

Konstruktion einer myoelektrischen Hand

Alexander Martens, Hochschule Wismar

alexander.martens@stud.hs-wismar.de

Olaf Hagendorf, Hochschule Wismar

Olaf Simanski, Hochschule Wismar

Zusammenfassung

Durch den Verlust von Extremitäten werden Menschen in ihrer üblichen Lebensweise stark eingeschränkt. Um ihnen ein gewissen Grad an Freiheit zurückzugeben, werden Prothesen entwickelt.

Im Folgenden wird die Simulation und Konstruktion einer künstlichen Hand untersucht. Dabei werden verschiedenste Antriebssysteme, Gelenkanordnungen, Übertragungssysteme für die Kraft, Sensoren gegenübergestellt und eine Idee für den Aufbau eines Unterarmes diskutiert. Mithilfe von Sensoren wird das Fühlen der Hand ermöglicht, welches genutzt wird, um das Greifen einer Tomate und eines gefüllten Wasserglases zu realisieren.

1 Stand der Technik

Künstliche Extremitäten werden in aktive und passive Prothesen unterschieden. Die passiven Prothesen bleiben starr bzw. können ihre Griffposition nur mit Hilfe der gesunden Hand verändern. Dabei beschränken sich die Aufgaben auf das Festhalten von Gegenstände und das Führen von Werkzeuge. Sie werden verwendet, wenn funktionelle Prothesen abgelehnt oder auch Funktionen nicht ersetzt werden können. Passive Prothesen sind einfacher in der Handhabung und können auf Aussehen, Tragekomfort und Gewicht optimiert werden.

Bei aktiven Prothesen werden die unterschiedlichsten Muskelpotentiale genutzt und in eine Bewegungen umgesetzt. Zu den aktiven Prothesen zählen zugbetätigte Armprothesen und myoelektrische Armprothesen.

Die zugbetätigten Armprothesen können weiter in Systemhände und Hooks unterteilt werden. Die Armprothesen werden dabei über den Stumpf und/oder den Schultergürtel mithilfe eine Kraftzugbandage gesteuert. Die Kraftzugbandage leitet die Bewegung in die Prothese weiter. Mit zugbetätigte Armprothesen sind nur einfache Bewegungen möglich. Systemhände lassen sich sehr gut an das Erscheinungsbildes des Patienten anpassen. Sie werden über Zug aktiv geöffnet und schließen selbstständig. Eine Fixierung der Position kann mit einer integrierten Verriegelung erfolgen. Hooks sind auf hohe Griffpräzision optimiert, dass ermöglicht ein Arbeit mit kleinen Gegenständen. Ihr robuster Aufbau macht es möglich,

möglichst geringes Endgewicht erreicht wird. Sollte der Rahmen aufgrund des verwendeten Materials brechen oder reißen, kann dieser mit Carbonstäbe versteift werden.[4]

Als Muskellersatz stehen Schrittmotoren, Servomotoren, Hydraulik-, und Pneumatiksysteme zur Auswahl. Dabei muss Bauform, Preis, Stellgenauigkeit und Drehmoment bzw. Druck- und Zugkraft beachtet werden. Schrittmotoren sind in sehr kleinen Bauformen verfügbar. Ihre Stellgenauigkeit ist mit $1,8^\circ$ pro Schritt am größten. Das Drehmoment von ca. 80Nm ist mit dem der Servomotoren vergleichbar. Servomotoren sind im Vergleich zu den Schrittmotoren einfacher anzusteuern. Hydraulik- und Pneumatiksysteme werden über Ventile gesteuert. Die aufgebrachte Kraft von 80N , bei kurzen Zylindern, ist dabei vergleichbar mit der erzeugten Kraft der Schrittmotoren. Diese Systeme benötigen im Betrieb eine Pumpe bzw. Kompressor und ein Schlauchsystem zum Verteilen des Fluides. Die Anschaffungskosten sind ca. dreimal größer als bei Schrittmotoren bzw. Servomotoren mit vergleichbarer Leistung. Zudem benötigen die Zylinder mehr Platz als Motoren. Zur Stellgenauigkeit kann keine Aussage getroffen werden, da keine Baugruppen zum Testen zur Verfügung standen. Die Motoren sind rein elektrische Antriebe. Sie werden über ein Steuerungsboard angeschlossen und benötigen keine zusätzliche Hardware, wie Ventile oder Ähnliches um ihre Funktion aufzunehmen. [5]

