

Hand mit sechs Antrieben: Handfläche, Daumen und numerische Prüfung

Fachpapier FP07 · SEHNENHAND v1.5 · 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 Wert ist gemessen; geprüft ist ein numerischer Zwilling der Konstruktion.

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

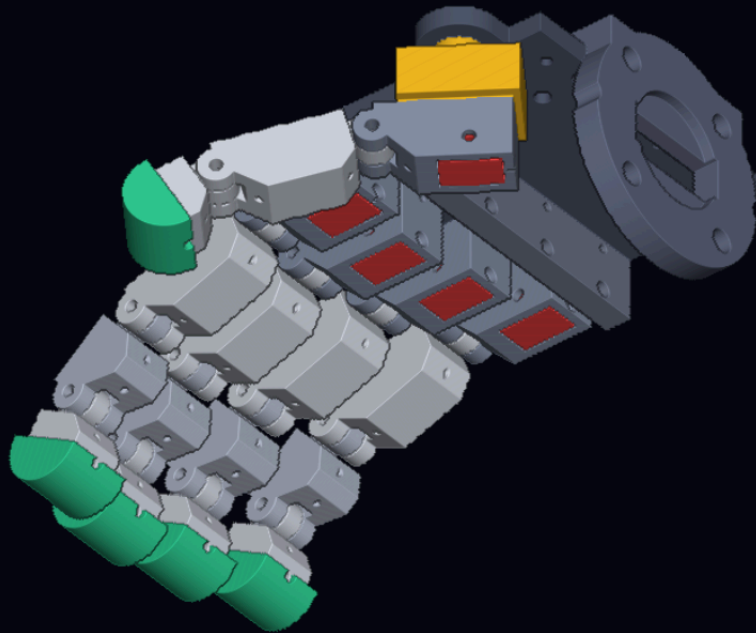
Fortgeführt in FP08. Dieses Papier gibt den Stand v1.5 wieder. Kuppen, Sehnenführung in Schläuchen, Antriebseinheit und Steuerung stehen in FP08; die dort genannten Stückzahlen und Massen gelten für die Hand ab v1.6.

1. Ergebnis

Aus dem Prüffinger (FP05) ist eine Hand geworden: vier gleiche Finger, ein Daumen, eine Handplatte, ein Sehnenkamm und ein schwenkbarer Daumensockel. Sie hat sechs Antriebe statt der zehn, die die Ausbaustufe B in FP02 vorsieht. Der Grund steht in Abschnitt 2 und ist der wichtigste Befund dieses Papiers.

Größe	Wert
Druckteile	27 Stück in acht Sorten, voll gedruckt rund 256 g
Neue Teile	Handplatte, Sehnenkamm, Daumensockel, gerader Führungseinsatz
Antriebe	vier Beugesehnen der Finger, Beugesehne des Daumens, Gegenstellung des Daumens
Sehnenweg je Finger	48,0 mm für 90 Grad an drei Gelenken
Drehwinkel an der Spule	306 Grad bei 9 mm Spulenradius; der Bus-Servo der Stufe B stellt 360 Grad
Prüfung	Passungen, Bohrungen, Sehnenwege, Schwenkbereich des Daumens, gebeugte Finger, zwei Griffe: ohne Befund

Hand mit sechs Antrieben von der Beugeseite



Rot: Führungseinsatz · Gelb: Daumensockel · Grün: Fingerkuppen · Dunkel: Handplatte, Sehnenkamm, Flanschadapter · Entwurf, ungedruckt · Stand 2026-10-06

Bild 1: Die Hand von der Beugeseite. Rot die Führungseinsätze, gelb der Daumensockel, dunkel Handplatte und Sehnenkamm.

2. Warum sechs Antriebe und nicht zehn

Die Ausbaustufe B gibt jedem Finger zwei Antriebe: einen für das Grundgelenk, einen für Mittel- und Endgelenk. Bei der Konstruktion zeigt sich, dass das mit reinen Beugesehnen nicht ohne Weiteres geht.

