

Sehnengetriebene Hand: Lehrpaket

Fassung 2.5 · Stand 6. Oktober 2026 · fünf Unterrichtseinheiten zu Mechanik, Bewegung und Messung

Das Lehrpaket führt in fünf Einheiten von der Kraft am Seilzug bis zum Bewegungsprogramm einer Hand mit sechs Antrieben. Gearbeitet wird mit zwei Werkzeugen, die im Browser laufen und nichts installieren: dem Sehnenhand-Rechner (`index.html`) und dem Bewegungsprüfstand (`pruefstand.html`). Ein gedrucktes Modell ist nicht nötig; zwei Einheiten enthalten einen Versuch mit Schnur, Stift und Küchenwaage.

Für wen. Oberstufe mit technischem Schwerpunkt, höhere technische Lehranstalten, erstes Studienjahr in Maschinenbau und Mechatronik, Werkstätten und Kurse zum Selbstbau. Vorausgesetzt werden Hebelgesetz, Winkelfunktionen und der Umgang mit einer Tabellenkalkulation.

Stand der Sache. Die Hand, auf die sich das Paket bezieht, ist ein Entwurf. Sie ist konstruiert und rechnerisch geprüft, aber nicht gedruckt und nicht vermessen. Alle Zahlen sind Rechenwerte. Wo das Modell an seine Grenzen kommt, steht in Einheit 5; das ist Teil des Lernstoffs.

Kein Medizinprodukt. Die Hand ist ein Roboter-Endeffektor für Lehre, Versuch und Forschung. Sie ist nicht für die Anwendung am oder im menschlichen Körper bestimmt und keine Prothese.

Offenlegung. Das Lehrpaket stammt aus einem Betrieb, der mit additiver Fertigung Geld verdient. Wo Fertigungsverfahren verglichen werden, ist das zu berücksichtigen.

Einheit	Thema	Dauer	Werkzeug
1	Vom Drehmoment zur Kraft an der Fingerkuppe	50 Minuten	Rechner
2	Reibung an der Umlenkung	50 bis 100 Minuten	Schnur, Stift, Küchenwaage, Rechner
3	Sehnenweg und Stellwinkel	50 Minuten	Rechner, Taschenrechner
4	Bewegung programmieren	100 Minuten	Bewegungsprüfstand
5	Vom Modell zur Maschine	50 bis 100 Minuten	beide Werkzeuge

Einheit 1: Vom Drehmoment zur Kraft an der Fingerkuppe

Lernziele. Die Lernenden erklären, wie aus dem Drehmoment eines Servos eine Zugkraft in der Sehne und daraus eine Kraft an der Fingerkuppe wird. Sie unterscheiden Blockmoment und Dauerbetrieb.

Stoff. Eine Spule mit Radius r_S wandelt das Moment M des Antriebs in die Sehnenkraft $F_S = M / r_S$. Im Dauerbetrieb darf ein Servo nur einen Teil seines Blockmoments abgeben; der Rechner setzt dafür den Faktor $k_D = 0,25$ an. Am Gelenk wirkt die Sehne mit dem Hebelarm r_G , die Last greift mit dem Hebel h an. Verluste an Umlenkungen fasst der Wirkungsgrad η zusammen:

$$F = k_D \cdot (M / r_S) \cdot \eta \cdot r_G / h$$

Ablauf. Rechner öffnen, Ausbaustufe B wählen. Die Eingaben ansehen: Blockmoment 1,9 Nm, Spulenradius 9 mm, Gelenkradius 8 mm, Hebel bis zur Kuppe 85 mm.

Aufgaben.

1. Berechnen Sie die Sehnenkraft im Dauerbetrieb von Hand und vergleichen Sie mit dem Rechner.
2. Berechnen Sie die Dauerkraft an der Fingerkuppe mit dem Wirkungsgrad, den der Rechner anzeigt.
3. Halbieren Sie im Rechner den Spulenradius. Was geschieht mit der Kraft, was mit dem Stellwinkel? Begründen Sie.
4. Der Hersteller nennt das Blockmoment. Warum ist es als Auslegungswert für eine Hand, die einen Gegenstand hält, ungeeignet?

Lösungen.

1. $F_S = 0,25 \cdot 1,9 \text{ Nm} / 0,009 \text{ m} = 52,8 \text{ N}$.
2. $F = 52,8 \text{ N} \cdot 0,885 \cdot 8 \text{ mm} / 85 \text{ mm} = 4,4 \text{ N}$. Mit dem vollen Blockmoment wären es 17,6 N, aber nur für kurze Zeit.
3. Die Kraft verdoppelt sich, der Stellwinkel für denselben Sehnenumweg ebenfalls. Kraft und Weg tauschen sich über den Radius aus; die Arbeit bleibt gleich.
4. Im Block steht der Motor, nimmt den höchsten Strom auf und erwärmt sich. Halten ist Dauerbetrieb; dafür zählt das Moment, das der Antrieb ohne Überhitzung abgibt.