Die aufgebrachte Kraft der Antriebe muss zu den einzelnen Gelenken übertragen werden. Dazu können Stahllitze, Angelsehne, herkömmliche Kupferlitze und Formgedächtnislegierungen (FGL) verwendet werden. Stahllitze ist sehr dünn und wird mittels Schraubklemmen miteinander verbunden. Aufgrund ihrer hohen Reißfestigkeit, mit einer geringen Federkonstante, eignen sie sich gut um die einzelnen Gelenke in die gewünschte Position zu bringen und dort zu halten. Angelsehne hat gegenüber der Stahllitze den Vorteil, dass diese geknotet werden kann. Die Reißfestigkeit ist mit sehr geringem Durchmesser sehr hoch. Kupferlitze kann gelötet oder auch mit Schraubklemmen fixiert werden. Die Reißfestigkeit ist bei gleichem Durchmesser geringer als bei Stahllitze.

Eine Kombination aus Antrieb und Übertragungssystem wären Formgedächtnislegierungen (FGL). Dabei handelt es sich um spezielle metallische Werkstoffe, welche die Fähigkeit besitzen ihre ursprüngliche eingeprägte Form nach einer Deformation wieder einzunehmen (Einwegeffekt). Die Vorteile dieser Werkstoffe sind hohe Stellkräfte, große Flexibilität, geringes Gewicht und die Geräuschlosigkeit. Der größte Nachteil sind womöglich die hohen Stellwege.[6]

Eine Hand besteht hauptsächlich aus Sehnen und Knochen. Die Knochen sind über Gelenke miteinander verbunden und werden nur durch die Sehnen zusammengehalten. Je mehr Gelenke pro Finger zur Verfügung stehen, umso beweglicher ist er. In den ersten Betrachtungen wird der maximale Winkel pro Gelenk mit 35° festgelegt. Der vorderste Punkt eines jeden Fingers wird als Tool Center Point (TCP) bezeichnet. Bei drei Gelenken pro Finger ist es möglich, die Hand so zu schließen, dass die Fingerspitzen die Daumenspitze berühren (Pinzettengriff), des Weiteren besitzt der Finger seine größte Beweglichkeit (Bild 2).

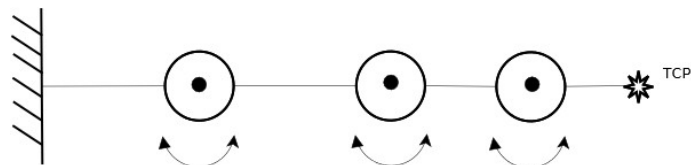


Bild 2: Drei bewegliche Gelenke

Bei zwei Gelenken wird das letzte Gelenk in einem Winkel von 45° versteift. Das hat den Vorteil das runde Gegenstände weiterhin mit dem TCP festgehalten werden können (Bild 3). Der Pinzettengriff ist weiterhin möglich.

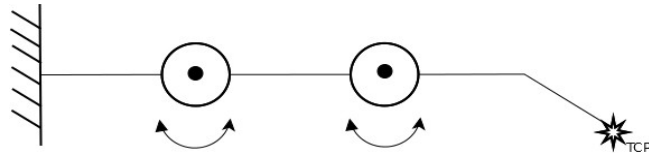


Bild 3: Zwei bewegliche Gelenke

Bei einem Gelenk sind die letzten beiden Gelenk in einem Winkel von je 45° versteift. Bei dieser Anordnung ist die geringste Beweglichkeit zu erwarten, da der Finger sich nur um eine Achse bewegen kann (Bild 4).