Die Sehne für Mittel- und Endgelenk muss am Grundgelenk vorbei. Läuft sie dort im selben Abstand zur Achse wie die Sehne des Grundgelenks, so beugt sie das Grundgelenk mit. Der Antrieb des Grundgelenks kann das nicht verhindern, denn eine Sehne zieht nur. Zwei Antriebe ergäben dann nicht zwei unabhängige Bewegungen.

Dafür gibt es bekannte Auswege, und keiner ist im Prüffinger vorgesehen:

- die zweite Sehne am Grundgelenk durch die Achse oder dicht an ihr vorbei führen, sodass ihr Hebelarm dort klein wird;
- jedem Gelenk eine Gegensehne geben, die es festhält;
- die Kopplung hinnehmen und in der Steuerung ausgleichen, was Gegensehnen oder Geber voraussetzt.

Die Hand in diesem Papier geht deshalb den einfachen Weg: eine Beugesehne je Finger über alle drei Gelenke, wie am Prüffinger. Das ist ein unteraktuierter Finger. Welches Gelenk zuerst beugt, bestimmen Rückstellung und Berührung mit dem Gegenstand; solche Finger legen sich von

selbst um das, was sie greifen (Birglen, Laliberté und Gosselin 2008). Viele offene Hände arbeiten so (Ma und Dollar 2017).

Die Folge für FP02: Die Ausbaustufe B mit zehn Antrieben bleibt als Ziel bestehen, setzt aber einen Finger mit zweiter Sehne und gelöster Kopplung voraus. Das ist ein eigener Schritt nach der ersten gebauten Hand.

3. Aufbau

Finger. Vier gleiche Finger aus den Teilen des Prüffingers: Fuß, Grundglied, Mittelglied, Endglied. Sie sitzen im Abstand von 22 mm nebeneinander; Mittelfinger 4 mm vor, kleiner Finger 8 mm zurück.

Fuß. Der Fuß hat gegenüber FP05 eine Bohrung mehr: Die Beugesehne kann ihn nach hinten verlassen. Für den Prüfstand ändert das nichts.

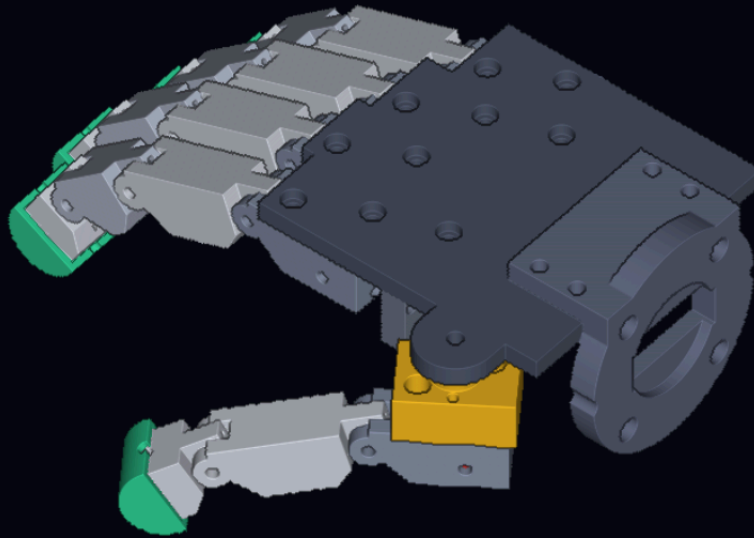
Gerader Führungseinsatz. In der Hand sitzt in jedem Fuß ein Einsatz mit geradem Kanal für einen PTFE-Schlauch. Er schließt unten bündig mit dem Fuß ab, damit der Daumen darunter durchschwenken kann. Die vier Einsätze aus FP05 bleiben die Messstücke für den Prüfstand.

