

Vom Finger zum Baukasten: gemeinsame Beschreibung, Bewegungsprüfstand und abgeleitete Maschinen

Fachpapier FP06 · SEHNENHAND v1.7 · 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 Bausteinen und Werkzeugen. Das Papier beschreibt ein Format, ein Rechenwerkzeug und Konzepte. Konstruiert sind der Prüffinger (FP05) und seit v1.5 die Hand mit sechs Antrieben (FP07); gedruckt und gemessen ist nichts.

Kein Medizinprodukt. Gegenstand sind Lehr- und Versuchsmodelle, nicht zur Anwendung am oder im menschlichen Körper. Der Betrieb arbeitet nicht für Rüstung, Militär oder Waffen; das gilt für jede Maschine, die sich aus den Bausteinen ableiten lässt.

1. Anlass und Ergebnis

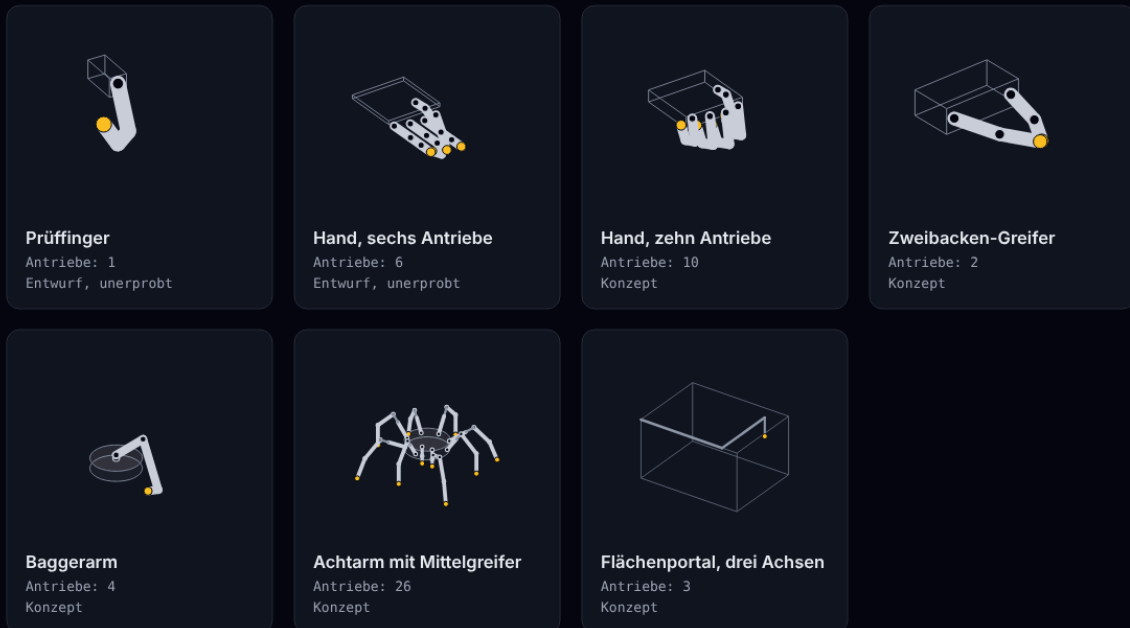
Der Prüffinger aus FP05 besteht aus drei Gliedern, drei Gelenken und einer Sehne. Dieselbe Anordnung, anders zusammengesetzt, ergibt eine Hand, einen Greifer, einen Baggerarm, ein Gerät mit acht Armen oder ein Portal. Dieses Papier zieht daraus drei Folgerungen:

1. **Der Grundbaustein ist die Gliederkette**, nicht die Hand. Die Hand bleibt das Ziel dieses Vorhabens und wird zuerst fertig; sie ist eine Anordnung von sechs Ketten.
2. **Eine Maschine wird beschrieben, bevor sie konstruiert wird.** Das Format `gliederkette/1` hält fest, aus welchen Ketten, Gelenken und Antrieben sie besteht. Aus dieser einen Beschreibung lesen die Werkzeuge.
3. **Bewegung lässt sich prüfen, bevor ein Teil gedruckt ist.** Der Bewegungsprüfstand liest die Beschreibung, führt ein Programm aus und zeigt Lagen, Sehnenwege und Stellwinkel. Er rechnet Lagen, keine Kräfte.

