

Eine Beschreibung, drei Abnehmer: Starrkörpersimulation, Spannen über die Steuerung, Betriebsunterlagen

Fachpapier FP09 · SEHNENHAND v1.7 · Stand 6. Oktober 2026 · Thomas Schüller, Schicht-Werk

Offenlegung. Der Verfasser betreibt mit Schicht-Werk ein Gewerbe der additiven Fertigung und hat ein wirtschaftliches Interesse an den hier beschriebenen Bauteilen und Unterlagen. Das Papier beschreibt Entwürfe. Kein Teil ist gedruckt, kein Antrieb ist angeschlossen, keine der erzeugten Dateien ist in einem Simulationsprogramm gelaufen.

Kein Medizinprodukt. Gegenstand ist ein Roboter-Endeffektor für Lehre, Versuch und Forschung, nicht zur Anwendung am oder im menschlichen Körper.

1. Ergebnis

FP06 hat eine gemeinsame Beschreibung für Maschinen aus Gliederketten eingeführt, FP08 die Steuerung daran angeschlossen. Dieses Papier schließt drei Lücken, die danach offen waren.

Lücke	Lösung in v1.7	Stand
Der Bewegungsprüfstand rechnet keine Kräfte und keine Berührung	Jede Maschine wird zusätzlich als URDF-Datei ausgegeben und lässt sich damit in eine Starrkörpersimulation laden	Dateien liegen vor und sind gegengelesen; in keiner Simulation gelaufen
Eine Spannvorrichtung für die Sehnen fehlte	Gespannt wird über die Ruhelage des Servos: Trimmung je Antrieb in der Steuerung	im Trockenlauf geprüft, an keinem Gerät erprobt
Die Stelltablelle ließ sich nur kopieren	Der Bewegungsprüfstand speichert sie als Datei, die der Spieler unverändert liest	geprüft im Browser
Für Fertigung und Schulung gab es nur Anleitungen	Arbeitsanweisung, fünf Prüfpläne mit Vordrucken, Wartungsplan, Schulung in acht Modulen, Kursanschluss; alle aus einer Datendatei erzeugt	Entwurf, vor dem ersten gedruckten Teil geschrieben



Kettenbeschreibung gliederkette/1	URDF
Glied	Quader mit Länge des Elements und Dicke der Kette
Antrieb, der mehrere Elemente stellt (Sehne)	das erste Gelenk führt, die anderen folgen mit gleichem Winkel (<code>mimic</code>)
Drehsinn der Kette	Vorzeichen der Gelenkachse

Die Ausgabe rechnet selbst keine Lagen. Sie schreibt die Angaben der Beschreibung an die Stellen, die das Format dafür vorsieht. Sieben Maschinen ergeben sieben Dateien mit zusammen 117 Gliedern und 80 beweglichen Gelenken; 28 Gelenke folgen einem anderen.

2.3 Was die Dateien nicht enthalten

- **Sehnen.** URDF kennt keine Seilzüge. Die Kopplung über `mimic` setzt an allen Gelenken einer Sehne denselben Winkel an. Am wirklichen Finger bestimmen Rückstellung und Berührung, welches Gelenk zuerst beugt (FP07, Abschnitt 2). Reibung und Dehnung der Sehne fehlen ganz.
- **Wirkliche Massen.** Jedes Glied ist ein voller Quader mit der Dichte des Druckwerkstoffs. Die wirklichen Teile sind leichter und anders geformt.
- **Kraft- und Geschwindigkeitsgrenzen.** Das Format verlangt sie an jedem beweglichen Gelenk; eingetragen sind Platzhalter.
- **Endstücke.** Kuppen, Greifer und Schaufeln fehlen.

Wer mit den Dateien simuliert, erhält deshalb eine Aussage über eine vereinfachte Maschine. Für den Gang des Achters heißt das: Die Datei erlaubt den Versuch, sie ist kein Nachweis.

2.4 Prüfung

Ein Simulationsprogramm ließ sich in der Arbeitsumgebung nicht einrichten. Geprüft ist deshalb mit einem eigenen Leser, der mit der Ausgabe keinen Programmtext teilt: Er liest die URDF-Datei nach den Regeln des Formats, rechnet die Lage jedes Glieds und vergleicht das Ende jedes Glieds mit dem Kern des Bewegungsprüfstands. Je Maschine vier Stellungen (alle Antriebe an der unteren Grenze, an der oberen Grenze und zwei gemischte), zusammen 320 Vergleichspunkte, dazu die Grenzen aller Gelenke. Zulässig ist ein Tausendstel Millimeter.

Gegenprobe an der Datei des Baggerarms	Ergebnis
Achse eines Gelenks umgekehrt	acht Abweichungen gemeldet
Knick im Ursprung eines Gelenks um rund fünf Grad verstellt	acht Abweichungen gemeldet
obere Grenze zweier Gelenke verstellt	zwei Abweichungen gemeldet

Die Drehfolge im Ursprung eines Gelenks (erst um die Längsachse, dann um die Querachse, dann um die Hochachse, jeweils um feste Achsen) und die Einheiten Meter und Radiant sind aus der Kenntnis des Formats angesetzt und für dieses Papier nicht im Original nachgelesen. Stimmt die Annahme nicht, läge der Fehler in Ausgabe und Leser zugleich und fiel hier nicht auf; er zeigt sich beim ersten Laden in ein Simulationsprogramm.

