

## Information zum Referenten 1:

**Dipl.-Ing. Andreas Hoch**

### Studium

TU Stuttgart, Maschinenbau

### Berufliche Karriere

Fraunhofer IPA, Stuttgart: Wissenschaftlicher Mitarbeiter

SCHUNK GmbH & Co.KG, Lauffen: Leiter Vorentwicklung



### Derzeitiger Arbeitgeber / Institution

SCHUNK GmbH & Co.KG

[www.schunk.com](http://www.schunk.com)

[info@de.schunk.com](mailto:info@de.schunk.com)

## Information zum Referenten 2:

**MSc Dipl.-Math. (FH) Christopher Parlitz**

### Studium

HfT Stuttgart, Technische Mathematik

HfT Stuttgart, Software Technology

### Berufliche Karriere

Fraunhofer IPA, Stuttgart: Wissenschaftlicher Mitarbeiter

### Derzeitiger Arbeitgeber / Institution

Projektleiter Fraunhofer IPA, Stuttgart

[www.ipa.fhg.de](http://www.ipa.fhg.de)



# Care-O-bot® 3 - Mobiler Serviceroboter mit ausgeprägter Manipulationsfähigkeit

*A. Hoch, Dr. F. Simons, Dr. M. Haag (SCHUNK GmbH & Co. KG)  
C. Parlitz, U. Reiser, M. Hägele (Fraunhofer IPA)*

## Zusammenfassung

Mit der Produktvision Care-O-bot® 3 wird eine neue Klasse von Servicerobotern geschaffen, die durch hohe Funktionalität und ansprechendes Design den Traum vom Haushaltsroboter in greifbare Nähe rückt.

Basis einer erfolgreichen Gesamtintegration ist dabei die Entwicklung mechatronischer Komponenten mit einem möglichst hohen Anteil lokaler Intelligenz.

Eine gewaltige Herausforderung bei der Entwicklung der Komponenten ist die Forderung nach Leichtbau bei gleichzeitig kompakten Abmessungen, hoher Leistungsdichte und niedrigem Energieverbrauch. Diese Eigenschaften sind der Schlüssel für mobile Serviceroboter und erfordern unter anderem die Überarbeitung vorhandener Leichtbauarme und spezifische Weiterentwicklungen einer hierfür geeigneten mechatronischen Hand.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt mobiler Roboter ist die Unversehrtheit der Menschen und die Zuverlässigkeit von Prozessen sicherzustellen. Der Auswertung verschiedener Sensoren und deren Aufarbeitung zu verwertbaren Informationen kommt hier die entscheidende Bedeutung zu. Sinnvollerweise müssen übergeordnete Steuerungen durch integrierte Module mit eigener Intelligenz ergänzt werden. Beispielhaft sei hier die taktile Sensorik auf den Greifflächen genannt, deren Auswertung und Interpretation direkt von der Handsteuerung übernommen wird. Dies ermöglicht erstmals ein reaktives Greifen mit einer komplexen mechatronischen Hand.

Dieser Beitrag führt über die Historie der Entwicklungen in die Technologie des Care-O-bot® ein und gibt einen tieferen Einblick in die SCHUNK Dextrous Hand (SDH), welche die zentrale mechanische Komponente der Manipulationsfähigkeit darstellt.

Das Design der Plattform wird über die aktuell lösbaren Aufgaben des Serviceroboters im Zusammenspiel mit seinem Umfeld begründet. Der Aufbau der Hand basiert auf einer Analyse der Manipulation mit Gegenständen des täglichen Lebens.

## 1 Einführung

### 1.1 Historie des Care-O-bot®

Die Care-O-bot® Entwicklungen ([www.care-o-bot.de](http://www.care-o-bot.de)) sind mobile Serviceroboter zur Unterstützung des Menschen in häuslicher Umgebung. Der erste Care-O-bot®-Prototyp wurde bereits 1998 entwickelt und ist in der Lage, sich sicher und zuverlässig in von Menschen frequentierten Umgebungen zu bewegen.

Care-O-bot® II, aufgebaut im Jahr 2002, ist in der Lage, typische Haushaltsgegenstände zu handhaben, z.B. für die autonome Ausführung von Hol- und Bringdiensten. Gegenüber seinem

Vorgänger ist er zusätzlich mit einem Manipulator, höhenverstellbaren Gehstützen, einem kippbaren Sensorkopf, der zwei Kameras und einen Laserscanner zur Umgebungserfassung beinhaltet, sowie einem Tablett-PC zur Steuerung ausgestattet.

Care-O-bot® 3 ist die neueste Generation dieser erfolgreichen Entwicklungsserie. Als Prototyp eines alltäglichen Haushaltsprodukts vereinigt er zahlreiche Innovationen aus den Bereichen Steuerung, Sensorik und Kinematik. Eine Revolution ist seine Funktionalität der Mensch-Maschine-Interaktion, die im Designkonzept umgesetzt wurde. Das in der Interaktion mit dem Menschen stattfindende Aufgabenspektrum reicht hierbei vom Holen und Darbieten von Haushaltsgegenständen, über Tischdecken bis zum Öffnen von Türen und Schubladen.

## 1.2 Historie der SCHUNK Dextrous Hand

Entwicklungsziel der SCHUNK Dextrous Hand (SDH) war ursprünglich, eine Handhabungseinheit für das industrielle Umfeld zu schaffen, die eine möglichst hohe Einsatzflexibilität (bzgl. Objektgeometrie, Umgebung, etc.) bietet bei minimaler Anzahl von unabhängigen Freiheitsgraden bzw. Achsantrieben und minimaler mechanischer Komplexität.