Ein Baustein, viele Maschinen

SCHICHT-WERK

Dieselbe Gliederkette, anders angeordnet. Jede Maschine ist eine Beschreibung aus Ketten, Gelenken und Antrieben; aus ihr lesen Rechner und Bewegungsprüfstand.



Konstruiert sind der Prüffinger und die Hand mit sechs Antrieben; gedruckt ist nichts. Alle anderen Maschinen sind Konzepte mit Konzeptmaßen.

Bild 1: Sieben Maschinen aus derselben Beschreibung, jeweils mitten in einem Beispielprogramm. Konstruiert sind der Prüffinger und die Hand mit sechs Antrieben.

2. Der Grundbaustein

Eine **Kette** ist eine Folge von **Elementen**. Jedes Element ist ein Gelenk mit dem Glied, das daran hängt. Drei Arten genügen für alles, was hier vorkommt:

Element	Bewegung	Beispiel
Drehgelenk um die Querachse	Glied schwenkt in der Ebene der Kette	Fingergelenk, Ausleger
Drehgelenk um die Hochachse	Glied schwenkt seitlich	Gegenstellung des Daumens, Drehsockel, Greiferbacke
Schubgelenk	Glied wird länger	verstellbarer Arm, Achse eines Portals

Ein **Antrieb** stellt ein oder mehrere Elemente. Auch hier drei Arten:

Antrieb	Wirkung	Kenngroße
Sehne	beugt alle Gelenke, über die sie läuft, um denselben Winkel	Wirkradius, Austrittsabstand, Spulenradius
Antrieb am Gelenk	stellt ein Drehgelenk unmittelbar	Stellbereich
Linearantrieb	stellt ein Schubgelenk	Weg je Umdrehung

Ketten können am Körper der Maschine sitzen oder am Ende einer anderen Kette. So entsteht der Daumen (Beugekette auf einer Schwenkkette), der Baggerarm (Arm auf Drehsockel) und das Portal (drei Schubachsen aufeinander).

3. Die gemeinsame Beschreibung

Das Format heißt `gliederkette/1`. Die kanonische Datei liegt in der Datenschicht des Pakets; die Werkzeuge erhalten sie über den erzeugten Lader. Maße stehen in Millimetern, Winkel in Grad, die Achsen zeigen nach vorn (x), nach links (y) und nach oben (z).

Feld	Inhalt
<code>ketten[].ansatz , richtung_grad , neigung_grad</code>	wo die Kette sitzt und wohin sie zeigt
<code>ketten[].traeger</code>	Kennung der Kette, an deren Ende diese Kette sitzt; leer für den Körper
<code>ketten[].elemente[]</code>	Art (<code>dreh</code> , <code>schub</code>), Achse, Länge des Glieds, Stellgrenzen, fester Knick
<code>ketten[].drehsinn</code>	kehrt die Zählrichtung um, damit gespiegelte Ketten gleich angesprochen werden
<code>ketten[].ende</code>	Endstück: Kuppe, Greifer, Schaufel oder Fuß
<code>antriebe[]</code>	Art, Kette, gestellte Elemente; bei Seilen Wirkradius, Austritt, Spule und Antriebstyp
<code>gruppen</code>	Namen für mehrere Antriebe, etwa alle Grundgelenke
<code>programme[]</code>	Beispielabläufe in der Programmsprache aus Abschnitt 5

Drei Regeln hält die Baukette bei jedem Lauf ein und bricht sonst ab: Jedes Element hat höchstens einen Antrieb. Die Ruhelage (Wert 0) liegt innerhalb der Stellgrenzen. Keine Kette trägt sich selbst.

Das Format beschreibt Anordnung und Bewegung. Es beschreibt nicht die Form der Teile; die bleibt in der Konstruktion (FP05). Die Verbindung zwischen beiden ist schmal und geprüft: Gliedlängen, Wirkradius und Austrittsabstand des Prüffingers müssen in Beschreibung und Konstruktion gleich sein.

