

Hand mit Antrieb und Steuerung: Kuppen, Sehnen in Schläuchen, Antriebseinheit, Spieler

Fachpapier FP08 · SEHNENHAND v1.6 · 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. Das Papier beschreibt einen Entwurf. Kein Teil ist gedruckt, kein Servo ist angeschlossen, kein Wert ist gemessen; geprüft sind ein numerischer Zwilling der Konstruktion und der Trockenlauf der Steuerung.

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

Fortgeführt in FP09. Das Spannen der Sehnen über die Trimmung der Servos, die Ausgabe für Starrkörpersimulationen und die Betriebsunterlagen stehen in FP09 (v1.7). Den Verlauf der Schläuche, die Reibung je Sehne, die Kraft an der Kuppe und den Rückzug rechnet FP10 (v1.8) durch; die Plätze der Antriebseinheit sind dort neu zugeordnet.

1. Ergebnis

FP07 endete bei einer Hand aus Fingern, Handplatte und Daumen, ohne Antrieb und mit offener Sehnenführung am Daumen. Dieses Papier schließt die Kette bis zum Befehl an das Servo. Alle Module, die eine Hand zum Bewegen braucht, liegen nun als Entwurf vor.

Größe	Wert
Hand, Druckteile	33 Stück in zehn Sorten, voll gedruckt rund 301 g
Neu an der Hand	fünf Fingerkuppen, Flanschadapter, Schlauchsitze in Fuß und Kamm, Anker für den Rückzug
Antriebseinheit	abgesetzter Block 200 × 116 × 40 mm mit sechs Servoplätzen; 13 Druckteile, rund 256 g; mit Servos rund 586 g
Verbindung	sechs Schläuche aus PTFE, 4 × 2 mm, Sehne bis 1,0 mm
Steuerung	Programm auf dem Rechner, das die Stelltable des Bewegungsprüfstands in Buspakete umsetzt
Prüfung der Konstruktion	Passungen, Bohrungen, Lauf der Sehnen, zweite Lesung: ohne Befund
Prüfung der Steuerung	Selbsttest und Trockenlauf von vier Programmen, von einem zweiten Leser gegengelesen: ohne Befund
Erprobt am Gerät	nichts