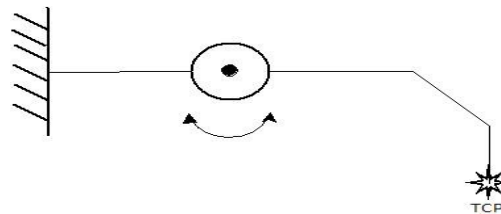


Bild 4: Zwei bewegliche Gelenke

Um am vordersten Punkt des Fingers eine Kraft bzw. ein Druck messen zu können, werden Sensoren benötigt. Dazu können Kraft-, Kapazitiv-, Ultraschall- oder Infrarotsensoren verwendet werden. Da die Sensoren am vordersten Punkt des Fingers untergebracht werden sollen, dürfen sie nur eine geringe Baugröße haben. Bei passiven Kraftsensoren verändert sich mit steigender Belastung der Widerstand. Dabei muss darauf geachtet werden, dass der Stromfluss durch den Sensor 1mA pro cm^2 Sensorfläche nicht überschreitet, da die Erwärmung durch den Stromfluss den Messwert des Sensors verfälscht. Kraftsensoren können sehr flach produziert werden (ab $0,35\text{mm}$). Bei kapazitiven Sensoren wird eine Elektrode in den Finger eingesetzt. Wird nun ein Gegenstand in des elektrische Feld des Sensors gebracht, ändert sich dessen Kapazität, welche messbar ist. Da aber die eingebrachten Gegenstände aus unterschiedliche Stoffe bestehen (ϵ_r - Dielektrizitätszahl) und diese unbekannt sind, kann keine genaue Messungen stattfinden. Entfernungssensoren wie beispielsweise Ultraschall- und Infrarotentfernungssensoren sind in der Bestimmung der Entfernung sehr präzise, haben aber den Nachteil, dass diese sehr groß sind. [7]

3 Simulation einer myoelektrischen Hand

Im folgenden Abschnitt wird die Simulation und Berechnung einer myoelektrischen Hand genauer betrachtet. Dazu wurde die Hand an einen Industrieroboter befestigt. Der KUKA KR3 übernimmt die Aufgabe des Anfahrens an die Gegenstände und die Hand übernimmt das Greifen von Gegenständen.

Um Fingerbewegungen berechnen zu können, muss ein geeignetes Modell der Hand bekannt sein. Dazu gehören Anordnung und Maße der Gelenke. Diese wurden von einer realen Hand übernommen. Zur Vereinfachung wurden alle Finger gleich gestaltet. Das letzte von drei möglichen Gelenken, zwischen Fingerendglied (lat. Phalanx distalis) und Fingermittelglied (lat. Phalanx media), wird im Winkel von 45° versteift. Somit ergeben sich zwei rotatorische Achsen pro Finger (Bild 3). Mithilfe des Modells können Frames erzeugt werden, welche die Position der Gelenke in der Hand beschreiben (Bild 5). [8]