*Bild 1: Vorläufer der SCHUNK Dextrous Hand*

Das mechanische Konzept der SCHUNK Dextrous Hand baut auf der 2004 entwickelten IPA-Hand [6] auf (Abbildung 1, linkes Bild). Die IPA-Hand wurde im Rahmen des Verbundprojektes "Greifsysteme der Zukunft" (Förderung durch das Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg) vom Fraunhofer IPA entwickelt. Sie besitzt drei Finger mit insgesamt vier angetriebenen Freiheitsgraden, zwei Antrieben sowie einer speziellen Mechanik, welche das situationsbedingte Umschalten der beiden Antriebe auf die vier Freiheitsgrade ermöglicht. Die Grundidee der Hand ist die Ausführung der drei grundlegenden Griffe "Zentrischgriff", "Zylindergriff" und "Pinzettengriff" (vgl. Bild 4). Für die Greifbewegung sind zwei der Finger in ihrer Fingerwurzel kippbar, während der opponierende Daumen steif bleibt. Die drei Griffe werden realisiert über eine entsprechende Umkonfiguration des Daumens (lineare Verschiebung) sowie der zwei opponierenden Finger (zusätzliches synchrones, gegengerichtetes Schwenken um ihre Hochachsen). Details hierzu werden in Kapitel 3 ausführlich beschrieben.

Bei der Konzeption der SDH wurde der Gedanke der drei oben definierten Griffe der IPA-Hand aufgenommen und in ein modifiziertes Konzept überführt. Der SDH Prototyp (Bild 1, zweites Bild von links) übernimmt die zwei schwenkbaren Finger mit dem opponierenden Daumen, der hier jedoch nicht linear verschiebbar, sondern ebenfalls kippbar ist. Zusätzlich erhielt jeder der drei baugleichen Finger ein weiteres angetriebenes Gelenk in der Fingermitte, um ein Umgreifen zu ermöglichen.

Damit erhöhte sich die Anzahl der Freiheitsgrade gegenüber der IPA-Hand auf sieben. Weiterhin erhält jeder Freiheitsgrad einen eigenen Antrieb. Die Finger des SDH Prototyps wurden als fertige Module von Harmonic Drive gekauft.

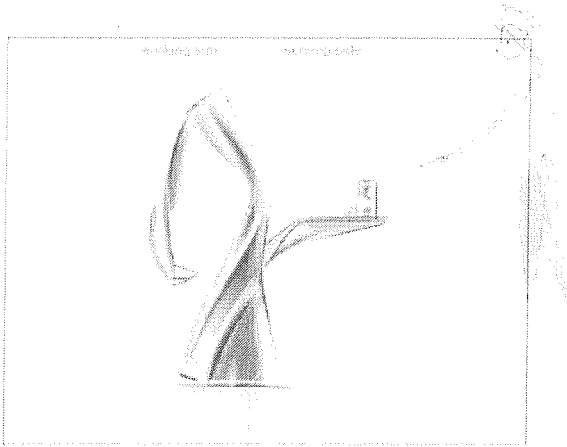
Die SDH 1.0 ist eine grundlegende Weiterentwicklung des SDH Prototyps in Bezug auf Alltagstauglichkeit, Modularität, Design und Ansteuerbarkeit: Die Fingergelenke wurden in Zusammenarbeit mit Harmonic Drive bezüglich Robustheit und Drehmoment komplett neu entwickelt. Alle elektrischen Leitungen wurden nach innen verlegt und die komplette Hand wurde entsprechend der Schutzart IP65 abgedichtet. Für die mechanische Modularität wurde eine Schnittstelle nach Industrienorm geschaffen. Für die steuerungstechnische Modularität sowie die Ansteuerbarkeit wurde die Elektronik inklusive eines kompletten Betriebssystems in das Gehäuse integriert. Die extrem hohe Integrationsdichte wurde durch maßgebliche Unterstützung des Instituts für Prozessrechenstechnik, Automation und Robotik (IPR), TH Karlsruhe erreicht.

Die SDH 2.0 stellt gegenüber der SDH 1.0 eine Weiterentwicklung hinsichtlich Gewicht, Größe, Wärmemanagement, Design sowie Montier- und Wartbarkeit dar.

## 2 Vorstellung Care-O-bot® 3

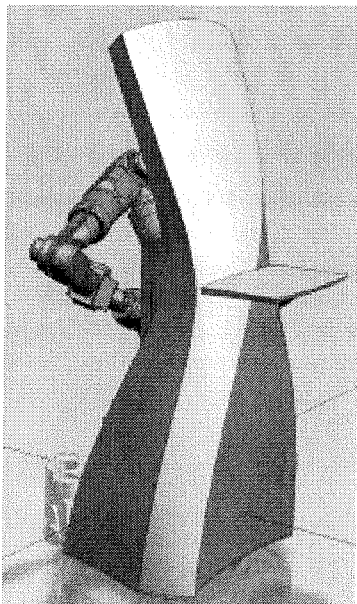
Dem Care-O-bot® 3 liegt das Konzept eines Butlers zugrunde. Das Erscheinungsbild steht hier bewusst im Kontrast zum humanoiden Ansatz. Prinzipiell hat die Gestalt und das Design eines Roboters die zentrale Funktion, dem Nutzer seine Stärken und Fähigkeiten zu vermitteln. Passen jedoch die Fähigkeiten nicht mit den vermittelten Kompetenzen überein, führt dies automatisch zu einer (Ent-)Täuschung des Nutzers. So sind beispielsweise komplizierte Interaktionsmechanismen wie z. B. Sprache und Gestik, die für eine menschliche Kommunikation selbstverständlich sind, maschinell noch nicht ausreichend umsetzbar. Diese werden jedoch automatisch von einem humanoiden Roboter erwartet und können trotzdem (noch) nicht erfüllt werden. Betrachtet man weitere Arten der Interaktion mit einem Humanoiden, verlässt man die herkömmliche und vielfach untersuchte Mensch-Maschine-Interaktion. In diesem Zusammenhang spielt insbesondere das Sozialverhalten eine Rolle [1, 2]. Hier sind die bisherigen Forschungen noch nicht ausreichend, um als Designrichtlinien für Roboter zu dienen. Bei der Wahl einer abstrakten Gestalt, wie dies beim Care-O-bot® 3 umgesetzt wurde, können solche Erwartungen besser gesteuert werden.

