

Auslegung der Hand mit sechs Antrieben: Schlauchverlauf, Reibung, Kraft an der Kuppe, Rückzug

Fachpapier FP10 · SEHNENHAND v1.9 · 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 enthält Rechenwerte für einen Entwurf unter genannten Annahmen. Kein Teil ist gedruckt, kein Wert ist gemessen.

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

1. Ergebnis

FP08 hat die Sehnen in Schläuche gelegt und offen gelassen, was das an Kraft kostet. Dort stand nur ein Beispiel: bei 180 Grad Biegung bleiben 78 Prozent, bei 360 Grad 60 Prozent. Dieses Papier rechnet den Verlauf für eine Bezugsaufstellung durch und kommt zu einem günstigeren Bild.

Größe	Wert
Bezugsaufstellung	Antriebseinheit 300 mm hinter dem Flanschadapter, 10 mm zur Seite des kleinen Fingers versetzt, Schläuche mit einem Viertelbogen von oben in die Türme
Summe der Biegewinkel je Sehne	92 bis 151 Grad
Anteil der Sehnenkraft, der ankommt	81 bis 88 Prozent (Reibwert 0,08, unbelegt)
Dauerkraft an der Kuppe der Finger	3,9 bis 4,1 N; Rechenwert der Stufe B mit vier Rollen: 4,4 N
Dauerkraft an der Kuppe des Daumens	5,5 N
Gegenstellung, quer am Daumenende	3,6 N
Rückzug der Finger	Vorspannung mindestens 4,1 N, Federrate höchstens 0,15 N/mm; kostet an der Kuppe bis 0,4 N
Folge für die Belegung	drei Plätze der Antriebseinheit neu zugeordnet, damit kein Schlauch die Hand kreuzt
Folge für den Flanschadapter (v1.9)	zwei Kerben am Rand der Scheibe; die Schläuche von Zeigefinger und kleinem Finger laufen gerade