Antriebseinheit mit sechs Servos

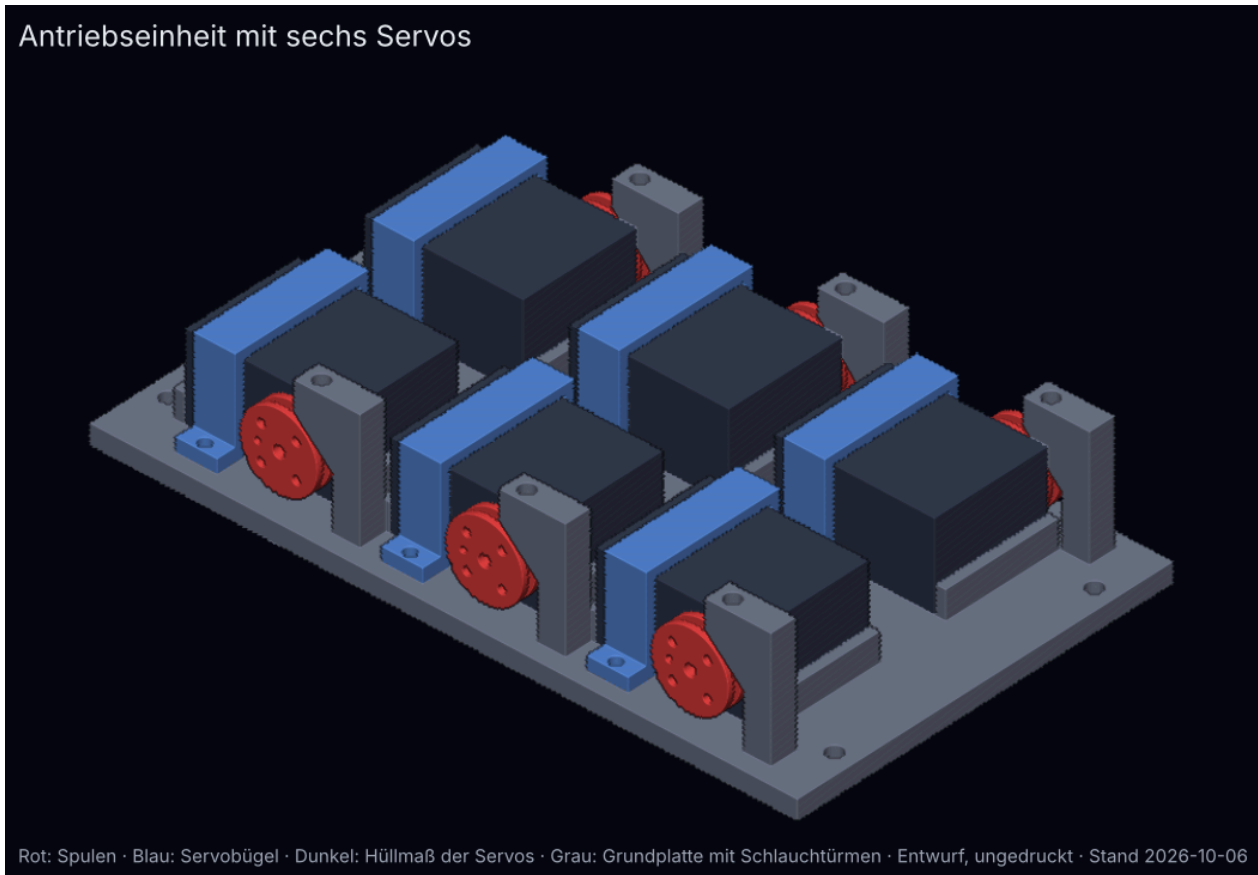


Bild 1: Die Antriebseinheit. Rot die Spulen, blau die Bügel, dunkel das Hüllmaß der Servos, grau die Grundplatte mit den Schlauchtürmen.

2. Warum die Sehnen in Schläuchen laufen

Beim Versuch, die Sehnen gerade vom Fuß der Finger zum Handgelenk zu führen, zeigten sich zwei Hindernisse:

- Der gerade Weg der Beugesehne des Zeigefingers hinter dem Sehnenkamm führt in Ruhelage durch den Daumensockel.
- Der Daumen schwenkt um eine Hochachse. Eine Sehne, die frei vom Daumen zum Handgelenk läuft, ändert mit der Gegenstellung ihre Länge; Beugung und Gegenstellung wären gekoppelt.

Beides löst ein Schlauch, in dem die Sehne läuft und der an beiden Enden in einem Sitz anschlägt. Die Länge des Schlauchs ändert sich nicht, wenn er sich mitbewegt; der Sehnenweg hängt dann nur noch von den Gelenken ab, nicht vom Weg dorthin. Das ist das Prinzip des Bowdenzugs. Es erlaubt zugleich, die Antriebe von der Hand abzusetzen.

Stelle	Ausführung
Fuß jedes Fingers und des Daumens	Austritt nach hinten Ø 2,4 mm, Schlauchsitz Ø 4,2 mm, 2,0 mm tief
Sehnenkamm, Beugesehnen	Durchgang Ø 4,4 mm; der Schlauch läuft durch den Kamm bis zum Fuß

Stelle	Ausführung
Sehnenkamm, Gegenstellung	Schlauchanschlag Ø 4,2 mm, 4,0 mm tief; dahinter läuft die Sehne frei zur Nabe
Schlauchurm der Antriebseinheit	Schlauchsitz Ø 4,2 mm, 5,0 mm tief, Sehnenbohrung Ø 2,4 mm

Der Preis ist Reibung. Für eine Sehne im gebogenen Schlauch gilt die Seilreibungsformel mit der Summe aller Biegewinkel. Mit dem Reibwert 0,08 für PTFE aus dem Datensatz des Rechners (dort als unbelegt geführt) bleiben bei 180 Grad Biegung in Summe 78 Prozent der Sehnenkraft, bei 360 Grad 60 Prozent. Der Rechner aus FP02 rechnet für die Ausbaustufe B mit vier Rollen und 88,5 Prozent. Die Kraft an der Kuppe wird also unter dem Rechenwert von 4,4 N liegen, um wie viel, entscheidet die Verlegung der Schläuche. Dieser Wert ist zu messen, bevor eine Kraft zugesagt wird.

3. Rückzug, Kuppe, Flansch

Rückzug. Jeder Finger hat wie am Prüffinger eine Sehne auf der Streckseite. Sie endet nicht an einem Antrieb, sondern an einer Gummischnur, die unter der Handplatte verankert ist: fünf Bohrungen Ø 2,8 mm für selbstschneidende Schrauben M3 am hinteren Rand, eine sechste für die Gegenstellung des Daumens. Die Schnur streckt den Finger, sobald das Servo nachgibt. Ihre Kraft geht von der Beugekraft ab. Kraft, Vorspannung und Lebensdauer sind nicht gerechnet.

Fingerkuppe (Modul M04, Schnittstelle S02). Eine Kappe aus TPU 95A über dem runden Ende des Endglieds, rundum und an beiden Seiten geschlossen, Wand 2,0 mm, Spiel 0,2 mm, 2,3 g. Sie wird von den beiden Ankerschrauben gehalten, die ohnehin im Endglied sitzen, und lässt sich nach Lösen dieser Schrauben tauschen. Die Kuppenaufnahme ist damit bemaßt. Andere Endstücke (Greifbacke, Schaufel, Fuß) können dieselbe Aufnahme nutzen; konstruiert ist keines.

