

Die Sehnenhand als Baukasten: Module, Schnittstellen und Verknüpfung

Fachpapier FP04 · SEHNENHAND v2.1 · 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 Modulen. Das Papier beschreibt einen Aufbauplan. Fünf Module liegen als Entwurf vor (FP05, FP07); kein Modul ist gedruckt oder gemessen, und die meisten Schnittstellen haben noch keine Maße.

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

1. Entscheidung

Die Sehnenhand wird als eigener Strang geführt, modular aufgebaut und mit anderen Vorhaben verknüpfbar gehalten. Daraus folgen drei Festlegungen:

1. **Das Modul ist die Einheit**, nicht die Hand. Bestellt, getauscht, geprüft und beschrieben wird je Modul.
2. **Module hängen nur über benannte Schnittstellen zusammen.** Wer eine Schnittstelle einhält, kann ein Modul ersetzen, ohne den Rest zu ändern.
3. **Der Katalog ist eine Datei.** Module und Schnittstellen stehen in einer Datenschicht. Daraus entstehen der Rechner, die Modulmatrix, der Modulkatalog und ein maschinenlesbarer Modulpass. Andere Vorhaben verknüpfen sich über diesen Pass und nicht über Absprachen.

2. Warum modular

Die Aufarbeitung in FP01 zeigt, dass Robotik-Teams ihre Hände laufend ändern und dass die Nachfrage bei Einzelteilen liegt: Kuppen, Halterungen, Führungen, Adapter. Eine Hand aus einem Guss passt dazu schlecht. Ein Baukasten erlaubt vier Dinge, die ein Kleinbetrieb braucht:

- **Einzeln verkaufen.** Eine Fingerkuppe oder ein Flanschadapter ist ein Artikel, auch ohne fertige Hand.
- **Einzeln prüfen.** Ein Finger lässt sich am Prüfstand messen, bevor es eine Handfläche gibt.
- **Stufenweise wachsen.** Die Ausbaustufen A bis C unterscheiden sich in Antrieb, Führung und Sensorik, nicht im Grundaufbau.
- **Recht je Modul klären.** Mechanikmodule fallen unter die Produktsicherheit ohne CE-Kennzeichnung; erst Elektronikmodule lösen weitere Pflichten aus (FP01, Abschnitt C6).

Die Fachliteratur beschreibt denselben Zusammenhang allgemein: Eine modulare Produktarchitektur ordnet jeder Funktion ein Bauteil zu und entkoppelt die Bauteile über festgelegte Schnittstellen (Ulrich 1995). Der Preis dafür ist, dass die Schnittstellen früh und sorgfältig festgelegt werden müssen, weil sie später am teuersten zu ändern sind (Baldwin und Clark 2000). Offene Handprojekte gehen ähnlich vor: Die ORCA Hand ist in unter acht Stunden montierbar und lässt Gelenke bei Überlast ausspringen, statt zu brechen (Christoph et al. 2025); die Amazing Hand baut vier gleiche Finger aus je zwei Servos (Pollen Robotics).

3. Schnittstellen

Dreizehn Schnittstellen in drei Arten. Festgelegt ist bisher nur die Datenschicht. Zehn sind im Entwurf bemaßt oder beschrieben und unerprobt: Fingerfuß, Sehnendurchgang und Führungseinsatz mit dem Prüffinger (FP05), Handgelenkflansch mit der Handplatte (FP07), Kuppenaufnahme, Armflansch, Servobus, Versorgung und Rechneranschluss mit Kuppe, Flanschadapter, Antriebseinheit und Steuerung (FP08), die Kettenbeschreibung als Format in erster Fassung (FP06). Offen sind der Geberanschluss und die Messdatei.

Nr.	Kürzel	Name	Art	Inhalt	Maße
S01	FF	Fingerfuß	mechanisch	Aufnahme eines Fingers an Handfläche oder Prüfstand	Entwurf
S02	KA	Kuppenaufnahme	mechanisch	Sitz der Fingerkuppe am Endglied: Kappe über der Nase, von den Ankerschrauben gehalten	Entwurf
S03	SD	Sehnendurchgang	mechanisch	Lage und Durchmesser der Sehnenöffnungen zwischen Modulen	Entwurf
S04	FE	Führungseinsatz	mechanisch	Tasche für Rolle, PTFE-Einlage oder Stift	Entwurf
S05	HG	Handgelenkflansch	mechanisch	Verbindung der Handplatte mit dem Flanschadapter	Entwurf
S06	AF	Armflansch	mechanisch	Befestigung der Hand an Stativ, Versuchsträger oder Roboterarm	Entwurf
S07	SB	Servobus	elektrisch	Leitung zu den Antrieben	Entwurf
S08	VS	Versorgung	elektrisch	Kleinspannung aus zugekauftem Netzteil	Entwurf
S09	GB	Geberanschluss	elektrisch	Winkelgeber und Kraftaufnehmer	offen
S10	RA	Rechneranschluss	elektrisch	kabelgebundene Verbindung zum Rechner	Entwurf
S11	DS	Datenschicht	Daten	Bauteile, Module, Regeln und Texte als JSON	festgelegt
S12	MD	Messdatei	Daten	Messwerte vom Prüfstand zurück in die Datenschicht	offen
S13	KB	Kettenbeschreibung	Daten	Maschine aus Gliederketten: Ketten, Gelenke, Antriebe, Programme (Format <code>gliederkette/1</code>)	Entwurf