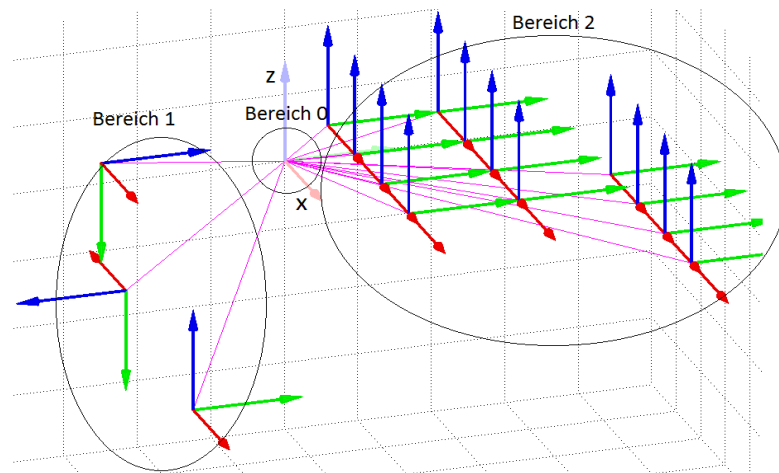


Bild 5: Frames der Hand

Der Bereich „0“ ist der Ursprung der Hand. Auf diesen Punkt werden alle Bewegungen und Ausrichtungen bezogen. Der Bereich „1“ ist der Daumen mit Daumenspitze. Der Bereich „2“ sind die restlichen vier Finger mit Fingerspitzen. Die Fingerspitzen besitzen je einen TCP.

Um die Berechnung zu vereinfachen kann die Hand im zweidimensionalen Koordinatensystem angeordnet werden, da eine seitliche Bewegung der Finger nicht möglich ist und eine Drehung ausschließlich um die x-Achse (rot) des gewählten Frame erfolgt. Aufgrund der zwei rotatorischen Achsen ergibt sich folgender Arbeitsraum (Bild 6).

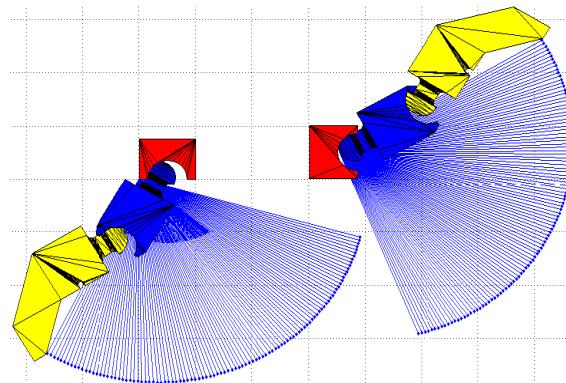


Bild 6: Arbeitsraum der Finger (blau)

Den Randbedingung zufolge soll ein Wasserglas und eine Tomate gegriffen werden können, ohne dass einer der Gegenstände beschädigt wird. In der Simulation wurde das Wasserglas als Zylinder dargestellt. Die Tomate wurde als Kugel angenommen.

Um in der Simulation die Winkel zu berechnen, muss der Radius des Zylinders bekannt sein. Um die Berechnungen weiter zu vereinfachen, wird der Zylinder immer unterhalb des Ursprunges der Hand positioniert. In Bild 7 wird ein Zylinder von den Fingern gegriffen.