Erweiterung. Dieselbe Rechnung für Ausbaustufe A: Die Dauerkraft liegt bei 0,25 N. Diskussion: Wofür reicht das, wofür nicht?

Einheit 2: Reibung an der Umlenkung

Lernziele. Die Lernenden messen den Kraftverlust einer Schnur an einer festen Umlenkung, beschreiben ihn mit der Seilreibungsformel und begründen, warum Rollen mit Lager besser abschneiden als Gleitführungen.

Stoff. Läuft eine Schnur mit dem Umschlingungswinkel θ über einen festen Zylinder, gilt für das Verhältnis der Kräfte auf beiden Seiten die Seilreibungsformel nach Euler und Eytelwein: $F_{\text{aus}} / F_{\text{ein}} = e^{(-\mu\theta)}$, θ im Bogenmaß. Für $\mu = 0,2$ und eine Umlenkung um 90° ergibt das 0,73. Mehrere Umlenkungen multiplizieren sich.

Versuch. Material: Schnur, runder Stift oder Metallstab, Gewicht von rund 200 g, Küchenwaage mit Haken oder Federwaage. Das Gewicht hängt an der Schnur, die Schnur läuft über den waagrecht eingespannten Stift, am anderen Ende zieht die Waage. Abgelesen wird die Kraft, bei der das Gewicht gerade zu steigen beginnt, und die Kraft, bei der es gerade zu sinken beginnt. Der Versuch wird mit 90° , 180° und einer vollen Umschlingung zusätzlich wiederholt.

Aufgaben.

1. Bestimmen Sie aus Heben und Senken bei 180° die Reibungszahl μ . Hinweis: Beim Heben gilt $F_{\text{Zug}} = G \cdot e^{(\mu\theta)}$, beim Senken $F_{\text{Zug}} = G \cdot e^{(-\mu\theta)}$.
2. Sagen Sie mit Ihrem μ die Kräfte bei 90° und bei 540° voraus und prüfen Sie am Versuch.
3. Im Rechner hat Stufe B vier Umlenkungen über Rollen mit Lager und den Wirkungsgrad 0,885. Welchen Wirkungsgrad hat eine einzelne Rolle? Welcher Wirkungsgrad ergäbe sich mit vier festen Stiften und Ihrem μ bei je 90°?

Lösungen.

1. Aus dem Verhältnis der beiden Ablesungen: $F_{\text{heben}} / F_{\text{senken}} = e^{(2\mu\theta)}$, also $\mu = \ln(F_{\text{heben}} / F_{\text{senken}}) / (2\theta)$ mit $\theta = \pi$. Übliche Ergebnisse für Baumwollschnur auf Holz oder Stahl liegen zwischen 0,15 und 0,35.
2. Eigene Werte; die Abweichung zwischen Vorhersage und Messung gehört ins Protokoll.
3. Einzelne Rolle: vierte Wurzel aus 0,885, das sind 0,97. Vier Stifte mit $\mu = 0,2$ und je 90°: 0,73 hoch vier, das sind 0,28. Von der Kraft bliebe weniger als ein Drittel.

Erweiterung. Dieselbe Schnur durch ein Stück PTFE-Schlauch führen und den Schlauch im Bogen legen. Wie ändert sich die Kraft mit dem Bogenwinkel? Die Hand im Entwurf führt ihre Sehnen in solchen Schläuchen zur Antriebseinheit; der Verlust darin ist gerechnet, aber noch nicht gemessen. Die Grafik „Reibung im Schlauch“ zeigt die Rechnung für drei Führungen.

Einheit 3: Sehnenweg und Stellwinkel

Lernziele. Die Lernenden berechnen, wie viel Sehne ein Gelenk beim Beugen aufnimmt, und prüfen, ob der Stellbereich eines Antriebs dafür reicht.

Stoff. Läuft die Sehne auf einer Kreisbahn mit Radius r um die Gelenkachse, ist der Weg $s = r \cdot \theta$. Läuft sie frei von einem Austritt zum nächsten, beide im Abstand a von der Achse und im Abstand r unter ihr, verkürzt sich die Strecke beim Beugen um

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

Die Spule mit Radius r_S muss sich dafür um $\varphi = s / r_S$ drehen (im Bogenmaß).

Aufgaben.