Flanschadapter (Modul M07, Schnittstelle S06). Ein Winkel aus einer Zunge, die mit vier Schrauben M4 unter der Handplatte sitzt, und einer Scheibe Ø 63 × 8 mm mit vier Bohrungen Ø 6,6 mm auf einem Lochkreis von 50 mm und einer Zentrierung Ø 31,5 mm. Das Lochbild ist aus der Erinnerung an ISO 9409-1 angesetzt und nicht gegen die Norm geprüft. Ein Fenster in der Scheibe lässt die Schläuche durch.

Mit Kuppen berührt der Daumen den Zeigefinger früher: bei 57 statt 61 Grad Gegenstellung, weil die Kuppen an den Seiten 2,2 mm auftragen. Es bleibt eine seitliche Berührung (FP07, Abschnitt 5). Das Beispielprogramm „Daumen an den Zeigefinger“ stellt deshalb 56 Grad.

4. Antriebseinheit

Die Einheit (Modul M06) ist ein eigener Block, der neben oder hinter der Hand steht. Sechs Bus-Servos liegen in zwei Reihen auf einer Grundplatte, die Abtriebsachsen zeigen nach außen. Jedes Servo sitzt zwischen zwei Anschlägen und wird von einem Bügel gehalten. Auf dem Abtrieb sitzt eine Spule mit Rille; vor ihr steht ein Turm mit einem Ausleger über der Spule. Die Sehne verlässt die Spule senkrecht nach oben, läuft durch den Ausleger und tritt dort in den Schlauch.

Größe	Wert
Außenmaße	200 × 116 × 40 mm
Spule	Rillengrund 9 mm, Bord 11 mm, Breite 6 mm, Rille 2 mm
Wirkradius mit halber Sehne	9,5 mm; 59,7 mm Sehnenweg je Umdrehung
Größter Sehnenweg der Hand	48,0 mm, das sind 289 Grad an der Spule, eine Lage
Luft zwischen Turm und dem Servo davor	1,15 mm
Luft zwischen Ausleger und Spulenbord	2,65 mm

Der senkrechte Austritt ist eine Folge der dichten Anordnung: Bei waagrechtem Austritt liefe der Schlauch einer hinteren Spalte durch Spule und Bügel der Spalte davor.

Annahmen. Die Einheit ist nach dem Hüllmaß des Servos entworfen (45,2 × 24,7 × 35 mm; Waveshare 2026). Nicht belegt und vor dem Druck am Bauteil abzunehmen sind die Lage der Abtriebsachse, der Abstand der Spule zum Gehäuse samt Höhe des Servohorns und das Lochbild des Horns. Das Servo wird nur geklemmt; seine eigenen Befestigungslöcher bleiben ungenutzt. Eine Spannvorrichtung für die Sehne fehlt; die Länge wird am Knoten eingestellt.

5. Steuerung

Die Steuerung (Modul M10) ist ein Programm auf dem Rechner und ein zugekaufter Buswandler. Das Programm, im Paket „Spieler“ genannt, liest die Stelltablette, die der Bewegungsprüfstand aus einem Programm erzeugt (FP06), und bildet daraus Pakete für Bus-Servos der Reihe STS. Damit sprechen Simulation und Gerät dieselbe Sprache: Was im Prüfstand läuft, läuft als dieselbe Tabelle am Gerät.

Der Weg in vier Schritten:

1. Der Prüfstand rechnet je Bewegung den Stellwinkel der Spule ab der Ruhelage.
2. Die Belegung ordnet jedem Antrieb ein Servo zu: Kennung am Bus, Drehsinn, Ruhelage, Grenzen. Sie entsteht aus der Datenschicht.
3. Der Spieler prüft die ganze Tabelle gegen die Grenzen, bevor er etwas sendet, und rechnet Winkel in Schritte um (4096 je Umdrehung).
4. Je Startzeit geht ein Sammelbefehl mit Zielschritt und Geschwindigkeit an alle beteiligten Servos.

Programm	Zeilen	Pakete	Dauer	größter Weg an der Spule	höchste Geschwindigkeit
Daumen an den Zeigefinger	9	16	3,4 s	166 Grad	2366 Schritte/s
Faust	12	17	4,4 s	268 Grad	3050 Schritte/s
Zeigen	11	17	4,6 s	268 Grad	3050 Schritte/s
Zählen	8	18	6,4 s	268 Grad	3050 Schritte/s

Befund zur Geschwindigkeit. Die Beispielprogramme verlangen an der Spule bis zu 268 Grad je Sekunde. Das Servo dreht laut Händlerangabe im Leerlauf 270 Grad je Sekunde bei 12 V (Waveshare 2026); bei 7,4 V und unter Last ist es langsamer. Die Faust in 1,2 Sekunden ist am

Gerät nicht zu erwarten. Der Prüfstand zeigt, was verlangt ist, nicht, was der Antrieb kann. Die Zeiten sind nach der ersten Messung anzupassen.