Die drei Schnittstellen, an denen am meisten hängt [eigene Einschätzung].

- **Fingerfuß.** Er trägt Finger, Daumen und Prüfstand. Ist er festgelegt, kann ein Finger gemessen werden, ohne dass es eine Hand gibt.

- **Führungseinsatz.** FP02 zeigt, dass die Führung über die Hälfte der Kraft entscheidet (89 % Übertragung mit Rollen, 46 % im gedruckten Kanal). Eine Tasche, die Rolle, PTFE-Einlage und Stift gleichermaßen aufnimmt, macht die Stufen A bis C zu Varianten desselben Fingers.
- **Armflansch.** Über ihn kommt die Hand auf Stative, Versuchsträger und Roboterarme. Für Roboterarme ist ein Lochbild in Anlehnung an ISO 9409-1 vorgesehen; welche Größe, hängt vom Arm ab und ist nicht geprüft.

4. Module

Fünfzehn Module in vier Gruppen. Drei liegen vor (Rechner, Bewegungsprüfstand, Fachpapiere und Handbuch). Zehn sind Entwurf und unerprobt: Finger, Daumen, Handfläche, Fingerkuppe, Führungseinsatz, Antriebseinheit, Flanschadapter und Prüfstand als ungedruckte Konstruktion, die Steuerung als Programm ohne Lauf am Gerät, das Lehrpaket ohne Erprobung im Unterricht. Zwei sind Konzept: Datenhandschuh und Sensorik.

Nr.	Modul	Gruppe	Zweck	Schnittstellen	Stufen	Stand
M01	Finger	Mechanik	drei Glieder mit Gelenken und Sehnenanker	FF, KA, SD, FE, GB	A B C	Entwurf, unerprobt
M02	Daumen	Mechanik	Finger mit zusätzlicher Achse	FF, KA, SD, FE, GB	A B C	Entwurf, unerprobt
M03	Handfläche	Mechanik	trägt Finger und Daumen, führt die Sehnen	FF, SD, FE, HG	A B C	Entwurf, unerprobt
M04	Fingerkuppe	Mechanik	Greiffläche aus TPU als Kappe über dem Endglied	KA, GB	A B C	Entwurf, unerprobt
M05	Führungseinsatz	Mechanik	Rolle, PTFE-Einlage oder Stift	FE	A B C	Entwurf, unerprobt
M06	Antriebseinheit	Mechanik	abgesetzter Block mit sechs Servopläätzen, Spulen und Schlauchtürmen	SD, SB, VS	A B C	Entwurf, unerprobt
M07	Flanschadapter	Mechanik	Übergang von der Handplatte auf Stativ, Versuchsträger, Roboterarm	HG, AF	A B C	Entwurf, unerprobt
M08	Prüfstand	Mechanik	misst Kraft, Reibung und Dehnung an einem Finger	FF, SD, SB, GB, MD	A B C	Entwurf, unerprobt
M09	Datenhandschuh	Mechanik	passives Erfassungsgerät mit Winkelgebern	GB, RA	D	Konzept
M10	Steuerung	Elektronik	Programm auf dem Rechner, das die Stelltabelle in Befehle für Bus-Servos umsetzt; zugekaufter Buswandler	SB, VS, RA, KB	A B C D	Entwurf, unerprobt
M11	Sensorik	Elektronik	Winkelgeber und Kraftaufnehmer	GB	B C D	Konzept
M12	Sehnenhand-Rechner	Software	Vorauslegung	DS, MD	A B C D	liegt vor

Nr.	Modul	Gruppe	Zweck	Schnittstellen	Stufen	Stand
M13	Bewegungsprüfstand	Software	Bewegungsabläufe am Bildschirm; rechnet Lagen, keine Kräfte	DS, KB	A B C	liegt vor
M14	Lehrpaket	Unterlagen	fünf Unterrichtseinheiten mit Rechner und Bewegungsprüfstand	DS	A B	Entwurf, unerprobt
M15	Fachpapiere und Handbuch	Unterlagen	Marktbild, Rechenmodell, Modulaufbau	DS	A B C D	liegt vor

Die Tabelle ist aus der Datenschicht abgeleitet. Die maßgebliche Fassung ist `module.json`; der erzeugte Modulkatalog liegt in `01_EXTERN/modul`.