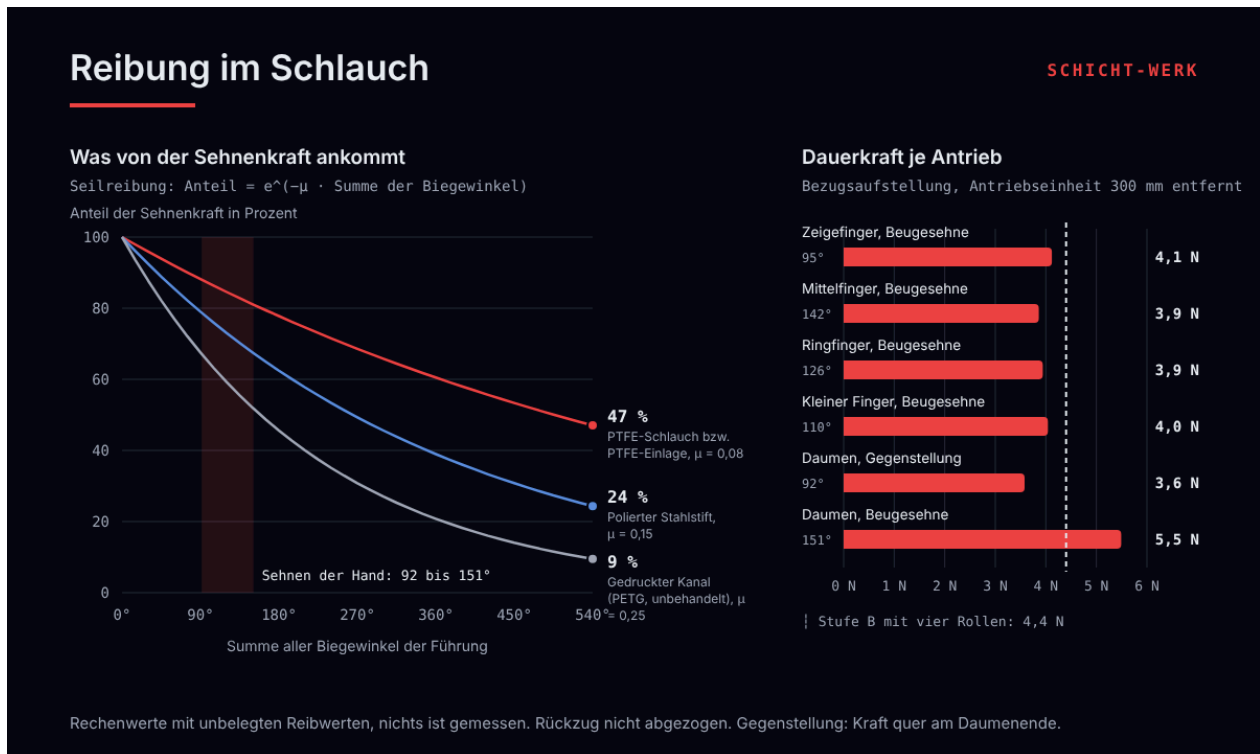


Bild 1: Links der Anteil der Sehnenkraft über der Summe der Biegewinkel für drei Führungen aus dem Datensatz; der Bereich der Hand ist hinterlegt. Rechts die Dauerkraft je Antrieb.

Nach Abzug des Rückzugs bleiben an der Kuppe eines Fingers rechnerisch rund 3,5 bis 3,7 N. Das ist ein Rechenwert mit einem unbelegten Reibwert; die Messung am Prüffinger mit Schlauch entscheidet.

2. Verlauf der Schläuche

2.1 An der Hand

Die Schläuche der vier Beugesehnen laufen durch den Sehnenkamm nach hinten und treffen auf den Flanschadapter. Dessen Scheibe hat 63 mm Durchmesser und ein Fenster von 32 mm Breite.

Sehne	Lage quer zur Hand	Weg am Flansch	Bogen
Mittelfinger, Ringfinger	11 mm aus der Mitte	gerade durch das Fenster	keiner
Zeigefinger, kleiner Finger	33 mm aus der Mitte	gerade durch je eine Kerbe am Rand der Scheibe (Radius 3,0 mm)	keiner
Gegenstellung	37 mm, 11,7 mm über der Scheibenmitte	gerade, an der Scheibe vorbei	keiner
Beugesehne des Daumens	vom Fuß des Daumens, unter der Scheibe	frei	bis 60 Grad, je nach Gegenstellung

Der Schlauch der Daumensehne sitzt im Fuß des Daumens und schwenkt mit. In Ruhelage steht der Daumen 60 Grad zur Längsachse der Hand; der Schlauch muss um diesen Winkel in die Längsrichtung einschwenken. Mit voller Gegenstellung sind es 25 Grad. Gerechnet ist mit dem

größeren Wert. Diese Sehne hat deshalb die größte Biegung der Hand.

Folge für die Konstruktion, in v1.9 umgesetzt. In v1.8 streiften die Schläuche von Zeigefinger und kleinem Finger die Scheibe des Flanschadapters um einen halben Millimeter und mussten mit zwei Gegenbögen von je 4,1 Grad ausweichen. Die Scheibe hat jetzt an beiden Stellen eine halbrunde Kerbe mit 3,0 mm Radius; beide Schläuche laufen gerade. Die Kerben liegen zwischen den Schraubenlöchern und berühren sie nicht; das prüft die Baukette der Hand. Das Lochbild des Flansches selbst ist weiterhin gegen die Norm zu prüfen.

2.2 Zur Antriebseinheit

Die Antriebseinheit hat zwei Reihen von Türmen, 98 mm auseinander. Die Schläuche verlassen die Hand auf einer Breite von 72 mm. Jeder Schlauch muss deshalb seitlich versetzen; gerechnet ist das als zwei gleiche Gegenbögen über den Abstand zwischen Hand und Einheit. Dazu kommt der Viertelbogen, mit dem der Schlauch von oben in den Turm läuft.

Antrieb	Reihe	seitlicher Versatz	Gegenbögen	Summe mit Hand und Turm
Zeigefinger	Daumenseite	6,0 mm	4,6°	94,6°
Mittelfinger	Kleinfingerseite	70,0 mm	52,5°	142,5°
Ringfinger	Kleinfingerseite	48,0 mm	36,4°	126,4°
Kleiner Finger	Kleinfingerseite	26,0 mm	19,8°	109,8°
Daumen, Gegenstellung	Daumenseite	2,0 mm	1,5°	91,5°
Daumen, Beugung	Daumenseite	1,1 mm	0,9°	150,9°

Der kleinste Biegeradius in dieser Aufstellung beträgt 339 mm und liegt weit über den 25 mm, die für den Schlauch angesetzt sind.