Daher wurde aus den oben genannten Gründen das Design des Care-O-bot® 3 bewusst nicht humanoid gewählt, sondern ganz im Gegenteil versucht, menschliche Attribute zu vermeiden und eine technische Wahrnehmung des Nutzers zu forcieren. So sind z. B. zu vermeidende Elemente die Verwendung einer natürlichen Sprache, die Darstellung eines Gesichts, Darstellung von Emotionen und das Annehmen einer sozialen Rolle [1, 3]. Ausgehend von den Aufgaben, die der Roboter bewältigen soll, wurden Funktionalitäten festgelegt. Simultan wurden neue Komponenten (optische Sensoren, Manipulatoren, Greifer, usw.) evaluiert und getestet. Randbedingungen für Größe und Gewicht wurden durch typische Haushaltsumgebungen gesetzt. Auch wurden Erfahrungen aus früheren Roboterentwicklungen [4, 5] genutzt. Aus diesen Rahmenbedingungen wurde eine erste Designskizze entwickelt, wie in Bild 1 zu sehen.



*Bild 1: Erste Designskizze*

Das zugrunde liegende Designkonzept ist, dem Roboter zwei verschiedene Seiten zu geben. Eine Seite ist die „Arbeitsseite“ und dem Menschen abgewandt. Dort sind alle technischen Komponenten angebracht (z. B. Manipulatoren und Sensoren), die nicht verkleidet werden können und eine direkte Verbindung zur Umgebung haben müssen. Auf der anderen Seite ist die Bedienseite, die eine für den Nutzer angenehme und ästhetische Gestalt hat - und ohne sichtbare technische Komponenten. Hier finden alle Mensch-Maschine-Interaktionen statt. Aus den zur Verfügung stehenden Komponenten und dem Designkonzept wurde über viele Iterationsschritte eine Design-Technik-Konvergenz erreicht, so dass ein erstes technisches Rendering (Bild 2) erzeugt werden konnte.



*Bild 2: Erstes technisches Rendering*

Für den weiteren Aufbau wurde der Roboter in die folgenden technischen Komponenten unterteilt:

- Mobile Einheit und Basis: Der Roboter hat eine omnidirektionale Plattform, die von 4 Rädern angetrieben wird. Hier befindet sich auch ein Lithium-Ionen-Akku zur Energieversorgung.
- Torso: Enthält die primären Steuerungssysteme und stützt die oberen Komponenten
- Manipulator: Besteht aus einem 7-DOF Manipulator mit einem 6-DOF Kraft-Momentensensor und einer 7-DOF Greifhand.

- Tablett: Das Tablett ist primär für die physikalische Mensch-Roboter-Interaktion zuständig und wird beispielsweise bei der Objektübergabe genutzt. Es enthält einen Touchscreen und lässt sich durch eine Schwenkbewegung elegant an den Torso anlegen.
- Sensorträger mit Sensoren: Neben Laserscannern und Ultraschallsensoren, die hauptsächlich für die Navigation verwendet werden, hat der Roboter ein StereoVisionssystem und einen TOF-Sensor, die auf einem 5-DOF Sensorträger sitzen.
- Der Roboter hat eine annähernd runde Grundfläche mit einem Durchmesser von ungefähr 0,6 m. Die Gesamthöhe beträgt ca. 1,45 m.

Besonderer Wert wurde auf die Beschaffenheit der Hülle gelegt. Mit Hilfe von flexiblen Materialien und Verbundwerkstoffen wird eine weiche und nachgiebige Form geschaffen. Die Hülle nimmt die Bewegungen, die durch die Ausrichtung der Sensoren entstehen, auf und vermeidet Scher- und Quetschstellen.

## 2.1 Plattform und Navigation

Der Care-O-bot® 3 hat eine omnidirektionale Plattform, mit vier gelenkten und angetriebenen Rädern. Diese Kinematik ermöglicht es dem Roboter, aus jeder Orientierung heraus in jede beliebige Richtung zu fahren und damit auch enge Passagen sicher zu passieren. Die vier Antriebseinheiten mit jeweils zwei Motoren sind unabhängig voneinander, so dass sie individuell zusammenstellt und für unterschiedliche Kinematiken verwendet werden können. So kann mit dem Care-O-bot® 3 nicht nur omnidirektional gefahren werden, sondern auch beispielsweise eine differentielle Kinematik für Softwareevaluierungen simuliert werden.

