

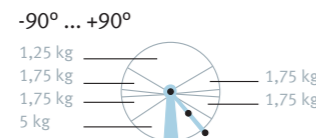
## Technische Daten

### Allgemeine Angaben:

Kinematik	Serielle 4-Achs-Kinematik, rotatorische Gelenke
Aktoren	12 pneumatische Muskeln
Sensoren	1 Neigungssensor, 3 Potentiometer
Rechner	Industrie PC, Dual Core 2,66 GHz unter Windows XP
Software	Matlab/Simulink mit automatischer Code-Generierung mit RealTimeWorkshop für Windows Target
Massen (ca.)	Dreher: 2 kg, Oberarm: 2,2 kg, Unterarm: 2,4 kg, Hand: 0,2 kg
Luftleistung (bei 6 bar)	typisch: 60 L/min (600 W), maximal: 250 L/min (2 500 W)

### Achse 1: Schultergelenk

Bewegungsbereich  
Maximale Nutzlast

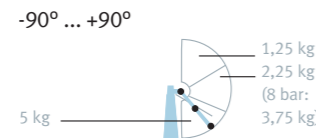


Aktoren  
2 x 40 mm pneumatische Muskeln, 6 bar max.

Maximale Winkelgeschwindigkeit 570°/s  
Maximale Leistung 372 W  
Inhärente Nachgiebigkeit 0,6 Nm/°  
(über Mitteldruck einstellbar)

### Achse 2: Oberarmgelenk

Bewegungsbereich  
Maximale Nutzlast

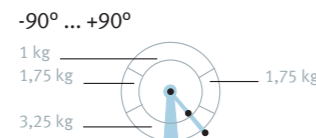


Aktoren  
4 x 20 mm pneumatische Muskeln, 6 bar max.

Maximale Winkelgeschwindigkeit 458°/s  
Maximale Leistung 215 W  
Inhärente Nachgiebigkeit 0,2 Nm/° ... 0,6 Nm/°  
(über Mitteldruck einstellbar)

### Achse 3: Ellenbogengelenk

Bewegungsbereich  
Maximale Nutzlast



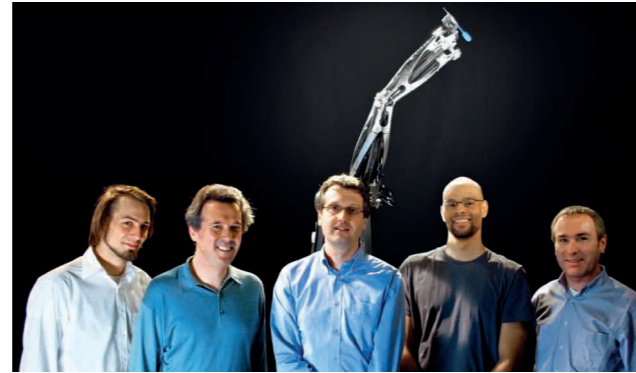
Aktoren  
4 x 10 mm pneumatische Muskeln, 8 bar max.

Maximale Winkelgeschwindigkeit 460°/s  
Maximale Leistung 32 W  
Inhärente Nachgiebigkeit 0,057 Nm/° ... 0,073 Nm/°  
(über Mitteldruck einstellbar)

### Achse 4: Handgelenk

Bewegungsbereich  
Aktoren

-45° ... +45°  
2 x 10 mm pneumatische Muskeln, 8 bar max.



## Projektbeteiligte

Projektinitiator:  
Dr. Wilfried Stoll, Aufsichtsratsvorsitzender der Festo AG

Universität für industrielle und künstlerische Gestaltung Linz:  
Studienrichtung Industrial Design/scionic®  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Axel Thallemer, Leiter Industrial Design  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Martin Danzer, Leiter CAID  
Christoph Brandner, Dominik Diensthuber, Martin Frittajon,  
Michael Kogelnik, Dieter Lang, Michael Paar, Bernhard Rogler,  
Marinus Schmid, Peter Zehetbauer, Emanuel Zeindlinger

Technische Universität Ilmenau:  
Institut für Mikrosystemtechnik, Mechatronik und Mechanik der  
Fakultät für Maschinenbau und Fakultätsübergreifendes Institut  
für Mikro- und Nanotechnologien, Fachgebiet Biomechatronik  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte  
Dr.-Ing. Emanuel Andrada, Dipl.-Ing. Tobias Schmidt