Belegung geändert. In v1.6 waren die Plätze der Antriebseinheit der Reihe nach vergeben: Zeigefinger, Mittelfinger, Ringfinger, kleiner Finger, Daumen, Gegenstellung, abwechselnd in beiden Reihen. Damit lag die Gegenstellung des Daumens in der Reihe der Kleinfingerseite, 86 mm quer zur Hand. Jetzt liegen Zeigefinger, Gegenstellung und Beugung des Daumens in der Reihe der Daumenseite, Mittelfinger, Ringfinger und kleiner Finger in der anderen. Kein Schlauch kreuzt mehr die Hand.

Seitenversatz der Einheit. Die Summe aller seitlichen Versätze bleibt gleich, wenn man die Einheit quer verschiebt; es verteilt sich nur um. Der Versatz von 10 mm zur Kleinfingerseite hält die größte Biegung, die der Daumensehne, am kleinsten und belastet dafür den Mittelfinger. Wer alle Finger gleich stark will, schiebt die Einheit zur Daumenseite und nimmt am Daumen mehr Biegung hin.

Abstand. Zwischen 200 und 500 mm ändert der Abstand wenig: Der Anteil der Sehnenkraft liegt bei 79 bis 88 Prozent bei 200 mm und bei 81 bis 88 Prozent bei 500 mm. Bestimmend sind der Viertelbogen in den Turm und das Schwenken des Daumens, nicht der Weg dazwischen.

3. Reibung und Kraft

Für die gezogene Sehne im gebogenen Schlauch gilt die Seilreibungsformel nach Euler und Eytelwein: Es kommt der Anteil $e^{(-\mu \cdot \theta)}$ an, mit der Summe θ aller Biegewinkel im Bogenmaß. Dass diese Formel das Verhalten von Sehne und Hülle im Grundsatz trifft, ist in der Robotik gut beschrieben, ebenso ihre Grenzen: Haftreibung, Totgang und Hysterese beim Richtungswechsel bildet sie nicht ab (Kaneko, Wada, Maekawa und Tanie 1991; Palli und Melchiorri 2006).

Die Sehnenkraft an der Spule beträgt im Dauerbetrieb 50,0 N (Blockmoment 1,9 Nm, Dauerfaktor 0,25, Wirkradius 9,5 mm; FP02). Daraus:

Antrieb	Biegung	es kommt an	Hebelarm	Hebel	Dauerkraft	kurzzeitig im Blockfall
Zeigefinger	94,6°	88 %	8,0 mm	85 mm	4,1 N	16,5 N
Mittelfinger	142,5°	82 %	8,0 mm	85 mm	3,9 N	15,4 N
Ringfinger	126,4°	84 %	8,0 mm	85 mm	3,9 N	15,8 N
Kleiner Finger	109,8°	86 %	8,0 mm	85 mm	4,0 N	16,1 N
Daumen, Gegenstellung	91,5°	88 %	6,5 mm	80 mm	3,6 N	14,3 N
Daumen, Beugung	150,9°	81 %	8,0 mm	59 mm	5,5 N	22,0 N

Der Daumen ist trotz der größten Biegung am stärksten, weil er kürzer ist. Die Kraft der Gegenstellung wirkt quer am Ende des Daumens; sie bestimmt, wie fest der Daumen seitlich an den Zeigefinger drückt (FP07, Abschnitt 5).

Einordnung. Die Stufe B des Rechners nimmt vier Rollen mit Lager an und kommt auf 4,4 N. Die konstruierte Hand hat keine Rollen, sondern einen geraden Einsatz und den Schlauch, und kommt rechnerisch auf 3,9 bis 4,1 N. Der Unterschied ist kleiner, als FP08 befürchten ließ. Er hängt am Reibwert: Mit 0,15 statt 0,08 blieben bei 150 Grad nur 67 statt 81 Prozent.

4. Rückzug über Gummischnur

Die Schnur hat zwei Grenzen. Sie muss den Finger strecken, auch wenn sein Gewicht ihn beugt, und sie soll von der Kraft an der Kuppe nicht mehr als ein Zehntel nehmen.