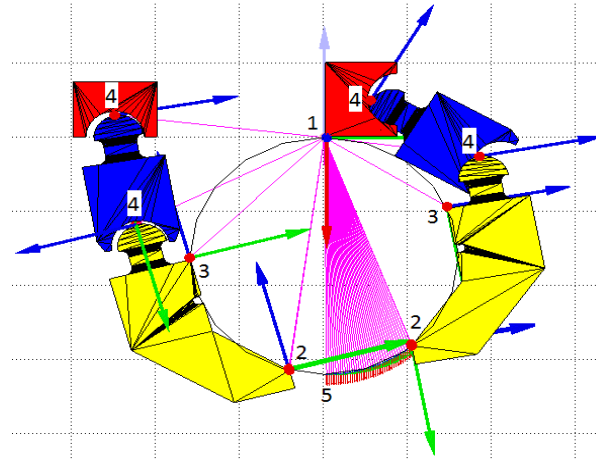


Bild 7: Hand Winkelberechnung

Der Punkt „1“ ist der Ursprung der Hand. Sämtliche Berechnungen beziehen sich auf den Ursprung. Der Punkt „2“ ist jeweils der TCP des entsprechenden Fingers. Um den Zylinder zu greifen, wird senkrecht zum Punkt „1“ ein Frame gesetzt (Punkt „5“). Daraufhin wird berechnet, ob der Zeigefinger diesen Punkt erreichen kann. Kann der Punkt aufgrund der zu großen Länge nicht erreicht werden, wird auf dem Zylinder ein neuer Punkt berechnet. Das wird solange wiederholt, bis der Finger den Punkt erreichen kann. In Bild 7 wird das Verschieben des Punktes durch die rosa Linien dargestellt. Eine Abfrage, ob das Mittelgelenk im Zylinder ist, wird durch das Hilfsframe dargestellt (Punkt 3). Ist der Abstand vom Hilfsframe kleiner als der Radius des Zylinders, befindet sich das Gelenk im Zylinder. Daraufhin wird der Punkt ebenfalls verworfen. Die berechneten Winkel werden im Anschluss abgespeichert und weiterverwendet. Die gleiche Berechnung wird mit dem Daumen vollzogen. Die Punkte „4“ sind die Frames der Gelenke und dienen der Darstellung.

4 Planen und Konstruieren einer myoelektrischen Hand

Im folgenden Kapitel wird die reale Umsetzung einer myoelektrischen Hand beschrieben. Dabei wird auf die Konstruktion der Finger und Rahmen näher eingegangen, sowie die Auswahl der verwendeten Hardware genauer untersucht. Eigens für den Betrieb der Hand wurden elektrische Schaltungen entworfen, die es ermöglichen, die elektrischen Leitungen kompakt zu verlegen und ohne Schwierigkeiten an das Steuerungsboard anzuschließen.

Die Hand mit Unterarm besteht aus einem Rahmen und Finger. Der Rahmen dient als Halterung der Antriebe (Muskeln), sowie als Verbindung zu den Fingern. Für das Konstruieren des Rahmens und der Finger wurde ein 3D-Drucker und ein selektiver Lasersinter genutzt. Mit diesem wurden mehrere Prototypen an Gelenken erstellt, um unterschiedliche Bauformen zu vergleichen und Aussagen über die Eigenschaften des

verwendeten Materials zu geben. Die Maße der Hand wurde einer realen männlichen Hand entnommen. Zur Vereinfachung werden alle Finger mit der gleichen Länge ausgeführt. Des Weiteren wird jeder Finger mit zwei Gelenken ausgestattet. Das ermöglicht eine kompaktere Bauform der Hand. Berechnungen und Ausführung von Bewegungen werden somit vereinfacht. Für die Übertragung der Kraft (Sehnen), von den Antrieben zu den Fingern, wurde Angelsehne verwendet, da diese sehr dünn, reißfest und kostengünstig ist.

Ein normaler Finger besteht aus drei Gelenken. Um das System zu vereinfachen, wurden zwei Gelenke pro Finger festgelegt (Bild 3). Dadurch ergeben sich für jeden Finger zwei rotatorische Achsen. Das Abschlussgelenk (Fingerendglied lat. Phalanx distalis) ist sehr kurz und eine Versteifung spart zusätzliche Antriebe ein.

Der Aufbau der Gelenke orientierte sich am menschlichen Skelett. Im Körper werden die Knochen über Sehnen und Muskeln zusammengehalten, speziell in der Hand werden die Finger über Sehnen gehalten und gezogen. Die Gelenke besitzen Durchführungen für die Sehnen, da ein Herausrutschen die Stabilität des Gelenkes gefährden kann. Das Abschlussgelenk ist mit einem versteiften Glied ausgestattet (Bild 8). Auf die ebene Fläche wurde im späteren Verlauf der Sensor befestigt. Die Antriebe, die Muskeln, sitzen im Unterarm.