3. Spannen über die Steuerung

FP08 nannte als Lücke, dass die Antriebseinheit keine Spannvorrichtung hat. Eine mechanische Lösung, etwa eine hohle Stellschraube am Schlauchturm, wie sie an Fahrradschaltzügen üblich ist, bleibt möglich und ist nicht konstruiert. Näher liegt, was die Antriebe ohnehin können: Die Ruhelage jedes Servos lässt sich verschieben.

Größe	Wert
Sehnenweg je Schritt	0,0146 mm (Wirkradius 9,5 mm, 4096 Schritte je Umdrehung)
Zulässige Trimmung	±150 Schritte, das sind ±2,2 mm
Reserve beim Lockern	200 Schritte
Reserve beim Spannen über den größten Weg der Beispielprogramme hinaus	645 Schritte

Die Trimmung steht je Antrieb in den Daten der Steuerung; positiv spannt, negativ lockert. Zum Einstellen nimmt der Spieler eine Angabe für einen Lauf entgegen, weist Werte über der Grenze ab und fährt die verschobene Ruhelage an. Der gefundene Wert wird in die Daten eingetragen; die Baukette erzeugt die Belegung neu.

Grenze. Die Trimmung gleicht Durchhang und das Setzen einer neuen Sehne aus. Sie ersetzt keine Sehne, die um mehrere Millimeter zu lang geknotet ist; dafür bleibt der Knoten an der Spule. Ob ±2,2 mm reichen, zeigt der Betrieb.

4. Betriebsunterlagen und Schulung

Eine Konstruktion, die nur ihr Verfasser fertigen kann, ist kein Betriebsmittel. Für die Zeit mit Mitarbeitern liegen deshalb interne Unterlagen vor, alle aus einer Datendatei erzeugt:

Unterlage	Inhalt
Arbeitsanweisung	sechs Grundsätze, sechs Rollen, Ablauf je Los in zwölf Schritten mit Nachweis, Vorgehen bei einem Befund, Sicherheit am Arbeitsplatz
Prüfpläne	fünf Pläne (Wareneingang, Erststück, Finger, Endprüfung, Inbetriebnahme) mit zusammen 38 Merkmalen; Sollwerte mit Maß kommen aus den Konstruktionsdaten der Fassung
Vordrucke	Laufzettel, fünf Prüfprotokolle, Wartungsnachweis, Schulungsnachweis als CSV-Dateien
Wartungsplan	neun Tätigkeiten mit Anlass oder Intervall
Schulung	acht Module zu Maschinenbau, Konstruktion, Druck, Montage, Anwendung und Wartung, je mit Ziel, Unterlagen, Praxis und Lernkontrolle; rund 14 Stunden
Kursanschluss	vier Kurse, die aus Lehrpaket und Schulung für den Kurskatalog entstehen können

Zwei Dinge halten die Unterlagen zusammen. Erstens ändert sich ein Sollwert im Prüfplan von selbst, wenn sich das Maß in der Konstruktion ändert. Zweitens stützen sich die Schulungsmodule zur Mechanik und zur Programmierung auf dasselbe Lehrpaket, das auch im Unterricht außerhalb des Betriebs verwendet wird (FP08); es gibt einen Lernstoff, nicht zwei.

Grenze. Die Unterlagen sind vor dem ersten gedruckten Teil geschrieben. Intervalle der Wartung, Dauern der Schulung und Toleranzen der Prüfpläne sind Startwerte. Zwei Merkmale der Prüfpläne haben noch keinen Sollwert, weil er erst aus der Messung entsteht: die Kraft an der Kuppe und die Abweichung zwischen Soll- und Istlage. Eine Arbeitsplatzevaluierung ersetzen die Sicherheitshinweise nicht.

5. Grenzen

- Keine URDF-Datei ist in einem Simulationsprogramm geladen worden.
- Die Trimmung ist an keinem Servo erprobt.
- Die Betriebsunterlagen sind unerprobt; kein Los ist danach gefertigt, niemand danach geschult.
- Was FP08 als offen nennt, bleibt offen: Reibung im Schlauch, Verlauf der Schläuche, Maße am Servo, Erprobung der Steuerung.

6. Nächste Schritte

1. Eine URDF-Datei in ein Simulationsprogramm laden; damit bestätigt sich die Annahme zur Drehfolge oder sie fällt.
2. Massen der Glieder aus den Prüfberichten der Konstruktion übernehmen, sobald die Hand gedruckt und gewogen ist.
3. Die Unterlagen am ersten gefertigten Finger durchgehen und berichtigen.
4. Unverändert zuerst: Prüffinger drucken und messen (FP05).

7. Literatur

- ROS-Industrial (2026): URDF, Einführung in den Schulungsunterlagen zu ROS 2 (Gelenkarten, Grenzen, mimic). https://ros-industrial.github.io/ros2_i_training/_source/urdf/introduction.html (abgerufen 06.10.2026).
- Todorov, E.; Erez, T.; Tassa, Y. (2012): MuJoCo: A physics engine for model-based control. IEEE/RSJ IROS 2012, 5026–5033. Aus dem Gedächtnis zitiert, am Original zu prüfen.
- Eigene Papiere dieses Pakets: FP05 (Prüffinger), FP06 (Baukasten und Bewegungsprüfstand), FP07 (Hand mit sechs Antrieben), FP08 (Antrieb und Steuerung).