	Finger	Daumen
Moment aus dem Gewicht, Finger waagrecht, Handfläche nach oben	12,3 Nmm	6,7 Nmm
Hebelarm der Rückzugsehne	4,5 mm	4,5 mm
Vorspannung mindestens (Sicherheit 1,5)	4,1 N	2,2 N
Weg der Rückzugsehne bei voller Beugung	21,2 mm	14,1 mm
Kraft höchstens	7,3 N	7,2 N
Federrate höchstens	0,15 N/mm	0,35 N/mm
Verlust an der Kuppe bei dieser Kraft	0,39 N	0,55 N

Für die Finger ist das Fenster eng: zwischen 4,1 und 7,3 N über 21 mm Weg. Eine kurze, steife Schnur verfehlt es. Die freie Länge der Schnur unter der Handplatte beträgt rund 35 mm; bei 21 mm Weg wären das 60 Prozent Dehnung. Eine Schnur, die so weit gedehnt nur um 3 N zulegt, ist weich und dünn. Zwei Auswege liegen nahe und sind nicht konstruiert: die Schnur über eine Umlenkung länger führen oder sie durch eine Zugfeder mit bekannter Federrate ersetzen.

Reibung in den Gelenken ist nicht eingerechnet. Sie verlangt mehr Vorspannung, als das Gewicht allein ergibt, und engt das Fenster weiter ein.

5. Prüfung

Die Auslegung rechnet die Baukette bei jedem Lauf neu. Zwei unabhängige Nachrechnungen stehen daneben: Die Kraft je Sehne rechnet der Kern des Sehnenhand-Rechners mit eigenem Programmtext nach; zulässig ist ein Hundertstel Newton. Den Biegewinkel des Mittelfingers rechnet die Paketprüfung von Hand aus den Maßen. Geprüft wird außerdem, dass die Reihen der Auslegung zur Belegung der Steuerung passen und dass der Rückzug einen zulässigen Bereich hat.

Das prüft die Rechnung, nicht die Annahmen.

6. Grenzen

- Der Reibwert 0,08 für PTFE ist unbelegt. Er entscheidet über das Ergebnis.
- Biegewinkel sind einfach addiert. Im Raum lassen sich Bögen zusammenlegen; die Summe ist eher zu hoch.
- Die Formel gilt für die gezogene Sehne. Haftreibung beim Anfahren, Totgang und Hysterese beim Richtungswechsel fehlen; sie betreffen vor allem die Stellgenauigkeit.
- Reibung an den Schlauchenden, im geraden Einsatz und an den Gelenkaustritten ist nicht enthalten.
- Der kleinste Biegeradius des Schlauchs ist ein Erfahrungswert.
- Die Rückzugsehne ist als Kreisbahn genähert; die Massen der Glieder gelten für voll gedruckte Teile.
- Die Bezugsaufstellung ist eine von vielen. An einem Roboterarm liegt die Antriebseinheit anders.

7. Nächste Schritte

1. Am Prüffinger eine Messreihe mit Schlauch ergänzen: Kraft an der Kuppe bei 0, 90 und 180 Grad Schlauchbogen. Das belegt den Reibwert oder verwirft ihn.
2. Muster von Gummischnur und Zugfeder messen: Kraft über Dehnung.
3. Lochbild des Flanschadapters gegen die Norm prüfen. Die Kerben für die Schläuche von Zeigefinger und kleinem Finger sind seit v1.9 vorhanden.

8. Literatur

- Kaneko, M.; Wada, M.; Maekawa, H.; Tanie, K. (1991): A new consideration on tendon-tension control system of robot hands. IEEE International Conference on Robotics and Automation 1991. Aus dem Gedächtnis zitiert, am Original zu prüfen.
- Palli, G.; Melchiorri, C. (2006): Model and control of tendon-sheath transmission systems. IEEE International Conference on Robotics and Automation 2006. Titel und Verfasser per Suche bestätigt; Seitenangaben am Original zu prüfen.
- Seilreibung nach Euler und Eytelwein: Lehrbuchwissen der Technischen Mechanik, hier ohne Einzelnachweis.
- Eigene Papiere dieses Pakets: FP02 (Rechenmodell), FP05 (Prüffinger und Messplan), FP07 (Hand mit sechs Antrieben), FP08 (Antrieb und Steuerung).