1. Berechnen Sie für $r = a = 8 \text{ mm}$ und $\theta = 90^\circ$ den Weg auf der Kreisbahn und den Weg der freien Sehne.
2. Eine Sehne beugt drei Gelenke um je 90°. Wie groß ist der Sehnenweg bei freier Führung, und um welchen Winkel dreht eine Spule mit 9 mm Radius?
3. Ein Servo hat 180° Stellbereich. Welchen Spulenradius braucht er mindestens für den Weg aus Aufgabe 2? Was bedeutet das für die Kraft (Einheit 1)?
4. Prüfen Sie Aufgabe 2 im Bewegungsprüfstand: Maschine „Hand mit sechs Antrieben“, Antrieb Zeigefinger von Hand auf 90° stellen und Sehnenweg und Stellwinkel ablesen.

Lösungen.

1. Kreisbahn: $8 \text{ mm} \cdot \pi/2 = 12,6 \text{ mm}$. Freie Sehne: $2 \cdot 8 \text{ mm} \cdot (1 - \cos 45^\circ) + 2 \cdot 8 \text{ mm} \cdot \sin 45^\circ = 16,0 \text{ mm}$.

2. $3 \cdot 16,0 \text{ mm} = 48,0 \text{ mm}$; $\varphi = 48,0 \text{ mm} / 9 \text{ mm} = 5,33$ im Bogenmaß, das sind 306° .
3. $r_S = s / \varphi = 48,0 \text{ mm} / \pi = 15,3 \text{ mm}$. Der größere Radius senkt die Sehnenkraft im selben Verhältnis.
4. Der Prüfstand zeigt $48,0 \text{ mm}$ und 306° ; der Stellbereich von 360° reicht.

Einheit 4: Bewegung programmieren

Lernziele. Die Lernenden schreiben Bewegungsabläufe in einer einfachen Befehlssprache, lesen Fehlermeldungen, unterscheiden nacheinander und gleichzeitig ablaufende Bewegungen und lesen aus der Stelltable ab, was die Antriebe tun müssen.

Stoff. Der Bewegungsprüfstand beschreibt eine Maschine als Ketten aus Gelenken und Gliedern. Ein Programm stellt Antriebe:

Befehl	Wirkung
beuge ZIEL WERT in SEKUNDEN	stellt einen Antrieb oder eine Gruppe auf den Wert
strecke ZIEL in SEKUNDEN	zurück in die Ruhelage
warte SEKUNDEN	Pause
zugleich ... ende	alle Befehle im Block beginnen zur selben Zeit
wiederhole ANZAHL ... ende	wiederholt den Block
# Text	Kommentar

Der Prüfstand rechnet Lagen. Kräfte, Gewicht und Zusammenstöße der Teile rechnet er nicht.

Ablauf. Maschine „Hand mit sechs Antrieben“ wählen, das Programm „Zählen“ laden und ablaufen lassen. Danach in Zweiergruppen die Aufgaben bearbeiten.

Aufgaben.

1. Ändern Sie „Zählen“ so, dass die Finger in umgekehrter Reihenfolge strecken, beginnend beim kleinen Finger.
2. Schreiben Sie ein Programm, das dreimal hintereinander die Faust schließt und öffnet. Nutzen Sie `wiederhole`.
3. Schreiben Sie in ein Programm die Zeile `beuge zeige 120`. Was meldet der Prüfstand, und warum ist die Grenze sinnvoll?
4. Laden Sie das Programm „Faust“ und lesen Sie in der Stelltable ab: Welcher Antrieb dreht am weitesten? Wie viele Grad je Sekunde muss er dafür leisten?
5. Verkürzen Sie die Zeit für das Schließen der Finger auf 0,5 Sekunden. Welche Drehgeschwindigkeit verlangt das? Der hier angenommene Bus-Servo dreht laut Händlerangabe im Leerlauf 270° je Sekunde bei 12 V, unter Last und bei kleinerer Spannung weniger. Was folgt daraus?

Lösungen.

1. Die vier Zeilen mit `strecke` in der Reihenfolge klein, ring, mittel, zeige.
2. Zum Beispiel:

```
wiederhole 3
  beuge finger 84 in 1.0
  strecke finger in 1.0
ende
```

3. Der Prüfstand weist die Zeile mit Zeilennummer ab, weil das Gelenk nur bis zu seinem Anschlag beugt. Grenzen in der Beschreibung verhindern, dass ein Programm eine Lage verlangt, die die Mechanik nicht einnehmen kann.
4. Die Beugesekunden der Finger: 283° in 1,2 Sekunden, das sind 236° je Sekunde.
5. 283° in 0,5 Sekunden sind 566° je Sekunde, mehr als der Antrieb leistet. Die Bewegung dauert am Gerät länger als im Programm. Die Simulation zeigt, was verlangt ist, nicht, was der Antrieb kann.

Erweiterung. Andere Maschinen laden (Greifer, Baggerarm, Achttarm, Portal) und beschreiben, welche Bausteine sie mit der Hand gemeinsam haben. Diese Maschinen sind Konzepte, keine Konstruktionen. Die Stelltabelle lässt sich mit dem Knopf darunter als Datei speichern; aus ihr bildet eine Steuerung die Befehle für die Antriebe.