Was der Spieler nicht tut. Er begrenzt keine Kraft, liest keine Gelenkwinkel zurück und gleicht den weichen Anlauf des Prüfstands nur über die Beschleunigung des Servos an. Er ist für die Hand mit sechs Antrieben eingerichtet und fährt keine Schubachsen.

6. Prüfung

Konstruktion. Wie in FP05 und FP07 wird der numerische Zwilling geprüft: dieselben Körper, aus denen die OpenSCAD-Dateien entstehen, punktweise ausgewertet. An der Hand kommen sechs neue oder geänderte Teile hinzu; ihre OpenSCAD-Dateien stimmen in der zweiten Lesung mit dem Zwilling überein. An der Antriebseinheit ist jedes der 19 Teile des Zusammenbaus gegen jedes andere geprüft (171 Paare), dazu 20 Bohrungen und je Servo der Lauf der Sehne von der Spule in den Schlauchsitz.

Die Prüfung hat in der Entwicklung einen Fehler gefunden: Die Stütze unter dem Ausleger des Schlauchturms verschloss die Sehnenbohrung. Der Befund kam aus der Prüfung des Sehnenlaufs, nicht aus der Ansicht.

Steuerung. Der Spieler prüft sich mit bekannten Paketen selbst. Unabhängig davon zerlegt ein zweiter Leser in der Baukette jedes Paket des Trockenlaufs, prüft Kopf, Länge und Prüfsumme und rechnet Zielschritt und Geschwindigkeit aus der Tabelle nach. Vier fehlerhafte Tabellen (unbekannter Antrieb, Grenze überschritten, falsche Einheit, falsche Kopfzeile) weist der Spieler ab.

Was das nicht ersetzt. OpenSCAD ist nicht gelaufen; der eigene Leser ersetzt es nicht. Die Busangaben stammen aus Unterlagen Dritter (commanderfun 2026; hipsterbrown 2026) und sind an keinem Gerät bestätigt. Ein Trockenlauf zeigt, dass die Pakete der Beschreibung entsprechen, nicht, dass ein Servo ihnen folgt.

7. Grenzen

- Kein Teil ist gedruckt, kein Servo angeschlossen, kein Paket gesendet.
- Verlauf und Biegeradius der Schläuche zwischen Hand und Antriebseinheit sind nicht konstruiert und nicht geprüft; von ihnen hängt die Reibung ab.
- Der Lauf der beiden Sehnen für die Gegenstellung um die Nabe des Daumensockels ist nicht geprüft.
- Die Kraft der Gummischnüre ist nicht gerechnet.
- Festigkeit von Bügel, Turm, Spule und Kuppe ist nicht berechnet.
- Drehsinn und Ruhelage der Servos sind Annahmen.
- Elektrische Sicherheit und elektromagnetische Verträglichkeit des Aufbaus sind nicht beurteilt.

8. Nächste Schritte

1. Prüffinger drucken und messen (FP05); das bleibt der erste Schritt und liegt beim Inhaber.

2. Ein Servo beschaffen, Achslage, Horn und Lochbild abnehmen, die Daten der Antriebseinheit berichtigen.
3. Einen Finger über einen Schlauch an einem Servo betreiben; Kraft an der Kuppe und Istlage gegen die Rechnung messen.
4. Danach die Hand: Reihenfolge und Handgriffe stehen in den Anleitungen im Paket.

9. Literatur

- Birglen, L.; Laliberté, T.; Gosselin, C. (2008): Underactuated Robotic Hands. Springer Tracts in Advanced Robotics 40. Aus dem Gedächtnis zitiert, am Original zu prüfen.
- commanderfun (2026): STS3215, Register Reference. https://github.com/commanderfun/STS3215/blob/main/REGISTER_REFERENCE.md (abgerufen 06.10.2026).
- hipsterbrown (2026): feetech-servo, Go-Paket. <https://pkg.go.dev/github.com/hipsterbrown/feetech-servo/feetech> (abgerufen 06.10.2026).
- ISO 9409-1: Manipulating industrial robots – Mechanical interfaces – Part 1: Plates. Nicht im Volltext geprüft.
- Waveshare (2026): ST3215 Servo, Wiki. https://www.waveshare.com/wiki/ST3215_Servo (abgerufen 06.10.2026).
- Eigene Papiere dieses Pakets: FP02 (Rechenmodell), FP05 (Prüffinger), FP06 (Baukasten und Bewegungsprüfstand), FP07 (Hand mit sechs Antrieben).