5. Reihenfolge

Die Schnittstellen bestimmen, womit begonnen wird: mit dem Modul, das die wenigsten anderen braucht und die meisten Fragen beantwortet.

Schritt	Module	Legt fest	Liefert
1	Finger, Führungseinsatz, Prüfstand	Fingerfuß, Führungseinsatz, Sehnendurchgang	Messwerte für FP02; erste verkaufbare Einzelteile
2	Fingerkuppe	Kuppenaufnahme	Kuppen als Zubehör, auch für fremde Hände nach Maß
3	Handfläche, Daumen	Handgelenkflansch	Hand ohne Antrieb als Mechanik-Bausatz
4	Antriebseinheit, Flanschadapter	Armflansch, Servobus, Versorgung	Hand mit Antrieb; ab hier Elektronikpflichten prüfen
5	Sensorik, Datenhandschuh	Geberanschluss, Rechneranschluss	Erfassung von Stellung und Kraft
6	Lehrpaket	–	abgeleitet aus Konstruktion und Bewegungsprüfstand

Schritt 1 deckt sich mit dem Messprogramm aus FP02, Abschnitt 6. Die Konstruktion dazu und der Messplan stehen in FP05.

6. Verknüpfung

Ein anderes Vorhaben verknüpft sich mit der Sehnenhand auf einem von drei Wegen:

- Über eine mechanische Schnittstelle.** Wer den Fingerfuß, die Kuppenaufnahme oder den Armflansch einhält, kann ein eigenes Modul anbieten oder ein Modul der Sehnenhand aufnehmen.
- Über die Datenschicht.** Der Modulpass (`01_EXTERN/modul/modulpass.json`) nennt Kennung, Fassung, Module und Schnittstellen in maschinenlesbarer Form. Ein anderes Werkzeug kann ihn einlesen, ohne die Sehnenhand zu kennen.

3. **Über die Messdatei.** Messwerte aus einem anderen Vorhaben, etwa Reibwerte gedruckter Kanäle, fließen in die Bauteildaten zurück. Das Format ist offen und wird mit dem Prüfstand festgelegt.

Die Verknüpfung ändert nichts an den Grenzen: kein Körperersatz, keine Behandlung, kein Tragen am Körper als Zweck; keine Rüstung, kein Militär, keine Waffen.

7. Grenzen dieses Papiers

- **Kein Maß ist erprobt.** Zehn von dreizehn Schnittstellen sind im Entwurf bemaßt oder beschrieben, aber an keinem gedruckten Teil und an keinem Gerät bestätigt; zwei sind offen. Bis zum ersten Prüfstück ist der Katalog ein Plan.
- **Modulzuschnitt nur teilweise geprüft.** Der Führungseinsatz sitzt im Entwurf im Fuß des Fingers, nicht in den Gliedern. Ob Finger und Daumen denselben Fingerfuß tragen können, zeigt erst die Konstruktion des Daumens.
- **Mehr Schnittstellen, mehr Spiel.** Jede Trennstelle bringt Toleranzen und Nachgiebigkeit. Bei Sehnenantrieben wirkt sich das auf Reibung und Stellgenauigkeit aus und ist am Prüfstand zu messen.
- **Armflansch.** Das Lochbild des Flanschadapters ist aus der Erinnerung an ISO 9409-1 angesetzt; die Norm wurde nicht im Volltext geprüft.
- **Antriebseinheit abgesetzt.** Seit v1.6 sitzt die Antriebseinheit nicht mehr am Handgelenk. Der Handgelenkflansch verbindet die Handplatte mit dem Flanschadapter; Hand und Antriebseinheit hängen nur über die Schläuche zusammen (FP08).

8. Literatur

- Baldwin, C. Y.; Clark, K. B. (2000): Design Rules. Volume 1: The Power of Modularity. MIT Press.
- 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.
- ISO 9409-1: Manipulating industrial robots – Mechanical interfaces – Part 1: Plates. Nicht im Volltext geprüft.
- Pollen Robotics / Hugging Face: The Amazing Hand. <https://huggingface.co/blog/pollen-robotics/amazing-hand> (Herstellerangabe).
- Ulrich, K. (1995): The role of product architecture in the manufacturing firm. Research Policy 24 (3), 419–440.
- Fachpapiere FP01, FP02 und FP05 bis FP10 dieses Pakets.

Die Angaben zu Baldwin und Clark sowie zu Ulrich sind aus dem Gedächtnis zitiert und vor einer Veröffentlichung am Original zu prüfen.