

Vorauslegung einer gedruckten Sehnenhand: Rechenmodell, Annahmen und Grenzen

Fachpapier FP02 · SEHNENHAND v1.5 · Stand 6. Oktober 2026 · Thomas Schüller, Schicht-Werk

Geändert in v1.3. Der Sehnenweg ist neu gefasst (Abschnitt 2), der Stellbereich des Antriebs kommt als Prüfgröße hinzu, und Stufe A ist berichtigt: Mit dem bisherigen Spulenradius von 8 mm hätte der Mikro-Servo den Finger nicht ganz beugen können. Die Änderungen sind in Abschnitt 4 ausgewiesen.

Offenlegung. Der Verfasser betreibt mit Schicht-Werk ein Gewerbe der additiven Fertigung und hat ein wirtschaftliches Interesse an den hier untersuchten Bauteilen und Bausätzen. Das Papier beschreibt das Rechenmodell des Sehnenhand-Rechners. Es ist nicht durch Messungen bestätigt: Kein Bauteil ist gedruckt, kein Wert ist am Prüfstück gemessen.

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

1. Zweck

Der Sehnenhand-Rechner beantwortet vor dem ersten Druck vier Fragen: Welche Kraft kommt an der Fingerspitze an? Hält die Sehne? Wie stark verfälscht ihre Dehnung die Stellung? Was kostet das Material? Dazu kommt eine Rechtsampel für den Vertrieb. Das Modell ist bewusst einfach gehalten. Es ersetzt weder das Datenblatt noch den Versuch, zeigt aber früh, ob eine Auslegung in der richtigen Größenordnung liegt.

2. Modell

Betrachtet wird ein Finger, der von einem Servo im Unterarm über eine Sehne gebeugt wird. Die Sehne läuft von der Spule über Umlenkungen zum Grundgelenk.

Größe	Zeichen	Einheit
Blockmoment des Antriebs	M_B	Nm
Dauerfaktor (Anteil des Blockmoments, der dauerhaft nutzbar ist)	k_D	–
Spulenradius	r_S	m
Wirkradius der Sehne am Gelenk	r_G	m
Abstand vom Gelenk zur Fingerspitze	l	m
Reibwert der Gleitführung	μ	–
Umschlingungswinkel gesamt	θ	rad
Wirkungsgrad je Rolle, Anzahl Rollen	η_R, n	–

Größe	Zeichen	Einheit
Sehnenlänge, Durchmesser, Füllgrad, Elastizitätsmodul	L, d, φ , E	m, mm, –, Pa
Bruchlast der Sehne, Knotenfaktor	F _{Br} , k _K	N, –

Sehnenkraft an der Spule. Dauerhaft steht das Moment $M_D = k_D \cdot M_B$ zur Verfügung:

$$F_S = k_D \cdot M_B / r_S$$

Verlust in der Führung. Für Gleitführungen gilt die Seilreibungsgleichung nach Euler und Eytelwein, für Rollen ein Wirkungsgrad je Umlenkung:

$$\begin{aligned} \eta &= e^{(-\mu \cdot \theta)} && \text{(Gleitführung)} \\ \eta &= \eta_R^n && \text{(Rollen mit Lager)} \end{aligned}$$

Gelenkmoment und Kraft an der Fingerspitze. Bei gestrecktem Finger und Kraft quer zum Finger:

$$\begin{aligned} M_G &= F_S \cdot \eta \cdot r_G \\ F &= M_G / l \end{aligned}$$

Die kurzzeitige Spitzenkraft folgt mit M_B statt M_D .

Sicherheit der Sehne. Maßgeblich ist der Blockfall, weil ein Servo beim Anfahren eines Hindernisses das volle Blockmoment aufbringt. Knoten und Klemmen schwächen die Sehne; das Modell rechnet mit einem Knotenfaktor:

$$S = F_{Br} \cdot k_K / (M_B / r_S)$$

Dehnung und Winkelfehler. Die Sehne wird als linear-elastischer Stab mit tragendem Querschnitt $A = \varphi \cdot \pi \cdot d^2 / 4$ angesetzt:

$$\begin{aligned} \Delta L &= F_S \cdot L / (E \cdot A) \\ \Delta \varphi &= \Delta L / r_G \end{aligned}$$

Sehnenweg. Wie viel Sehne ein Gelenk für die Beugung um den Winkel θ braucht, hängt vom Lauf der Sehne am Gelenk ab. Das Modell kennt zwei Fälle.