Handplatte. Eine 6 mm dicke Platte auf dem Handrücken trägt die vier Füße über die Schnittstelle Fingerfuß, je zwei Schrauben M3. Ihre Vorderkante ist gestuft, weil die Finger versetzt sitzen. Hinten endet sie im Handgelenkflansch: vier Bohrungen für M4 im Rechteck 12 × 44 mm. Seitlich trägt ein Ohr die Schwenkachse des Daumens.

Sehnenkamm. Ein Steg unter der Platte, unmittelbar hinter den Füßen, mit zwei Bohrungen je Finger (Beugesehne und Rückzug) und zwei für die Gegenstellung des Daumens. Er legt fest, wo die Sehnen das Handgelenk erreichen.

Daumen. Der Daumen besteht aus denselben Teilen wie ein Finger, nur ohne Mittelglied: Fuß, Grundglied, Endglied. Er sitzt unter einem Daumensockel, der um eine senkrechte Achse (M4) schwenkt. In Ruhe zeigt der Daumen 60 Grad zur Seite; die Gegenstellung schwenkt ihn um bis zu 85 Grad unter die Handfläche. Dafür liegt der Daumen 20,5 mm tiefer als die Finger. Eine Sehne, die um eine Nabe mit 6,5 mm Radius läuft, schwenkt den Sockel; eine zweite zieht ihn zurück.

Hand mit sechs Antrieben vom Handrücken



Rot: Führungseinsatz · Gelb: Daumensockel · Grün: Fingerkuppen · Dunkel: Handplatte, Sehnenkamm, Flanschadapter · Entwurf, ungedruckt · Stand 2026-10-06

Bild 2: Die Hand vom Handrücken. Die gestufte Handplatte, hinten der Handgelenkflansch, seitlich das Ohr mit der Schwenkachse des Daumens.

Alle Maße stehen in der Datenschicht des Pakets und sind Entwurf. Aus ihnen entstehen die Konstruktionsdateien, der Prüfbericht, die Stückliste, die Bilder und die Beschreibung der Hand für den Bewegungsprüfstand.

4. Numerische Prüfung

Geprüft wird wie in FP05 ein numerischer Zwilling: dieselben Körper, aus denen die Konstruktionsdateien entstehen, in ihren Lagen an der Hand punktwise ausgewertet, hier im Raster von 0,5 mm.

Prüfung	Ergebnis
Passungen in Ruhelage: Platte, Kamm, vier Füße, Einsatz, Daumensockel, Nachbarfüße	keine Durchdringung
Grundglieder gegen die Handplatte bei 0, 45 und 88 Grad	keine Durchdringung
28 Bohrungen für Schrauben, Gewindeeinsätze, Flansch und Schwenkachse	durchgehend frei
Wege von Beugesehne und Rückzug aller vier Finger durch Kamm, Fuß und Einsatz	frei
Daumen über den Schwenkbereich (0, 20, 40, 60, 85 Grad), gestreckt und gebeugt, gegen alle Teile der Hand	keine Durchdringung
Vier Finger bei 0, 45 und 84 Grad gegen Platte, Kamm, Nachbarfüße und eigenen Fuß	keine Durchdringung

Prüfung	Ergebnis
Faust: Finger 84 Grad, Daumen davor (Gegenstellung 85, Beugung 60 Grad)	keine Durchdringung
Zeigen: drei Finger gebeugt, Daumen davor	keine Durchdringung
Zweite Lesung der vier neuen Konstruktionsdateien und des Zusammenbaus in zwei Stellungen	keine Abweichung

Ob die Prüfung anschlägt, ist geprobt: Sitzt der Daumen 3,5 mm höher oder die Schwenkachse 14 mm weiter vorn, meldet sie Durchdringungen von rund 250 und rund 175 Kubikmillimetern.