Der Roboter ist in der Lage, unbekannte Umgebungen selbstständig zu erkunden, diese dabei zu kartieren und zukünftig für Navigation zu verwenden (SLAM). Hierzu hat der Roboter zwei Laserscanner, die für die Navigation und Lokalisierung verwendet werden können, aber auch als Schutzfunktion gegen Kollisionen mit Hindernissen fungieren. Die Kompaktheit der Plattform wird durch die Dimension der Energieversorgung begrenzt. Die Batterien erlauben eine kontinuierliche Laufzeit von ca. einem halben Tag bei einem ausreichend sicheren Stand für Manipulationsaufgaben.

## 2.2 Softwarearchitektur und Middleware

Für die Auswertung und Steuerung von Sensorik und Aktorik innerhalb des Roboters werden mehrere vernetzte Rechner eingesetzt. Für die Koordination und Verwaltung der Systemressourcen wird eine spezielle Middleware genutzt, die die Kommunikation zwischen den einzelnen Prozessen regelt und im Fehlerfall passend reagiert. Die vom Fraunhofer IPA entwickelte Steuerungsarchitektur »Go« operiert auf Task-Ebene und wurde in der Programmiersprache Python entwickelt, um Komponenten unterer Architekturebenen zu integrieren und zu kontrollieren. »Go« ermöglicht die Definition von hierarchischen Aktionen individueller Systemkomponenten. Die Aktionen können synchron oder asynchron bzw. zyklisch oder einmalig ausgeführt werden. Mithilfe von Synchronisationsmethoden kann gewährleistet werden, dass Aktivitäten nicht auseinanderlaufen, bzw. nach Beendigung wieder zusammengeführt werden. Um auch Aktivitäten über verschiedene Rechner hinweg zu kontrollieren, wurde vom Fraunhofer IPA zusätzlich die Komponente »GoCo« entwickelt, die eine Kommunikation über das TCP/IP Protokoll ermöglicht. Weitere Tools für den Austausch großer Datenmengen zwischen Prozessen oder für das Debugging ermöglichen eine effiziente Entwicklung.

## 2.3 Multimodale Mensch-Maschine-Interaktion

Die primäre Schnittstelle zwischen Care-O-bot® 3 und dem Benutzer besteht aus einem an der Vorderseite des Roboters angebrachten Tablett, das zwischen dem Menschen und dem Roboter auszutauschende Objekte trägt. Es enthält einen Touchscreen und klappt bei Nichtgebrauch automatisch ein. Die graphische Eingabeschnittstelle wird sowohl zur direkten Interaktion am Roboter,

z. B. zur Steuerung und Bereitstellung von Informationen für Unterhaltungs- und Informationsroboter als auch zur Fernsteuerung des Roboters eingesetzt. Sie informieren den Benutzer über den aktuellen Betriebszustand des Roboters und ermöglichen eine Unterbrechung und Anpassung der aktuell durchgeführten Aktionen.

Als weitere Kanäle stehen eine Sprachsteuerung und Sprachausgabe zur Verfügung. Die natürlichsprachliche Kommunikation mit interaktiven Servicerobotern bietet gegenüber herkömmlichen Steuerungen den großen Vorteil, dass der Benutzer Augen und Hände frei hat und während der Interaktion mit dem Roboter nicht an einen Ort gebunden ist. Auf diese Weise können Erkennungsalgorithmen, die Informationen über die aktuelle Position eines menschlichen Gegenübers sowie dessen Bewegungen aus Sensordaten extrahieren können, die Basis für eine erweiterte Kommandierung des Care-O-bots® schaffen. Dafür wurde am Fraunhofer IPA ein Erkennungsverfahren

realisiert, das, basierend auf einer Tiefenbildkamera, den Menschen in 3-D detektiert sowie relevante Gelenkstellungen berechnet. Basierend auf diesen Daten können in Verbindung mit den zusätzlichen Kommunikationskanälen uneindeutige Anweisungen wie z. B. »Fahre dort hin!« erkannt und umgesetzt werden. »Dort hin« wird dabei mittels einer entsprechenden Zeigegeste spezifiziert.

Obwohl die meiste direkte Interaktion zwischen Mensch und Roboter über das Tablett erfolgt (z.B. Objektübergabe) kann für das Einlernen neuer Aufgaben der Roboter am Arm geführt werden. Dafür werden die auf den Roboterarm eingebrachten Kräfte mithilfe eines Modells in angemessene Bewegungen des Roboterarms überführt.

## 2.4 Fähigkeiten

Care-O-bot® 3 wurde konzipiert, um innerhalb typischer Haushaltsumgebungen bestimmte Rollen einzunehmen. Die Hauptrolle ist die des bereits erwähnten Butlers, der mit den in seinem Umfeld befindlichen Gegenständen und Geräten interagieren kann. So ist der Roboter grundsätzlich dafür ausgelegt, dem Menschen zu dienen und ihm lästige Aufgaben abzunehmen. Die Hardware des Roboters ist ausgelegt, um z.B. das Decken eines Tisches, das Öffnen von Türen und Schubladen, das Bedienen von Hausgeräten und die Kommunikation mit der Haustechnik zu ermöglichen. Der Arm des Roboters erreicht sowohl den Boden als auch höhere Ablagen. Eine Verknüpfung mit dem Internet erlaubt es dem Roboter, die Rolle eines Info-Terminals anzunehmen oder gar die eines Begleiters, um den Nutzer mit Informationen zu versorgen oder zu unterhalten.