Technische Universität Ilmenau:  
Fakultät für Informatik und Automatisierung  
Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik  
Fachgebiet Systemanalyse  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph Ament, Fachgebietsleiter  
Dipl.-Ing. Tran Trung Nguyen  
Dr.-Ing. Mike Eichhorn, Sebastian Gropp

Friedrich-Schiller-Universität Jena:  
Institut für Spezielle Zoologie und Evolutionsbiologie  
mit Phyletischem Museum  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Martin S. Fischer, Direktor  
Dipl.-Biol. Martin Gross, Dipl.-Biol. John A. Nyakatura

Fotos: scionic® I.D.E.A.L. und die jeweiligen Universitäten

## Festo AG & Co. KG

Corporate Communication  
Rüter Straße 82  
73734 Esslingen  
Telefon 0711 347-25 18  
Telefax 0711 347-54 25 18  
drhf@de.festo.com

# AirArm – pneumatische 4-Achs-Kinematik mit inhärenter Nachgiebigkeit

**FESTO**



AirArm wirft Dart

Info

#### 4-Achs-Kinematik

Für die aktive Unterstützung von Menschen in ihrem Arbeitsbereich werden Assistenzsysteme mit höchsten Anforderungen an Dynamik, Nachgiebigkeit und Greifertechnik benötigt. Anforderungen, wie sie heute nur unzureichend von der klassischen Handhabungstechnik und der Robotik gefahrungsfrei erfüllbar sind, denn diese Systeme sind eher auf Steifigkeit und Positioniergenauigkeit ausgelegt und können mit ihren strukturbedingten großen Massen zu erheblichen Gefährdungen von Menschen führen.

Mit dem Projekt „AirArm“ hat das Bionic Learning Network von Festo einen Weg beschritten, auf dem durch Inspiration aus der Natur und unter Verwendung von Industriekomponenten aus der Automatisierungstechnik die Vorteile der menschlichen Armbewegung in Dynamik und Nachgiebigkeit als freie technische Umsetzung in einem Technologieträger realisiert werden konnten.

Der bionische AirArm soll als Technologieträger Erkenntnisse ermöglichen, die der weiterführenden Entwicklung von Assistenzrobotern an der Schnittstelle Mensch-Maschine dienen – beispielsweise in der Werkstattfertigung oder in der Rehabilitation. Armkinematik und Aktoren sind unempfindlich gegenüber rauen Umgebungsbedingungen; das robuste System kann in Anwendungen beispielsweise Staub oder Wasser ausgesetzt werden.

Werden die Greiferbewegungen üblicherweise im Arbeitsraum in kartesischen Koordinaten beschrieben, so findet der AirArm über Gelenkkordinaten seine Position. Er soll in Richtung Handhabungstechnik und Robotik weiter entwickelt werden und neue Anwendungen erschließen.

Nachfolgend werden in anwendungsrelevanten Auszügen Methodik, Messungen und Simulationen der beteiligten Forschungsinstitute dargestellt:



Experimentelles Setup Dartwurf. Schulter-, Arm- und Handgelenk wurden mit Markern versehen.

#### Mensch und Maschine im Vergleich

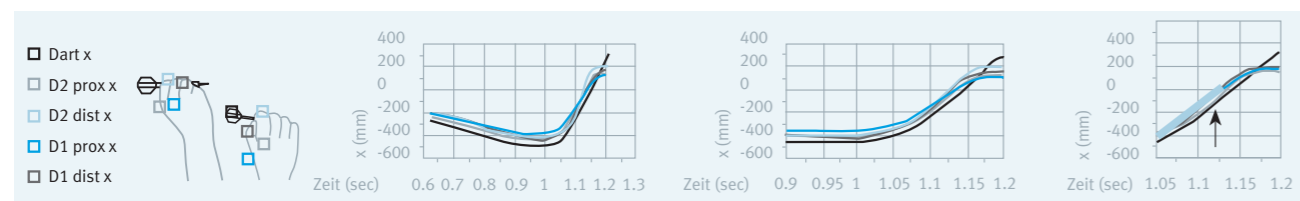
Als Beispiel einer dynamischen Bewegung wird ein Dartpfeil durch den AirArm geworfen. Mit Hilfe eines speziellen Endeffektors wird der Dartpfeil über einen Elektromagneten fixiert. Im Abwurfpunkt wird der Magnet abgeschaltet und der Pfeil löst sich. Die Wurfbewegung wird durch die gleichsinnige Bewegung des Schulter- und Ellenbogengelenks erzeugt. Die Analyse der Wurfbewegung in der Hochgeschwindigkeitsaufnahme zeigt, dass eine Übertragung des Drehimpulses über den Ober- auf den Unterarm und den Dartpfeil stattfindet.