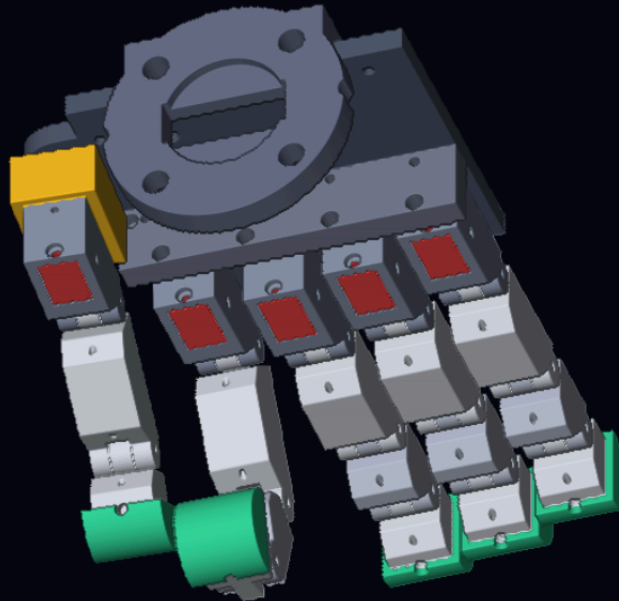
Ein Befund aus der Arbeit. Im ersten Entwurf lag der Daumen 2 mm höher. In der Stellung „Zeigen“ stieß sein Grundglied dabei an den Sehnenkamm: Die Zunge am Gelenk hebt sich beim Beugen um rund 1,6 mm über die Oberkante des Fußes. Die Prüfung hat das gefunden; der Daumen sitzt seither tiefer.

Lage gegen Bewegungsprüfstand. Die Hand ist als Maschine „Hand, sechs Antriebe“ im Bewegungsprüfstand hinterlegt (FP06). Die Baukette vergleicht bei jedem Lauf Lage und Längen mit der Konstruktion und rechnet die Enden von Zeigefinger und Daumen an zwei Stellen unabhängig, im Prüfstand und in der Konstruktionskette. Beide stimmen überein.

5. Was der Daumen kann und was nicht

Mit dem Zeigefinger bei 55 Grad und dem Daumen bei 30 Grad je Gelenk berührt der Daumen den Finger bei 61 Grad Gegenstellung. Die Berührung liegt an den Seitenflächen der beiden Endglieder: Der Daumen legt sich seitlich an den Finger.

Daumen legt sich seitlich an den Zeigefinger, kurz vor der Berührung



Rot: Führungseinsatz · Gelb: Daumensockel · Grün: Fingerkuppen · Dunkel: Handplatte, Sehnenkamm, Flanschadapter · Entwurf, ungedruckt · Stand 2026-10-06

Bild 3: Der Daumen kurz vor der Berührung mit dem Zeigefinger.

Für einen Griff Kuppe auf Kuppe fehlt dem Daumen die Drehung um seine Längsachse. Rein rechnerisch kämen die Gliederenden einander bei 75 Grad Gegenstellung auf 2,2 mm nahe; dort würden die Teile einander aber bereits durchdringen. Die Hand hält also zwischen Daumenseite und Fingerseite und umschließt mit den Fingern; den Feingriff mit den Kuppen beherrscht sie in dieser Form nicht.

Die Sehne der Gegenstellung wirkt an einem Hebelarm von 6,5 mm. Mit der Dauerkraft der Stufe B an der Spule (rund 53 N, FP02) ergibt das ohne Reibung ein Moment von rund 0,34 Nm um die Schwenkachse und am Ende des Daumens, 85 mm von der Achse, eine Seitenkraft von rund 4 N. Die Nabe ist klein, weil die Schrauben des Fußes den Platz begrenzen.

6. Antrieb

Antrieb	Gelenke	Sehnenweg	Drehwinkel der Spule (9 mm)
Finger, je Beugesehne	3	48,0 mm	306°
Daumen, Beugesehne	2	32,0 mm	204°
Daumen, Gegenstellung	1	9,6 mm	61°

Die Finger nutzen 306 von 360 Grad Stellbereich; mit der Reserve von 10 Prozent aus FP02 ist das knapp ausreichend. Eine größere Spule gäbe Luft und kostete Kraft im selben Verhältnis.