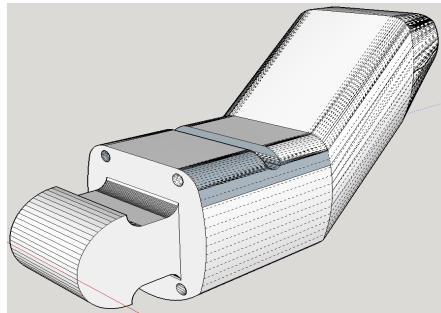


Bild 8: Abschlussgelenk

Der Rahmen übernimmt die Funktion des Unterarms. Dieser dient als Halterung der Gelenke und bietet Platz für die Antriebe der Hand. Die ausgewählten Antriebe wurden in den Rahmen hinein konstruiert, sodass die Motoren einfach in die Halterung hineingeschoben werden können, was eine einfache Montage der Antriebe ermöglicht. Der Rahmen bietet Platz für sechs Hauptantriebe (Zeige-, Mittelfinger und Daumen) und zwei untergeordnete Antriebe (Ring- und kleine Finger). Die untergeordneten Antriebe bewegen die Finger nur für die optische Wahrnehmung und haben keinen Beitrag zum Greifen und Halten von Gegenständen. Im Bild 9 ist der Rahmen mit den Antrieben (blau) dargestellt.

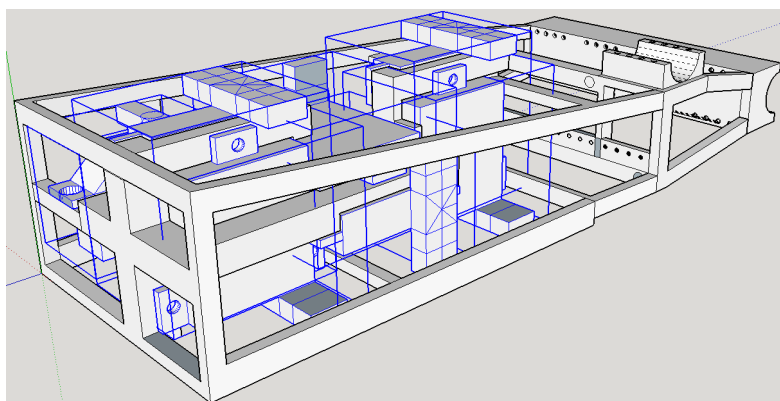


Bild 9: Rahmen mit Antriebe

Die Fähigkeiten und Einsatzbereiche der myoelektrischen Hand werden von der Auswahl der Baugruppen, wie Antriebe, Steuereinheit etc., geprägt. Die Antriebe sind vergleichbar mit den Muskeln. Das Steuerungsboard ist das Nervensystem und die Steuereinheit. Mit den Sensoren wird das Fühlen der Hand ermöglicht. Zusammen soll eine möglichst hohe Funktionalität, hohe Beweglichkeit, hohe Griffgeschwindigkeit, hohe Griffkraft und geringe Defektanfälligkeit erreicht werden. Eine untergeordnete Rolle spielen derzeit das Gewicht, der Energiebedarf und das Aussehen der Hand.

Die Antriebe sind die Muskeln der Hand und für die Griffgeschwindigkeit und Griffkraft verantwortlich. Es soll eine möglichst geringe Bauform, aber dennoch hohe Kraft der Motoren erreicht werden. In die engere Auswahl kamen somit Schritt- und Servomotoren. Ein Test mit vorhanden leistungsschwachen Servomotoren erbrachten so gute Ergebnisse, dass Servomotoren als Antriebe verwendet werden. In diesem Test öffneten und schlossen, zwei sehr kleine Motoren, einen Finger. Jedes Gelenk wurde dabei von einem Servomotor bewegt.