Etwa im Abwurfpunkt kommt die Bewegung der Schulter fast zur Ruhe und nur der Ellenbogen dreht weiter. Im späteren Verlauf beschleunigt das Schultergelenk wieder, so dass dann die Drehbewegung im Ellenbogen fast zur Ruhe kommt. Dennoch verläuft die Bewegung des TCP (Tool Center Point) über die gesamte Bewegung hinweg stetig. Damit werden zwar nicht die Bewegungen des menschlichen Armes beim Dartwerfen 1:1 umgesetzt, aber die menschliche Strategie: Bionik statt Biomimikry, hier Anthropofunktionalität. In Analogie zum Zeigen im Halbkugelraum wurden die Bahnkurven anhand menschlicher Bewegungsabläufe mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen (1.000 Bilder pro Sekunde) und Echtzeit-Bewegungsaufnahmen mit dem System Qualisys® verifiziert.



Dartwurf Mensch: Trajektorien (Ortsraumkurve) des Darts und der Zeigefingerspitze im Vergleich

Der senkrechte Pfeil kennzeichnet den Zeitpunkt des Abwurfes  
Links: Der Abstand L der Zeigefingerspitze von der Schulter  
Mitte: Die Horizontalgeschwindigkeit vx des Darts  
Rechts: Die Horizontalbeschleunigung ax des Darts



Ein Beispiel für Glätte und Sanftheit der trotzdem schnellen Bewegung beim Dartwurf: D1 ist der Daumen, D2 der Zeigefinger, prox und dist sind Marker jeweils an Basis und Spitze des Fingers. Dargestellt sind die Ortskoordinaten in der Horizontalen. In den Diagrammen wird von links nach rechts in den Zeitpunkt des Abwurfes (Pfeil im rechten Diagramm) „hineingezoomt“. Die Finger leiten die Wurfbewegung, das Lösen des Darts spielt sich in weniger als 50 msec ab.

#### Dynamisch durch geringe Massen

Die nachfolgenden Diagramme erlauben eine Abschätzung der durch den AirArm erreichbaren absoluten Beschleunigungen und Geschwindigkeiten.

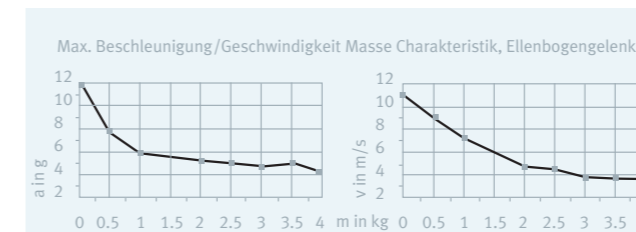
Gemessen wurde die Bewegung im Ellenbogen-Gelenk und am TPC, wenn mit maximalem Druck (8 bar) beschleunigt bzw. gebremst wird. Diese Messungen belegten eine Beschleunigung des TPC mit dem bis zu 12-fachen der Erdbeschleunigung g. Man erkennt eine Geschwindigkeit des TCP von 9 m/s ohne Last, die auf knapp 4 m/s mit einer Last von 4 kg absinkt.

#### Inhärente Nachgiebigkeit

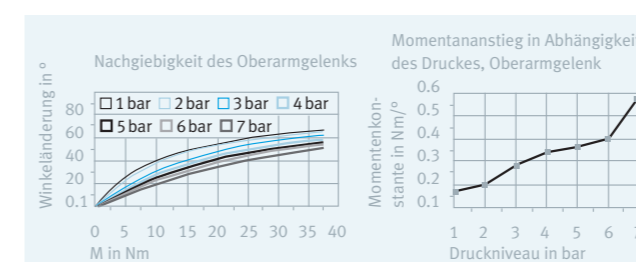
Als Nachgiebigkeit eines Gelenks des AirArm sei hier das Verhältnis von Winkel zu Moment bezeichnet. Zur Messung wird nur die Druckregelung, nicht aber die Positionsregelung des AirArm aktiviert. Es wird ein geeignetes Druckverhältnis an die Muskeln angelegt, so dass der AirArm die zu untersuchende Referenzposition einnimmt. Die Nachgiebigkeit ist durch die Steigung der Kennlinien charakterisiert. Dabei bedeutet eine größere Nachgiebigkeit eine größere Steigung. Eine geringere Nachgiebigkeit bedeutet umgekehrt eine größere Steifigkeit des Gelenks.

