Konstruktion deutlich preiswerter als vergleichbare technische anthropomorphe Greifhände sein wird. In weiteren Arbeiten werden Sensoren zur Bestimmung der Gelenkwinkel und der Flächenpressung zwischen Finger und Greifobjekt implementiert. Es folgt eine kinematische Simulation des Greifprozesses mit Sollwert-Zeitverläufen der Lagefreiheitsgrade und eine dynamische Modellierung des Fingers. Abschließend soll ein passender Regler entworfen und in die Steuersoftware so eingebettet werden, dass eine vorher ermittelte individuelle Greifstrategie pro Greifobjekt abgearbeitet werden kann. In weiteren Arbeiten wird sodann eine systematische Greif-Versuchsplanung unternommen, um ein Zuverlässigkeitsmaß für den neuartigen Greifer zu ermitteln.

Die so entwickelte technische Greifhand unterstützt zusammen mit einem hauseigenen Leichtbauroboter, der für einen Betrieb ohne Schutzumzäunung zugelassen ist, auch die zunehmenden Aktivitäten auf dem Gebiet der Mensch-Maschine-Interaktion. Abbildung 20 zeigt den MTL-Greifer Prototypen montiert am Leichtbauroboter beim Griff in die Kiste. Die Verfahrenswege des Roboters werden zurzeit noch mit geteachten Punkten vorgegeben. Ein sukzessiver technischer Ausbau der Roboter-Plattform ist vorgesehen, sodass die unter 1 genannten Eigenschaften zum selbstständigen Verfahren des Roboters vor- und zu mehreren Regalebenen ermöglicht wird. Mittelfristig ist die Integration von Robotiksystem und Greifer in eine experimentelle "Kommissionierzelle" mit automatischer Bilderkennung vorgesehen.



Abbildung 20. MTL-Greifer Prototyp montiert am Leichtbau-roboter mit erfasstem Drogerieartikel beim Ablegen in einer Kommissionierkiste auf der Messe CeMAT 2014

#### LITERATUR

- [BUT99] Butterfaß, J.: *Eine hochintegrierte multisensorielle Vier-Finger-Hand für Anwendungen in der Servicerobotik*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1999
- [DIN33402] DIN 33402-2: *Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 2: Werte*. Dezember 2005.
- [HES04] Hesse, S. et al.: *Robotergriffe*. Hanser Verlag, 1. Auflage, S. 62, München, Wien, 2004
- [ISE13] Isermann, J.; Ulrich, S.; Bruns, R.: *Generierung von Konstruktionsmerkmalen zur Entwicklung eines bio-inspirierten Kommissionier-Greifers für die Intra-logistik mittels Clusteranalyse*. In: Tagungsband zum 9. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e. V. (WGTL), Seite 177-188, Dortmund, 2013
- [KAR07] Kargov, A. et al.: *Applications of a fluidic artificial hand in the field of rehabilitation*. In: *Rehabilitation Robotics*, Seite 263, Itech Education and Publishing, Wien 2007
- [KOC05] Kochan, A.: *Shadow delivers first hand*. In: *Industrial robot: An international journal*. Ausgabe 32, Nr. 1, Seite 15-16, Emerald Group Publishing Ltd., Bingley (UK) 2005
- [PYL00] Pylatiuk, Ch.; Schulz, St.: *Entwicklung flexibler Fluidaktoren und ihre Anwendung in der Medizintechnik*. In: *Medizinisch-Orthopädische Technik* 120, Seite 186-189, Gentner Verlag Stuttgart 2000
- [STÖ11] Stöckel, T. et al.: *Representation of grasp postures and anticipatory motor planning in children*. In: *Psychological Research*, Jahrgang 76, Ausgabe 6, Seite 768-776, Springer Verlag, Berlin, 2011
- [TOW00] Townsend, W. T.: *The BarrettHand grasper – programmably flexible part handling and assembly*. In: *Industrial robot: An international journal*. Ausgabe 27, Nr. 3, Seite 181-188, MCB University Press, Bradford (UK) 2000
- [ULR12] Ulrich, S., Bruns, R., Freyer, H.: *Complex motions with anisotropic elastomeric actuators*. In: *Conference Proceedings ACTUATOR 2012*, Bremen (2012)
- [WEG07] Wegener, K.: *Ein flexibles Greifsystem für Roboterassistenten im Haushalt*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2007

---

**Dipl.-Ing. Jan Isermann**, was born 1982 in Jeddah, Saudi Arabia. Between 2002 and 2007 he studied production technology at the University of Bremen. Jan Isermann is Research Assistant at the Chair of Machine Elements and Technical Logistics, Helmut-Schmidt-University since 2012.

Address: Helmut-Schmidt-University, Holstenhofweg 85, D - 22043 Hamburg, Phone: +49 (0)40 / 6541-2512, Fax: +49 (0)40 / 6541 2095  
E-Mail: jan.isermann@hsu-hh.de