Das Steuerungsboard übernimmt das Einstellen der Motoren, das „Fühlen“ der Hand durch die Sensoren und die Kommunikation mit dem Befehlsgeber „Gehirn“. Der Befehlsgeber ist derzeit MATLAB und gibt die Befehle wie „Hand auf“, „Hand zu“ etc. vor. Das Steuerungsboard muss für die Ansteuerung der Motoren über je eine PWM pro Motor verfügen. Zur Kommunikation werden geeignete Schnittstellen zwischen Steuerungsboard und PC benötigt. Der PC verfügt über die Standardschnittstelle USB. Daher war die Forderung direkt vom Steuerungsboard, mittels USB an den PC, eine Kommunikation aufzubauen oder einen geeigneten Umformer zu verwenden, gestellt. Alle Forderungen erfüllte das STM32F4-Discovery Board. Es besitzt ausreichend Timer für die Erzeugung der benötigten PWM-Signale, außerdem stehen genügend Analog/Digital-Wandler um die Sensorsignale zu diskretisieren zur Verfügung. Mit der integrierten USB-Schnittstelle kann eine Kommunikation zwischen Steuerungsboard und PC ermöglicht werden. Mit der hohen Taktrate des Boards können die verwendeten Algorithmen schnell abgearbeitet werden. Der geringe Preis macht das STM32F4-Discovery Board zusätzlich interessant.

Um die Greifkraft der Hand zu steuern, wird am vordersten Punkt, jedes Fingers, ein Kraftsensor befestigt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Aufgabe, dass ein Glas und eine Tomate gegriffen werden können, ohne eines der beiden Gegenstände zu beschädigen, kann erfolgreich mithilfe der Kraftsensoren und des Steuerungsboard durchgeführt werden.

Für das Festhalten von Gegenständen sind sechs Hauptmotoren und zwei Nebentmotoren zuständig.

Als Erweiterungsmöglichkeiten bietet sich an, die Nebenantriebe in Hauptantriebe umzuwandeln, um somit alle fünf Finger mit den entsprechenden Gelenken steuern zu können. Eine zukünftige Kraftregelung kann ein dynamisches Festhalten mit immer der

gleichen Kraft ermöglichen. Des Weiteren wird angestrebt das Gewicht der Hand und die Größe der Motoren weiter zu reduzieren.

Das letzte Gelenk ist derzeit versteift. Eine Ausführung als bewegliches Gelenk ermöglicht eine höhere Beweglichkeit der Hand.

Derzeit werden die Sensoren auf den Finger geklebt, dadurch liegen diese immer auf und sind nicht vor Beschädigung geschützt. Das leichte Beschädigen könnte durch ein Einlassen in die Finger verhindert werden.

Ein externes Kamerasystem kann das Greifen automatisieren, ohne das wie derzeit Koordinaten vorgegeben werden müssen. Dadurch werden weitere Funktionen, wie das automatische Reparieren von Gegenständen, möglich.

Um die Hand an den Menschen anzubinden, muss eine geeignete Messung von Muskelpotentiale erfolgen. Eine anschließende Verarbeitung ermöglicht dann das Greifen und Halten von Gegenständen.

Ein Untersuchen von weiteren Antriebssysteme und Sensorsysteme könnte die Hand auf Gewicht und Funktionalität verbessern.

Die Fähigkeiten einer Hand vollständig zu ersetzen, ist eine schwere Aufgabe und wurde noch von keiner Firma/Organisation vollständig umgesetzt, daher bieten alle Bereiche einer myoelektrischen Hand Optimierungsmöglichkeiten.

Literatur

[1] <http://professionals.ottobock.de/>

[2] <http://www.srf.ch/wissen/technik/erste-handprothese-mit-tastsinn>

[3] <http://de.wikibooks.org/wiki/Datei:Gray415.png>

[4] Tillmann, Bernhard: *Atlas der Anatomie des Menschen*, Springer, 2005

[5] <http://www.kocomotion.de/schrittmotor.html>

[6] <http://www.ingenieur.de/Themen/Forschung/Metalle-gutem-Gedaechtnis>

[7] Dünow, Peter: Skript Vorlesung Robotik

[8] <http://www.dr-gumpert.de/html/hand.html>