4. Die Maschinen

Seit v1.5 steht neben den sechs Maschinen dieser Tabelle die konstruierte Hand mit sechs Antrieben (sechs Ketten, 15 Drehgelenke, sechs Antriebe; FP07). Sie ist aus der Konstruktion abgeleitet und wird bei jedem Lauf mit ihr verglichen.

Maschine	Ketten	Drehgelenke	Schubgelenke	Antriebe	Stand	fehlt bis zum Bau
Prüffinger	1	3	–	1	Entwurf, ungedruckt	Druck und Messung

Maschine	Ketten	Drehgelenke	Schubgelenke	Antriebe	Stand	fehlt bis zum Bau
Hand, zehn Antriebe	6	15	–	10	Konzept	Finger mit zweiter Beugesehne und gelöster Kopplung am Grundgelenk; Antriebseinheit für zehn Servos
Zweibacken-Greifer	2	4	–	2	Konzept	Körper mit zwei Fingerfüßen, Antriebseinheit
Baggerarm	2	4	–	4	Konzept	Gelenk mit Antrieb am Gelenk, Drehsockel, Schaufel
Achtarm mit Mittलगreifer	10	28	8	26	Konzept	alles außer dem Glied
Flächenportal, drei Achsen	3	–	3	3	Konzept	Führungen, Rahmen, Antriebe

Hand. Die Hand folgt der Ausbaustufe B aus FP02: je Finger ein Antrieb für das Grundgelenk und einer für Mittel- und Endgelenk, dazu Gegenstellung und Beugung des Daumens. Die Baukette prüft, dass die Hand zehn Antriebe hat und dass Spulenradius, Wirkradius und Antriebstyp den Vorgaben der Stufe entsprechen. Lage der Finger, Fingerlängen und der Ansatz des Daumens sind Konzeptmaße. Mit ihnen treffen sich im Beispiel „Spitzgriff“ die Spitzen von Daumen und Zeigefinger auf rund 2 mm.

Achtarm. Acht gleiche Arme sitzen rund um einen Körper, jeder mit Heben, verstellbarer Länge und Beugung; in der Mitte hängt ein Greifer. Das Beispielpogramm hebt abwechselnd vier Arme an. Ob das Gerät damit geht, zeigt der Prüfstand nicht (Abschnitt 6). Mit 26 Antrieben ist es zudem das mit Abstand aufwendigste der sechs Konzepte.

Portal. Das Portal zeigt, dass die Beschreibung auch Maschinen ohne Drehgelenk fasst. Seine Bauteile, also Führungen, Rahmen und Achsantriebe, gehören nicht zu den Bausteinen dieses Vorhabens.

5. Der Bewegungsprüfstand

5.1 Was er rechnet

Für jede Kette setzt der Prüfstand die Lage ihrer Glieder aus Drehungen und Verschiebungen zusammen (Vorwärtsrechnung). Ein Drehgelenk um die Querachse dreht das folgende Glied nach unten, eines um die Hochachse nach links; ein Schubgelenk verlängert das Glied. Die Darstellung ist eine schräge Parallelansicht, die sich um die Hochachse drehen lässt.

Für Sehnenantriebe rechnet er mit denselben Formeln wie der Rechner (FP02, Abschnitt 2) den Sehnenweg und daraus den Stellwinkel an der Spule. Er vergleicht den größten Stellwinkel des Programms mit dem Stellbereich des Antriebs und meldet, wenn dieser nicht reicht oder nur im Mehrgangbetrieb reicht.

5.2 Programmsprache

Ein Programm ist eine Folge von Zeilen. Die Befehle gibt es deutsch und englisch.

Befehl	Wirkung
beuge ZIEL WERT in SEKUNDEN	stellt einen Antrieb oder eine Gruppe auf den Wert; fahre und setze bedeuten dasselbe
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

Ein Beispiel für die Hand:

```
zugleich
  beuge grund 80 in 1.2
  beuge spitze 80 in 1.2
ende
beuge daumen_dreh 55 in 0.6
strecke alle in 1.0
```

Vor dem Lauf prüft der Prüfstand das Programm: unbekannte Befehle und Ziele, Werte außerhalb der Stellgrenzen, offene Blöcke und Antriebe, die zweimal zur selben Zeit bewegt würden. Fehler nennt er mit Zeilennummer; ein fehlerhaftes Programm läuft nicht.