## 2.5 Mechatronische Komponenten

Beim Aufbau einer mobilen Serviceroboterplattform kann bereits auf kommerziell entwickelte, serviceroboterspezifische Komponenten zurückgegriffen werden. Im Gegensatz zu ihren Vorgängermodellen haben die maßgeblichen mechatronischen Komponenten der Servicerobotik wie Fahrtriebe, Greifhände, Gelenkmodule oder Manipulatoren inzwischen einen sehr hohen Reifegrad erreicht. SCHUNK stellt speziell für die mobile Servicerobotik entwickelte und aufeinander abgestimmte Komponenten mit einem hohen Integrationsgrad zur Verfügung und unterstützt damit in herausragender Weise die Entwicklungen in der mobilen Servicerobotik. Für den Care-O-bot® 3 sind dies Gelenkmodule, Armverbinder, ein Kraft/Momentensensor sowie eine mechatronische Hand.

Im Folgenden wird die dreifingrige mechatronische "SCHUNK Dextrous Hand" (SDH) im Detail vorgestellt.

### 3 Mechatronische Hand – Basis der Manipulationsfähigkeit

Als Endeffektor des Care-O-bot® 3 Arms kommt die Greifhand SDH mit sieben Freiheitsgraden zum Einsatz. Die Hand mit sechs robusten taktilen Sensorflächen bestückt kann somit eine Berührung örtlich sowie im Betrag auflösen und erlaubt dadurch reaktives Greifen. Ein eigenes internes Betriebssystem läuft auf der in der Handwurzel integrierten highlevel Steuerung und sorgt dafür, dass entsprechende Greifskills direkt angesprochen und ausgeführt werden können. Der von Anbeginn der Entwicklung umgesetzte mechatronische Ansatz macht es jetzt möglich, die komplexen Greif- und Manipulationsaufgaben mit nicht bekannten Objekten aus einem vollwertigen Greifsystem heraus zu meistern.

Die SCHUNK Dexterous Hand wurde zunächst für das industrielle Umfeld entwickelt, ist jedoch auch für das häusliche Umfeld gut geeignet. Die zentrale Herausforderung bei dieser Entwicklung ergab sich durch die zwei Hauptanforderungen, die zunächst gegensätzlicher Natur sind:

- Industrielle Handhabungstechnik verlangt nach einer zunehmend höheren Flexibilität, um die kurzen Produktlebenszeiten und das steigende Variantenspektrum abdecken zu können.
- Gleichzeitig muss aus Gründen der Wirtschaftlichkeit, der Robustheit und der einfachen Wartbarkeit die Komplexität mechatronischer Systeme minimal gehalten werden.

Das Konzept der SDH basiert auf einem modularen System, bestehend aus einer Handkonsole, drei Fingern und insgesamt sieben elektrisch angetriebenen Freiheitsgraden. Jeder Finger ist hierbei aus jeweils zwei Schwenkmodulen aufgebaut, welche über definierte Schnittstellen miteinander verbunden sind. Zwei der Finger sind zusätzlich über einen gemeinsamen Antrieb in der Fingerwurzel synchron um ihre Hochachse drehbar. Durch dieses Konzept ist ein weites Greifspektrum bei minimaler mechanischer Komplexität realisierbar.

#### 3.1 Entwicklungsstrategie

Dem mechanischen Konzept der Hand lag die folgende Entwicklungsstrategie zugrunde:

Im ersten Schritt wurde der Anwendungsbereich der Hand analysiert und daraus die zu handhabbaren Grundgeometrien extrahiert. Hieraus ergab sich, dass sich die meisten der im industriellen und insbesondere im häuslichen Umfeld zu handhabenden Gegenstände aus Kombinationen der drei Geometrien "Ball", "Zylinder" und "Quader" aufbauen lassen. Es war also ein Greifsystem zu entwickeln, welches alle drei Geometrien sicher greifen kann.

Für dieses Handhabungsproblem ist die menschliche Hand die naheliegende bionische Lösung. Es gibt daher bereits eine große Bandbreite an herausragenden Entwicklungen künstlicher anthropomorpher Hände, welche naturgemäß eine hohe Flexibilität aufweisen. Das Entwicklungsziel der SDH war jedoch, die mechanische Komplexität bei Erhaltung einer maximalen Flexibilität zu minimieren.

Im zweiten Schritt wurde deshalb die menschliche Hand in Bezug auf die Handhabung der drei oben identifizierten Grundgeometrien analysiert. Das Ergebnis der Analyse war, dass die menschliche Hand beim Greifen dieser Geometrien immer einer Kombination aus jeweils drei verschiedenen Bewegungsmustern und drei Griffarten folgt. Die Bewegungsmuster sind hierbei

- die "Parallelbewegung",
- die "Winkelbewegung" sowie
- die "umfassende Bewegung".

Die Griffarten sind

- der "Zylindergriff",
- der "Zentrischgriff" sowie
- der "Präzisionsgriff" (auch Pinzettengriff oder Zweifingergriff genannt).

Im dritten Schritt wurde die Komplexität des biomechanischen Konzeptes der Hand auf Basis der identifizierten Bewegungsmuster und Griffarten auf ein Minimum komprimiert und vereinfacht. Auf diese Weise konnte das Konzept der menschlichen Hand mit fünf Fingern und insgesamt 22 Freiheitsgraden auf ein Greifsystem mit drei Fingern mit insgesamt sieben Freiheitsgraden vereinfacht werden.

### 3.2 Das mechanische Konzept

Die gewählte Anzahl von drei Fingern ergibt sich aus den geforderten und oben definierten drei Griffarten: Für den Präzisionsgriff werden nur zwei Finger benötigt. Für die statische Bestimmtheit beim Zylinder- sowie beim Zentrischgriff sind jedoch drei Finger notwendig.