In den nachfolgenden Diagrammen ist exemplarisch für das Oberarmgelenk die Nachgiebigkeit für verschiedene Druckniveaus dargestellt. Insgesamt nimmt die Nachgiebigkeit zu höheren Momenten hin ab (nichtlineare Zunahme der Steifigkeit).

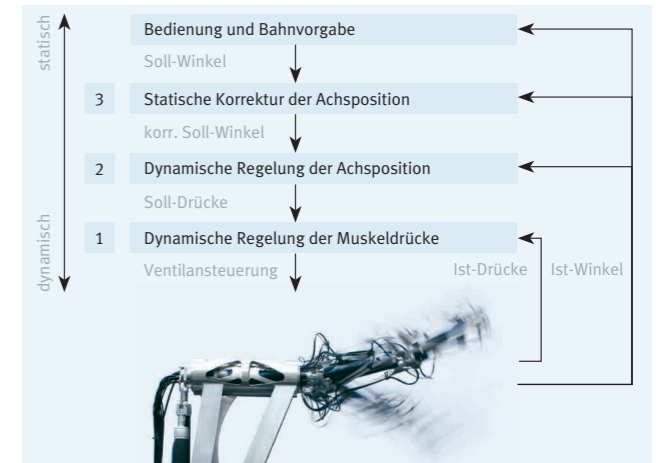
Für den zukünftigen Betrieb solcher Systeme kann die Steifigkeit über eine Regelung der Nachgiebigkeit variiert werden. Das wird insbesondere für die Interaktion mit Menschen von Vorteil sein.



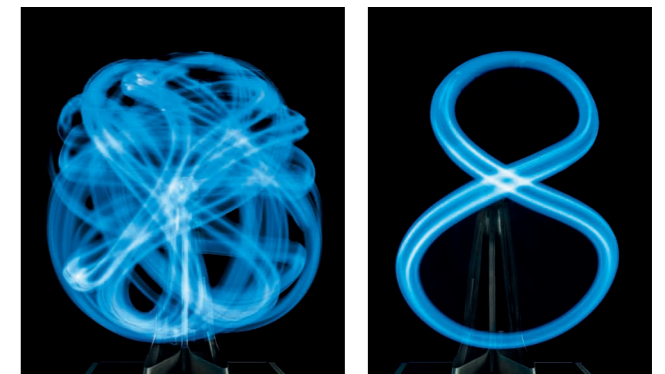
Maximal erreichte Beschleunigung bzw. Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Nutzlast



Nachgiebigkeit und Momentenkonstante in Abhängigkeit des Druckniveaus



Hierarchie der Regelungen des AirArm



AirArm in maximaler Geschwindigkeit und harmonischer Bewegung

#### Leistungsfähige Regelung

Das Simulationsmodell des AirArm kann zum Test von Algorithmen anstelle des realen Systems verwendet werden. Es ist als Simulink-Block realisiert. Zusätzlich findet eine animierte Anzeige des Roboters als Virtual-Reality-Modell statt.

Das Regelungskonzept für den AirArm gliedert sich entsprechend der Darstellung in mehrere Ebenen.

Die oberen Ebenen dienen der statischen, die unteren einer dynamischen Korrektur:

#### Ebene 1: Druckregelung

Zur Ansteuerung der pneumatischen Muskeln werden Proportionalventile verwendet, die keine integrierte Druckregelung besitzen. Daher muss eine dynamische Druckregelung den in den Muskeln gewünschten Druck einstellen und stabilisieren.

#### Ebene 2: Positionsregelung

Die dynamische Positionsregelung hat die Aufgabe, die vier Achswinkel gemäß der vorgegebenen „korrigierten Sollposition“ einzustellen.

#### Ebene 3: Statische Korrektur

Aufgrund äußerer Störungen (z.B. Temperaturschwankungen oder unbekannte Lastmomente) kommt es zu Abweichungen von Modell und Realität, die wiederum zu Positionsabweichungen führen. Es ist geplant, diese durch statische Korrekturen der Winkelpositionen zu korrigieren.