Einheit 5: Vom Modell zur Maschine

Lernziele. Die Lernenden benennen, was ein Rechenmodell auslöst, planen eine Messung zur Überprüfung und begründen, was beim Vergrößern einer Maschine gleich bleibt und was sich ändert.

Stoff. Jedes der beiden Werkzeuge lässt etwas aus. Der Rechner kennt Reibung nur als festen Wirkungsgrad, die Dehnung der Sehne nur als Feder und die Festigkeit der gedruckten Teile gar nicht. Der Prüfstand kennt keine Kräfte. Erst die Messung am gebauten Teil zeigt, wie gut die Annahmen sind. Dazwischen liegt die Starrkörpersimulation: Im Ordner `urdf` liegt jede Maschine in einem Format, das solche Programme lesen. Sie rechnen Gewicht, Kräfte und Berührung, aber mit vereinfachten Massen und ohne Sehnen.

Beim Vergrößern um den Faktor k wachsen Längen mit k , Flächen mit k^2 , Volumen und Masse mit k^3 . Ein Arm, der doppelt so lang ist, wiegt bei gleichem Werkstoff das Achtfache; sein tragender Querschnitt wächst nur auf das Vierfache. Winkel, Übersetzungen und das Verhältnis von Sehnenweg zu Gelenkradius bleiben gleich.

Aufgaben.

1. Listen Sie drei Annahmen des Rechners auf, die eine Messung widerlegen könnte, und geben Sie je an, wie Sie messen würden.
2. Ein Finger des Modells wird im Maßstab 3:1 aus Stahl statt aus Kunststoff gebaut. Die Dichte steigt von rund 1,3 auf rund 7,9 g/cm³. Um welchen Faktor steigt die Masse? Um welchen Faktor steigt das Moment aus dem Eigengewicht am Grundgelenk?
3. Welche Größen der Hand ändern sich beim Vergrößern nicht? Was heißt das für das Bewegungsprogramm?
4. Die menschliche Hand beugt ihre Finger mit Muskeln im Unterarm; die Kraft kommt über Sehnen an. Welche Vorteile hat diese Anordnung, und welchen Preis hat sie? Vergleichen Sie mit der Hand im Entwurf, deren Antriebe abgesetzt sitzen.

Lösungen.

1. Zum Beispiel: Wirkungsgrad der Umlenkung (Kraft an der Kuppe mit Waage messen und mit dem Rechenwert vergleichen); Dehnung der Sehne (Winkel am Gelenk unter Last messen); nutzbares Dauermoment (Temperatur des Servos über die Zeit).
2. Masse: $3^3 \cdot 7,9 / 1,3$, das ist rund das 164-Fache. Moment aus dem Eigengewicht: zusätzlich der Hebel mal 3, also rund das 492-Fache.
3. Gelenkwinkel, Stellwinkel bei mitvergrößerter Spule und die Abfolge der Bewegungen. Das Programm bleibt gültig; Zeiten und Kräfte müssen neu ausgelegt werden.
4. Vorteile: leichte Finger, geringe bewegte Masse, Platz für kräftige Antriebe. Preis: lange Sehnen mit Reibung und Dehnung, Kopplung der Gelenke über dem Handgelenk, Aufwand für die Führung.

Hinweise für Lehrende

- Die Werkzeuge laufen ohne Netzverbindung aus einem Ordner; sie speichern nichts und senden nichts.
- Jede Einheit lässt sich einzeln halten. Einheit 3 setzt Einheit 1 voraus, Einheit 5 fasst zusammen.
- Die Versuche in Einheit 2 arbeiten mit Gewichten bis rund 200 g und sind ohne besondere Schutzmaßnahmen durchführbar. Schnüre nicht um Finger wickeln.
- Wer nach Einheit 5 weitermachen will: Im selben Ordner liegen acht Übungen zur Werkstatt (`UEBUNGEN_Werkstatt_de.md`). Dort entstehen eigene Maschinen aus den Bausteinen des Fingers; die Werkstatt prüft die Lösungen selbst.
- Wer die Hand bauen will: Die Konstruktion ist ein ungedruckter Entwurf. Ein Bausatz und Druckdateien gehören nicht zu diesem Paket.
- Beurteilung: Die Lösungen zu den Rechenaufgaben stehen im Text; die offenen Aufgaben (Einheit 2 Nr. 2, Einheit 5 Nr. 1 und 4) werden nach Begründung beurteilt, nicht nach Ergebnis.

Rechte

Text: alle Rechte vorbehalten. Die beiden Werkzeuge stehen unter der MIT-Lizenz. Die Hand und die daraus abgeleiteten Maschinen dienen zivilen Zwecken in Lehre, Versuch und Forschung; für Rüstung und Waffen stehen sie nicht zur Verfügung.