Die minimale Anzahl der Freiheitsgrade pro Finger definieren sich primär aus den geforderten Bewegungsmustern. Für die Winkelbewegung würde jeder Finger lediglich einen Freiheitsgrad in seiner Fingerwurzel benötigen. Für die Parallelbewegung sowie die umfassende Bewegung benötigt jeder Finger jedoch noch einen weiteren Freiheitsgrad im Bereich der Fingermitte (siehe Bild 3). Dadurch ergibt sich ein Minimum von zwei notwendigen Freiheitsgraden pro Finger und sechs Freiheitsgraden pro Hand.

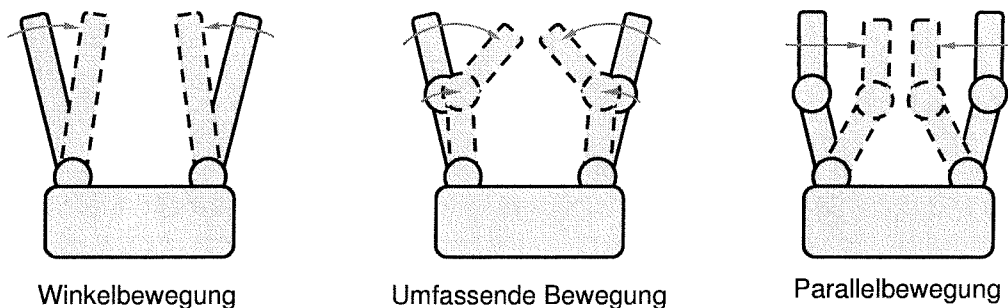


Bild 3: Die drei Bewegungsmuster der SDH

Der siebte Freiheitsgrad ergibt sich wieder aus den geforderten Griffarten. Bild 4 verdeutlicht dies. Hier sind die drei Finger gleichmäßig auf einem Kreis in der horizontalen Ebene der Handkonsole angeordnet. Die Abbildung zeigt, dass alle drei Konfigurationen möglich sind, wenn zwei Finger in ihrer Fingerwurzel um ihre Hochachse synchron und entgegengerichtet schwenkbar sind. In jeder Konfiguration wird hierbei der Schwenkwinkel des einen Fingers am Schwenkwinkel des anderen Fingers gespiegelt. Die Schwenkbewegung beider Finger wurde daher mechanisch gekoppelt und wird von einem gemeinsamen Elektromotor realisiert.

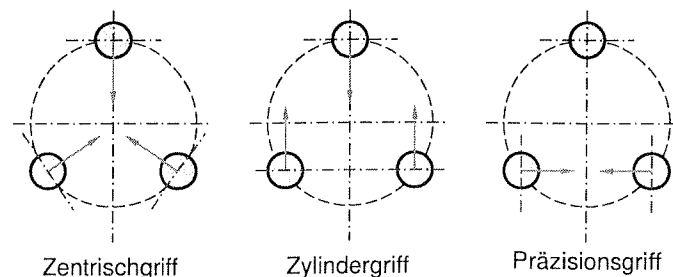


Bild 4: Die drei Griffarten der SDH

Bild 5 zeigt vier Greifsznarien, die sich als Kombinationen aus den oben definierten Bewegungsmustern und Griffarten ergeben. Die oberen zwei Bilder zeigen den Zentrischgriff in Kombination mit der umfassenden Bewegung für kleine und mittlere Objekte (links) sowie für große Objekte (rechts) mit Parallelbewegung. Das untere linke Bild zeigt den Präzisionsgriff mit Parallelbewegung, wobei der dritte Finger als Unterstützung des Objektes dient. Das untere rechte Bild zeigt den Zylindergriff mit umfassender Bewegung.

Die beiden rechten Bilder zeigen gleichzeitig die oberen und unteren geometrischen Grenzen des Greifspektrums der Hand. Nach oben hin ist es durch die Länge des proximalen Fingergliedes sowie durch den Abstand der Fingerwurzeln begrenzt. Der maximal von der SDH greifbare Scheibendurchmesser beträgt 215 mm. Die untere geometrische Grenze ergibt sich allein durch den Fingerwurzelabstand. Zylinder beispielsweise, deren Durchmesser kleiner sind als 50 mm, können im klassischen Zylindergriff nicht mehr sicher gegriffen werden.