Die Sprache ist bewusst klein. Sie kennt keine Bedingungen, keine Messwerte und keine Rechenausdrücke. Sie wird im Browser gelesen und ausgewertet, nicht als Programmcode ausgeführt.

5.3 Stelltabelle

Den geladenen Ablauf gibt der Prüfstand als Tabelle aus: je Bewegung Start, Ende, Antrieb, Sollwert und Stellwinkel ab der Ruhelage. Diese Tabelle ist als Übergabe an eine Steuerung gedacht. Seit v1.6 liest ein Programm auf dem Rechner diese Tabelle und bildet daraus Befehle für Bus-Servos (Modul M10, FP08); es ist im Trockenlauf geprüft und an keinem Gerät erprobt.

5.4 Prüfungen

Prüfung	Ergebnis
Alle 14 Beispielprogramme der sieben Maschinen	lauffähig, Sollwerte innerhalb der Stellgrenzen
Lage der Fingerspitze des Prüffingers bei 0, 30, 60 und 88 Grad	gleich der Lage aus der Konstruktion (Abweichung unter 0,000001 mm)
Sehnenweg des Prüffingers bei 88 Grad	46,8 mm, wie im Prüfbericht der Konstruktion
Stellbereich in den Beispielprogrammen	reicht überall; die Schubachsen brauchen den Mehrgangbetrieb

Prüfung	Ergebnis
Hand gegen Ausbaustufe B	zehn Antriebe, Vorgaben eingehalten

Die Lage der Fingerspitze rechnen zwei unabhängig geschriebene Stellen: der Prüfstand in JavaScript und die Konstruktionskette in Python. Die Baukette vergleicht beide bei jedem Lauf.

6. Was der Prüfstand nicht rechnet

- **Keine Kräfte.** Er weiß nicht, ob ein Antrieb die Bewegung schafft. Dafür ist der Rechner da, und der rechnet nur den einzelnen Finger.
- **Kein Gewicht, kein Bodenkontakt.** Der Achterm bewegt seine Arme; ob er steht, kippt oder vorankommt, bleibt offen. Der gedachte humpelnde Gang ist damit nicht nachgewiesen.
- **Keine Zusammenstöße.** Glieder können im Bild durcheinander laufen. Die Faust der Hand und der geschlossene Greifer sind nicht auf Berührung geprüft.
- **Keine Zeit des Antriebs.** Ein Programm darf eine Bewegung in beliebig kurzer Zeit verlangen; Stellgeschwindigkeiten sind nicht hinterlegt.
- **Gleicher Winkel an gekoppelten Gelenken.** Wie in FP02 beugt eine Sehne alle ihre Gelenke gleich weit.

Für Kräfte, Kontakt und Gang braucht es eine Starrkörpersimulation mit Massen und Reibung. Dafür gibt es frei verfügbare Programme (Todorov, Erez und Tassa 2012). Der naheliegende nächste Schritt ist deshalb kein eigener Physikkern, sondern eine Ausgabe der Kettenbeschreibung in ein Format, das solche Programme lesen. Das ist offen.

7. Vorbilder aus der Natur

Die Gliederkette mit Sehnenszug hat ein Vorbild, und die abgeleiteten Maschinen haben andere. Die Bionik unterscheidet zwei Wege: vom biologischen Befund zur Technik und von der technischen Aufgabe zum biologischen Vorbild (VDI 6220 Blatt 1; ISO 18458). Hier liegt der zweite Fall vor. Die Tabelle hält fest, was übertragen ist und wo die Übertragung endet.