Kreisbahn. Die Sehne liegt auf einer Rolle oder einem Auge mit Radius r_G um die Gelenkachse. Der Hebelarm ist konstant:

$$\begin{aligned} s(\theta) &= r_G \cdot \theta \\ h(\theta) &= r_G \end{aligned}$$

Freie Sehne. Die Sehne tritt vor und hinter dem Gelenk aus einem Kanal aus und überbrückt den Spalt gerade. Liegen beide Austritte im Abstand a von der Achse und im Abstand r_G unter ihr, so gilt:

$$s(\theta) = 2a \cdot (1 - \cos(\theta/2)) + 2 r_G \cdot \sin(\theta/2)$$

$$h(\theta) = r_G \cdot \cos(\theta/2) + a \cdot \sin(\theta/2)$$

Der Hebelarm h ist die Ableitung des Sehnenwegs nach dem Winkel. Am gestreckten Gelenk ist er in beiden Fällen r_G ; bei freier Sehne wächst er mit der Beugung. Die Formel gilt, solange $a \geq r_G \cdot \tan(\theta/2)$ ist; darunter treffen die Kanalenden aufeinander. Sie stimmt mit dem Sehnenweg überein, den die Konstruktion des Prüffingers liefert (FP05; die Baukette vergleicht beide bei jedem Lauf).

Stellbereich. Führt eine Sehne über n Gelenke, die alle bis $\theta_{\max}$ beugen, so braucht die Spule den Drehwinkel

$$\phi_S = n \cdot s(\theta_{\max}) / r_S$$

Er muss mit einer Reserve c_S (Vorgabe 1,1 für Vorspannung und Einstellung) in den Stellbereich Φ des Antriebs passen. Daraus folgt ein kleinster Spulenradius:

$$r_{S,\min} = n \cdot s(\theta_{\max}) \cdot c_S / \Phi$$

Ein größerer Spulenradius senkt die Sehnenkraft im selben Verhältnis. Der Stellbereich begrenzt damit die erreichbare Kraft, sobald ein Antrieb mehrere Gelenke beugt.

Netzteil. Mit Gleichzeitigkeit g und Reserve c : $I = N \cdot I_B \cdot g \cdot c$.

3. Vorgabewerte

Alle Werte stehen in der Datenschicht (02_INTERN/daten/bauteile.json) und sind dort als nicht belegt gekennzeichnet, solange sie nicht am Datenblatt oder am Prüfstück bestätigt sind.

Vorgabe	Wert	Begründung
Dauerfaktor k_D	0,25	Kleinservos vertragen dauerhaft nur einen Bruchteil des Blockmoments, sonst überhitzen sie; Erfahrungswert, je Antrieb zu prüfen
Knotenfaktor k_K	0,5	Knoten schwächen geflochtene Sehnen deutlich; die Hälfte der Bruchlast ist ein vorsichtiger Erfahrungswert, Klemmen sind günstiger
Mindestsicherheit S	2,0	gegen den Blockfall, mit Knoten
Wirkungsgrad je Rolle	0,97	kugelgelagerte Kleinrolle, Schätzung
Reibwert PTFE / Stahlstift / gedruckter Kanal	0,08 / 0,15 / 0,25	Größenordnung aus Tabellenwerten für die Paarungen; an gedruckten Kanälen stark von Schichtlage und Verschleiß abhängig
Elastizitätsmodul der geflochtenen Sehne	40 GPa	deutlich unter dem Faserwert, weil das Geflecht sich setzt; Schätzung
Winkelfehler, Warnschwelle	5 Grad	darüber ist die Stellung ohne Gelenkgeber nicht mehr brauchbar

4. Ergebnisse für die vier Ausbaustufen

Gerechnet mit den Vorgaben der jeweiligen Stufe; die Zahlen erzeugt derselbe Rechenkern, der im Werkzeug läuft.

Stufe	Antrieb, Sehne, Führung	Kraft Fingerspitze Dauer / kurzzeitig	Übertragung	Sicherheit	Winkelfehler	Material
A	Mikro-Servo, 0,5 mm, PTFE	0,25 N / 1,0 N	85 %	11,3	1,2°	68 bis 125 EUR
B	Bus-Servo 7,4 V, 1,0 mm, Rollen	4,4 N / 17,6 N	89 %	2,1	5,2°	330 bis 648 EUR
C	Bus-Servo Laborklasse, 0,8 mm, Rollen	2,0 N / 7,8 N	86 %	2,9	4,2°	1.695 bis 2.404 EUR
D	Datenhandschuh, zwölf Winkelgeber	–	–	–	–	64 bis 202 EUR

Stufe	Gelenke je Sehne, Sehnenlauf	Sehnenweg	Spulenradius	Drehwinkel der Spule	Stellbereich des Antriebs
A	3, freie Sehne	42,0 mm	15 mm	160°	180°
B	2, freie Sehne	32,0 mm	9 mm	204°	360°
C	1, Kreisbahn	12,6 mm	9 mm	80°	360°

Die Stellbereiche stammen aus Datenblättern und einer Händlerangabe (Abschnitt 7) und sind wie alle Bauteilwerte als nicht belegt geführt.