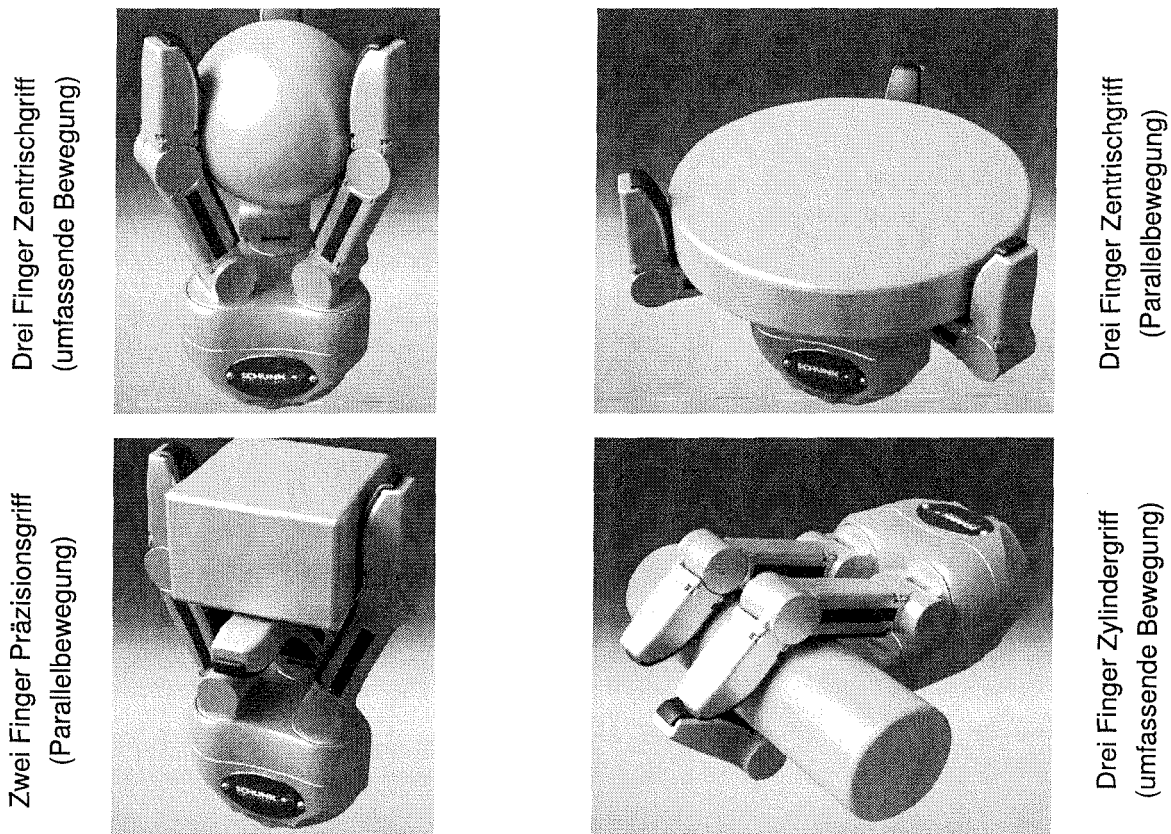


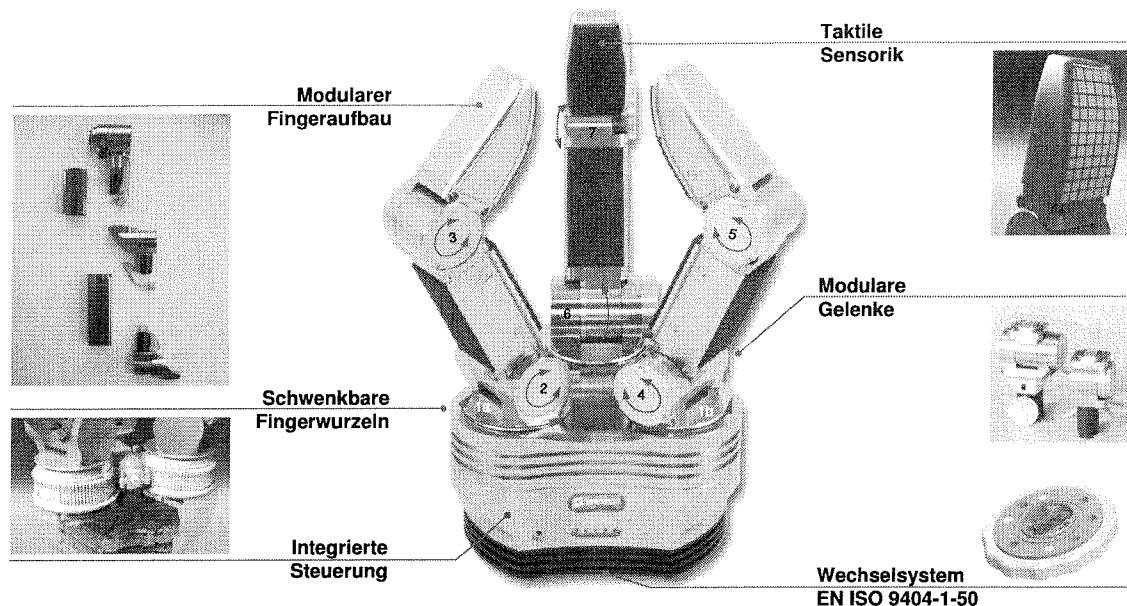
Bild 5: Greifsznarien als Kombinationen aus Bewegungsmustern und Griffarten

### 3.3 Technische Eigenschaften der SDH

Die Miniaturschwenkmodule werden über Motoren von Faulhaber angetrieben und über Getriebeeinheiten übersetzt, die gemeinsam mit Harmonic Drive speziell hierfür entwickelt wurden. Die Maximalmomente betragen 2,1 Nm beim proximalen sowie 1,4 Nm beim distalen Schwenkmodul. Um einen Schutz nach IP65 zu realisieren, wurden alle elektrischen Verbindungskabel innen verlegt. Über einen absoluten Encoder in jedem Gelenk ist die jeweilige Winkelposition jederzeit für die Steuerung verfügbar. Weiterhin ist jedes Miniaturschwenkmodul mit elektrischen Steckern ausgestattet und über längenvariable Leichtbauprofile miteinander verbunden. Auf diese Weise können unterschiedliche kinematische Konfigurationen mit geringem Fertigungsaufwand realisiert

werden. Optional können in die inneren Kontaktbereiche der Finger taktile Sensorflächen integriert werden.

Die Hand kann über eine nach Industrienorm standardisierte Schnittstelle mit einer entsprechenden Peripherie gekoppelt werden. In der Handkonsole befindet sich die komplette Elektronik mit einem eigenen Betriebssystem. In Kombination mit der taktilen Sensorik lassen sich komplexe und geregelte Greifskills implementieren, die ein reaktives Greifen ermöglichen und von einer übergeordneten Steuerung mit einfachen Befehlen abgerufen werden kann.