Vorbild	Prinzip	Baustein hier	Grenze der Übertragung
Finger des Menschen	Muskeln im Unterarm, Sehnen über Ringbänder zu den Gliedern; der Hebelarm einer Sehne ist die Ableitung ihres Weges nach dem Gelenkwinkel (An et al. 1983)	Sehnenszug mit Führungseinsatz, Antriebe außerhalb der Hand	Stiftgelenke und eine Beugesehne je Antrieb; Streckapparat und Seitbewegung fehlen
Arm der Krake	muskulärer Hydrostat: kein Skelett, Biegung an jeder Stelle, Länge und Steifigkeit verstellbar (Kier und Smith 1985)	Kette mit Schubglied als grobe Näherung	drei Gelenke biegen an drei Stellen; weiche Arme sind ein eigenes Feld (Laschi et al. 2012)
Bein der Spinne	Beugen mit Muskeln, Strecken mit Flüssigkeitsdruck (Parry und Brown 1959)	Hinweis für die Rückstellung ohne zweite Sehne	im Prüffinger streckt eine Rückzugsehne
Qualle	radialsymmetrischer Körper, Rückstoß durch eine elastische Glocke (Gemmell et al. 2013)	Anordnung gleicher Arme rund um einen Körper	vom Vorbild bleibt die Symmetrie; Schwimmen ist nicht Gegenstand

Die Beziehung zwischen Sehnenweg und Hebelarm, die An et al. am Zeigefinger gemessen haben, ist dieselbe, die in FP02 den Hebelarm der freien Sehne liefert. Insofern ist der Prüffinger nicht nur der Form nach ein Finger.

Vier Zeilen sind kein Katalog. Sie zeigen die Form, in der ein solcher Katalog geführt werden könnte: Vorbild, Prinzip, Baustein, Grenze, Quelle.

8. Vom Modell zur Maschine

Ein gedrucktes Modell zeigt Anordnung und Ablauf. Wer es größer und aus Metall bauen will, übernimmt die Beschreibung und legt alles andere neu aus:

- **Kräfte und Massen wachsen ungleich.** Bei geometrisch ähnlicher Vergrößerung um den Faktor s wachsen Querschnitte und damit tragbare Kräfte mit s^2 , Volumen und Masse mit s^3 . Ein Arm, der im Modell sein Gewicht mühelos trägt, tut das im Maßstab 10 nicht mehr.
- **Bauteile wechseln.** Aus gedruckten Achsen werden Bolzen in Wälzlagern, aus der Sehne wird Drahtseil, Kette, Spindel oder Zylinder.
- **Die Frage nach dem Stellbereich bleibt.** Weg je Gelenk gegen Hub des Antriebs ist im Großen dieselbe Rechnung.
- **Das Recht ändert sich.** Eine kraftbetriebene Maschine für den Einsatz fällt unter das Maschinenrecht der Europäischen Union; die Verordnung (EU) 2023/1230 ist ab 20. Jänner 2027 anzuwenden. Das ist allgemeine Rechtskenntnis und keine Rechtsberatung.

Das Modell ersetzt also keine Auslegung. Es klärt früh und billig, ob eine Anordnung die gewünschte Bewegung überhaupt ausführen kann.

9. Aufbau in Schichten

Schicht	Inhalt	Stand
Gemeinsame Sprache	Kettenbeschreibung, Datenschicht, Messdatei	Kettenbeschreibung im Entwurf, Datenschicht festgelegt, Messdatei offen
Baukasten	Glied mit Gelenk, Fuß, Führungseinsatz, Antriebseinheit, Endstück, Steuerung	Prüffinger, Hand, Antriebseinheit und Steuerung im Entwurf (FP05, FP07, FP08); Sensorik und Datenhandschuh Konzept
Rechnen, simulieren, programmieren	Rechner und Bewegungsprüfstand	beide liegen vor
Maschinen	sechs Beschreibungen	gebaut ist nichts
Vorbilder	Steckbriefe aus Abschnitt 7	Anfang

Der Bewegungsprüfstand liest nur die Kettenbeschreibung und weiß nichts von der Hand. Er lässt sich deshalb aus diesem Vorhaben herauslösen, sobald Maschinen aus anderen Vorhaben dazukommen. Bis dahin ist er hier das Modul M13 und hat wie der Rechner eine neutrale Fassung ohne Betriebsangaben.