Mit den Vorgaben der Stufe B und sechs Antrieben nennt der Rechner 240 bis 471 EUR Material und ein Netzteil für rund 10 A bei 7,4 V. Die Kraft an der Fingerspitze rechnet das Modell aus FP02 weiterhin für das Grundgelenk allein (4,4 N dauerhaft); für eine Sehne über drei Gelenke ist das eine Obergrenze für den gestreckten Finger, keine Aussage über den Griff.

7. Grenzen

- **Kein Druck, keine Messung.** Alle Passmaße sind Entwurf. Der Prüffinger ist noch nicht gedruckt; die Hand erbt jeden Fehler, der sich dort zeigt.
- **Konstruktionsdateien nicht im Zielprogramm gelaufen.** Wie in FP05 sind die Dateien mit einem eigenen Leser gegengelesen. Das ersetzt den Lauf im Konstruktionsprogramm nicht.
- **Sehnen des Daumens nicht geführt.** Der Weg der Beugesehne vom Fuß des Daumens zum Handgelenk und der Lauf der beiden Sehnen um die Nabe sind nicht konstruiert. Schwenkt der Daumen, ändert sich die Länge des Weges seiner Beugesehne, wenn sie nicht nahe an der Schwenkachse läuft.
- **Nicht jede Zwischenlage geprüft.** Geprüft sind einzelne Stellungen, nicht der ganze Weg dazwischen.
- **Keine Festigkeit.** Die Wand zwischen Sehnenkanal und Halteschraube im geraden Einsatz ist 0,65 mm stark, der Rand der Ankerbohrungen im Daumensockel 1,1 mm. Ob die Handplatte mit 6 mm die Last trägt, ist offen.
- **Gleiche Finger.** Alle vier Finger sind gleich lang. Das vereinfacht den Bau und entspricht nicht der menschlichen Hand.
- **Keine Kuppen, kein Antrieb, keine Steuerung in diesem Papier.** Fingerkuppen, Antriebseinheit und Steuerung liegen seit v1.6 als Entwurf vor und stehen in FP08.

8. Nächste Schritte

1. Prüffinger drucken und messen (FP05); danach die Maße von Fuß, Einsatz und Platte berichtigen.
2. Sehnenführung des Daumens zum Handgelenk.
3. Fingerkuppe und Kuppenaufnahme.
4. Antriebseinheit mit sechs Servoplätzen am Handgelenkflansch.
5. Steuerung, die die Stelltablette des Bewegungsprüfstands abspielt.
6. Später: Finger mit zweiter Sehne und gelöster Kopplung für die Hand mit zehn Antrieben.

9. Literatur

- Birglen, L.; Laliberté, T.; Gosselin, C. (2008): Underactuated Robotic Hands. Springer Tracts in Advanced Robotics 40. Springer, Berlin.
- Christoph, C. C.; Eberlein, M.; Katsimalis, F. et al. (2025): ORCA: An Open-Source, Reliable, Cost-Effective, Anthropomorphic Robotic Hand for Uninterrupted Dexterous Task Learning. arXiv:2504.04259.
- Ma, R.; Dollar, A. (2017): Yale OpenHand Project: Optimizing Open-Source Hand Designs for Ease of Fabrication and Adoption. IEEE Robotics & Automation Magazine 24 (1), 32–40.

- Toshimitsu, Y.; Forrai, B.; Cangan, B. G. et al. (2023): Getting the Ball Rolling: Learning a Dexterous Policy for a Biomimetic Tendon-Driven Hand with Rolling Contact Joints. IEEE-RAS Humanoids 2023. arXiv:2308.02453.

Die Angaben zu Birglen et al. und zu Ma und Dollar sind aus dem Gedächtnis zitiert und vor einer Veröffentlichung am Original zu prüfen.