*Bild 6: Die SCHUNK Dextrous Hand (SDH2)*

Durch die insbesondere für das Greifen von Gegenständen des täglichen Lebens offensichtlich geschickte Anordnung von angetriebenen Bewegungsachsen und Kontaktflächen sind zwar wie oben beschrieben die mechanischen Voraussetzungen für eine robuste Manipulation gegeben. Um aber tatsächlich zu einer Handhabung einer Vielzahl veränderlicher oder nur teilweise in Form und Position bekannter Objekte mit Hilfe der SDH zu kommen, bedarf es einer Rückmeldung und steuerungstechnischen Auswertung entsprechender Sensorik sowie einer darauf basierenden Regelung über den Prozess der Manipulation.

Die SDH wurde daher mit einem taktilen Sensorsystem ausgestattet, welches umfangreiche Informationen über Ort und Wert der Kräfte bei der Berührung mit dem Greifobjekt in Form so genannter Kontaktdruckprofile bereitstellt. Taktilen Messsysteme sind zumindest systemtheoretisch vergleichbar mit optischen Bildaufnehmern, siehe Bild 7. Deshalb können zur Verarbeitung der Messdaten Algorithmen aus der Bildverarbeitung genutzt werden. Damit ist eine hervorragende Basis zur Identifikation der Objektgeometrie und ihrer Orientierung in einem sich ständig ändernden Umfeld manipulierender Serviceroboter gegeben. Insbesondere für die Durchführung reaktiven Greifens empfindlicher Gegenstände wie Gläser oder Früchte bildet die taktilen Sensorik die Eingangsgröße der auf der Handsteuerung ablaufenden Impedanzregelung. Integriert wurden insgesamt sechs taktile Sensorfelder mit Signalaufbereitung in wasserfester Ausführung.

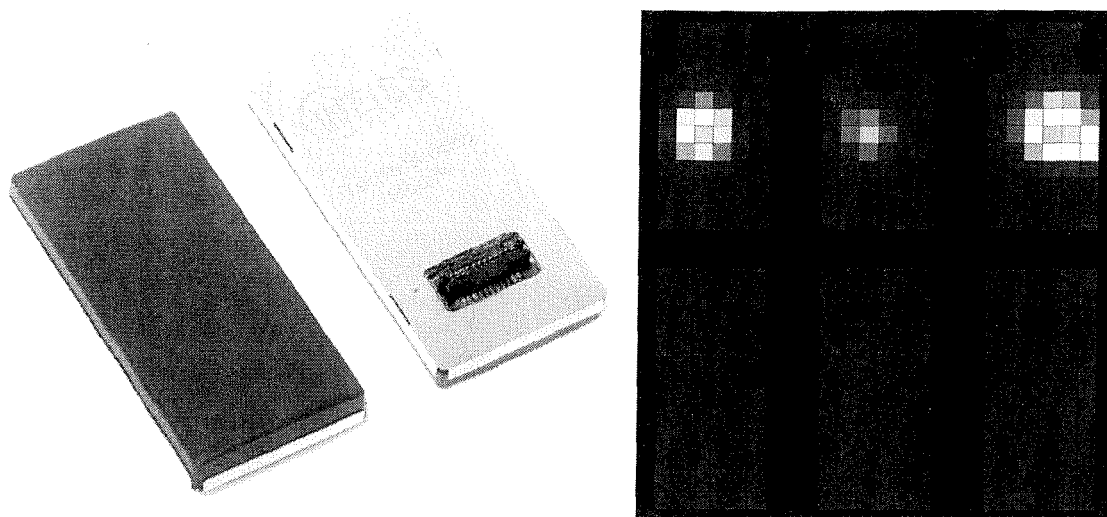


Bild 7: Taktile Sensorik von Weiss Robotics / Darstellung eines Druckprofils in farbencodierter Darstellung

## 4 Literatur

- [1] C. Nass: "Etiquette equality: exhibitions and expectations of computer politeness", in: Communications of the ACM, vol. 47, no. 4, pp. 35–37, 2004.
- [2] S. Parise, S. Kiesler, L. Sproull, and K. Waters, "Cooperating with life-like interface agents", Computers in Human Behavior, vol. 15 (1999), no. 2, pp. 123–142, [Online. Available]: [http://dx.doi.org/10.1016/S0747-5632\(98\)00035-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0747-5632(98)00035-1)
- [3] C. Nass, J. S. Steuer, L. Henriksen, and C. Dryer, "Machines and social attributions: Performance assessments of computers subsequent to 'self-' or 'other-' evaluations", International Journal of Human-Computer Studies, vol. 40 (1994), pp. 543–559
- [4] B. Graf and O. Barth, "Entertainment robotics: Examples, key technologies and perspectives", in IROS-Workshop "Robots in Exhibitions", 2002.
- [5] M. Hans and B. Graf, "Robotic home assistant Care-O-bot II", in: Advances in Human-Robot Interaction, E. P. et al., Ed. Heidelberg, Germany: Springer Berlin / Heidelberg, 2004, pp. 371–384.
- [6] Wegener, Kai: "Ein flexibles Greifsystem für Roboterassistenten im Haushalt", Heimsheim : Jost-Jetter Verlag, 2007, (IPA-IAO Forschung und Praxis 456). Stuttgart, Univ., Fak. Maschinenbau, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss. 2007

## Tagungsband

Internationales Forum Mechatronik 2008

22. & 23. September 2008

ICS - Internationales Congresscenter Stuttgart

Neue Messe Stuttgart, Parallel zur MOTTEK