10. Wie es mit der Hand weitergeht

Schritt	Inhalt	hängt ab von
H1	Prüffinger drucken und messen	Drucker, OpenSCAD
H2	Handfläche mit vier Fingerfüßen und Handgelenkflansch: Entwurf liegt seit v1.5 vor (FP07)	Maße aus H1 als Entwurf
H3	Daumen mit Gegenstellung: Entwurf liegt seit v1.5 vor (FP07)	H2
H4	Fingerkuppe und Kuppenaufnahme: Entwurf liegt seit v1.6 vor (FP08)	Endglied aus H1
H5	Antriebseinheit mit sechs Servopläätzen: Entwurf liegt seit v1.6 vor (FP08)	Wahl des Antriebs, H2
H6	Steuerung, die die Stelltablette abspielt: Entwurf liegt seit v1.6 vor, am Gerät nicht erprobt (FP08)	H5
H7	Geber an den Gelenken	H6
H8	Zusammenbau, Messung, Freigaben	H1 bis H7

H2 und H3 lassen sich als Entwurf konstruieren, bevor der Prüffinger gedruckt ist. Ihre Maße stehen dann unter demselben Vorbehalt wie die des Fingers.

11. Grenzen

- **Ein Format in erster Fassung.** `gliederkette/1` ist an sechs Beispielen erprobt, die alle vom selben Verfasser stammen. Ob es fremde Maschinen fasst, ist offen.
- **Konzeptmaße.** Außer beim Prüffinger sind alle Maße gewählt, damit das Bild stimmt, nicht weil sie konstruiert wären.
- **Kinematik ist nicht Machbarkeit.** Dass sich eine Maschine am Bildschirm bewegt, sagt nichts darüber, ob sie trägt, hält oder bezahlbar ist.
- **Der Achtarm ist ein Gedankenmodell.** Standsicherheit, Antriebsmoment und Gang sind nicht gerechnet.
- **Bionik in vier Zeilen.** Die Tabelle in Abschnitt 7 ist ein Anfang und stützt sich auf wenige Quellen.

12. Literatur

- An, K. N.; Ueba, Y.; Chao, E. Y.; Cooney, W. P.; Linscheid, R. L. (1983): Tendon excursion and moment arm of index finger muscles. *Journal of Biomechanics* 16 (6), 419–425.
- Gemmell, B. J.; Costello, J. H.; Colin, S. P. et al. (2013): Passive energy recapture in jellyfish contributes to propulsive advantage over other metazoans. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110 (44), 17904–17909.
- ISO 18458:2015: Biomimetics – Terminology, concepts and methodology. <https://www.iso.org/standard/62500.html> (nicht im Volltext geprüft).
- Kier, W. M.; Smith, K. K. (1985): Tongues, tentacles and trunks: the biomechanics of movement in muscular-hydrostats. *Zoological Journal of the Linnean Society* 83 (4), 307–324.

- Laschi, C.; Cianchetti, M.; Mazzolai, B.; Margheri, L.; Follador, M.; Dario, P. (2012): Soft Robot Arm Inspired by the Octopus. *Advanced Robotics* 26 (7), 709–727.
- Parry, D. A.; Brown, R. H. J. (1959): The hydraulic mechanism of the spider leg. *Journal of Experimental Biology* 36 (2), 423–433.
- Todorov, E.; Erez, T.; Tassa, Y. (2012): MuJoCo: A physics engine for model-based control. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 5026–5033.
- VDI 6220 Blatt 1: Bionik – Grundlagen, Konzeption und Strategie. Verein Deutscher Ingenieure (nicht im Volltext geprüft).
- Verordnung (EU) 2023/1230 des Europäischen Parlaments und des Rates über Maschinen.

Band-, Heft- und Seitenangaben der Zeitschriftenaufsätze sind aus dem Gedächtnis ergänzt und vor einer Veröffentlichung am Original zu prüfen; per Suche bestätigt sind Titel und Verfasser bei An et al. und Laschi et al. sowie das Bestehen der beiden Normen.