Berichtigung zu Stufe A. Bis v1.2 stand Stufe A mit 8 mm Spulenradius und 0,5 N Dauerkraft in dieser Tabelle. Dabei war nicht geprüft, ob der Antrieb den Sehnenweg aufbringt. Ein Antrieb für drei Gelenke braucht 42 mm Sehnenweg; an einer 8-mm-Spule wären das 301 Grad, der Mikro-Servo stellt rund 180 Grad. Mit dem nötigen Spulenradius von 15 mm halbiert sich die Kraft auf rund 0,25 N. Stufe A bleibt damit ein Anschauungsmodell, das Bewegung zeigt und kaum Kraft aufbringt.

Zum Vergleich: Der Hersteller der mimic hand M1 nennt 25 N Dauerkraft an der Fingerspitze. Stufe B erreicht rechnerisch rund 18 % davon.

Fünf Befunde aus der Rechnung.

- Die Sehne ist bei Stufe B das knappe Bauteil.** Mit 0,5 mm Durchmesser fällt die Sicherheit auf 0,7 und der Winkelfehler steigt auf rund 21 Grad. Erst 1,0 mm bringt die Sicherheit über 2.
- Gedruckte Kanäle kosten die halbe Kraft.** Läuft die Sehne der Stufe B über 180 Grad Umschlingung durch einen unbehandelten Druckkanal, kommen nur 46 % der Kraft an; die Dauerkraft fällt von 4,4 auf 2,3 N. Das stützt die Entscheidung von mimic, auf Rollen zu setzen.
- Mehr Servomoment allein hilft nicht.** Ein Standard-Servo der Klasse MG996R stellt laut Datenblatt nur rund 120 Grad und braucht in Stufe A deshalb eine Spule mit 22 mm Radius. Die Dauerkraft steigt damit auf rund 0,9 N statt auf das Fünffache, das sein Moment

erwarten ließe; die Sicherheit der dünnen Sehne fällt auf 3,2 und der Winkelfehler steigt auf 4,3 Grad.

4. **Ohne Gelenkgeber bleibt die Stellung unsicher.** Schon bei sauberer Auslegung liegt der Winkelfehler durch Dehnung bei 2 bis 5 Grad. Das deckt sich mit der Beobachtung an der Faive Hand, deren erste Fassung die Gelenkwinkel nur aus Sehnenlängen schätzt (Toshimitsu et al. 2023; arXiv:2411.06183).
5. **Der Stellbereich begrenzt die Kraft, sobald ein Antrieb mehrere Gelenke beugt.** Bus-Servos mit 360 Grad Stellbereich haben hier Spielraum: Stufe B nutzt 204 von 360 Grad, und selbst mit drei Gelenken an einer Sehne wären es 306 Grad. Hobby-Servos mit 120 bis 180 Grad zwingen zu großen Spulen. Wer bei solchen Antrieben Kraft braucht, führt die Sehne am Gelenk auf einer Kreisbahn (33 statt 42 mm Sehnenweg bei drei Gelenken) oder gibt jedem Gelenk einen eigenen Antrieb.

Hinweis aus der Konstruktion (v1.5). Die Stufe B setzt je Finger zwei unabhängige Antriebe an. Mit reinen Beugeschnen beugt die Sehne für Mittel- und Endgelenk das Grundgelenk mit, wenn sie dort nicht nahe der Achse läuft. Die erste konstruierte Hand hat deshalb sechs Antriebe, je Finger eine Sehne über drei Gelenke (FP07). Die Zahlen der Stufe B bleiben als Auslegung je Antrieb gültig; der Drehwinkel der Spule steigt für drei Gelenke auf 306 Grad.

Abweichung zur Aufarbeitung. Der Recherchebericht vom 5. Oktober 2026 nennt für Stufe A „2 bis 5 N“ und für Stufe C „über 10 N“. Diese Spannen waren Schätzungen ohne Rechnung. Das Modell liefert mit den hier gewählten Antrieben und einem Dauerfaktor von 0,25 niedrigere Dauerwerte; die geschätzten Spannen werden erst kurzzeitig oder mit stärkeren Antrieben erreicht. Maßgeblich sind die Werte dieser Tabelle, und auch sie gelten nur bis zur ersten Messung.

5. Grenzen des Modells

- **Kraft nur am gestreckten Finger.** Die Kraft an der Fingerspitze rechnet das Modell für das Grundgelenk bei gestrecktem Finger. Der Sehnenweg berücksichtigt seit v1.3 alle Gelenke einer Sehne, aber nur mit gleichem Radius, gleichem Austrittsabstand und gleichem Endwinkel. Wie sich die Beugung auf gekoppelte Gelenke verteilt, und Rollkontaktgelenke mit wanderndem Drehpol (Collins 2003), bildet es nicht ab.
- **Reibung ist nicht konstant.** Die Seilreibungsgleichung beschreibt den Grenzfall des Gleitens. Haftreibung, Hysterese und Vorspannung der Gegensehne fehlen; für Regelungszwecke braucht es ein dynamisches Modell (Palli, Borghesan und Melchiorri 2012).
- **Dehnung ist nicht linear.** Geflochtene Sehnen setzen sich in den ersten Lastwechseln und kriechen unter Dauerlast. Vorrecken und Nachspannen sind einzuplanen.
- **Bauteilfestigkeit fehlt.** Das Modell prüft die Sehne, nicht die gedruckten Fingerglieder, Achsen und Sehnenanker. Schichthaftung und Kriechen des Kunststoffs sind am Prüfstück zu klären.
- **Erwärmung fehlt.** Der Dauerfaktor ersetzt eine thermische Rechnung nur grob.
- **Preise sind Spannen.** Die Stückliste rechnet mit Richtpreisen ohne Versand, Zoll und Ausschuss.

6. Was als Nächstes zu messen ist

1. Reibwert der Sehne im gedruckten Kanal, in PTFE und über Rollen, je mit neuer und eingelaufener Sehne.
2. Kraft-Dehnungs-Kurve der gewählten Sehne über 100 Lastwechsel, mit Knoten und mit Klemme.
3. Dauermoment des gewählten Servos bei Raumtemperatur bis zur Abschaltung.
4. Kraft an der Fingerspitze eines Prüffingers, Vergleich mit der Rechnung.
5. Verschleißbild nach 10.000 Beugezyklen (ORCA nennt diese Größenordnung als Dauerlauf ohne Hardwareausfall; Christoph et al. 2025).

Für die Punkte 1, 2 und 5 kommt die Zusammenarbeit mit einem Hochschullabor in Frage.

7. Literatur

- 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.
- Collins, C. L. (2003): Kinematics of Robot Fingers with Circular Rolling Contact Joints. Journal of Robotic Systems 20 (6), 285–296. DOI 10.1002/rob.10087.
- Egli, J.; Forrai, B.; Buchner, T. et al. (2024): Sensorized Soft Skin for Dexterous Robotic Hands. ICRA 2024. arXiv:2404.19448.
- mimic robotics (2026): Solving Dexterity: A Full-Stack Approach. Blog, 16.07.2026. <https://www.mimicrobotics.com/blog/solving-dexterity-a-full-stack-approach> (Herstellerangabe).
- Palli, G.; Borghesan, G.; Melchiorri, C. (2012): Modeling, Identification, and Control of Tendon-Based Actuation Systems. IEEE Transactions on Robotics 28 (2), 277–290. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6075269/>
- Shaw, K.; Agarwal, A.; Pathak, D. (2023): LEAP Hand: Low-Cost, Efficient, and Anthropomorphic Hand for Robot Learning. Robotics: Science and Systems 2023. arXiv:2309.06440.
- 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.
- ROBOTIS: e-Manual DYNAMIXEL XL330-M288-T (Position Control Mode 0 bis 4.095 für eine Umdrehung; Extended Position Control Mode ± 256 Umdrehungen; Blockmoment 0,52 Nm bei 5,0 V und 1,47 A). <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/x/xl330-m288/> (abgerufen 05.10.2026).
- DFRobot: ST3215 Serial Bus Servo, Produktseite (0 bis 360 Grad absolut, 4.096 Schritte, Mehrgang ± 7 Umdrehungen; Händlerangabe). <https://www.dfrobot.com/product-2961.html> (abgerufen 05.10.2026).
- Tower Pro: Datenblatt MG90S (rund 180 Grad, 90 je Richtung). https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG90S_Tower-Pro.pdf (abgerufen 05.10.2026).

- Tower Pro: Datenblatt MG996R (rund 120 Grad, 60 je Richtung).
https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG996R_Tower-Pro.pdf (abgerufen 05.10.2026).
- Seilreibungsgleichung nach Euler und Eytelwein: Lehrbuchwissen der Technischen Mechanik, hier ohne Einzelnachweis verwendet.

Band-, Heft- und Seitenangaben der Zeitschriftenaufsätze sind vor einer Veröffentlichung am Original zu prüfen; bestätigt sind Titel, Verfasser, Zeitschrift und Jahr.