

Offener Baukasten: Standardlinie, Werkstatt im Browser und Vorbereitung des Testbetriebs

Fachpapier FP11 · 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 Bauteilen und Werkzeugen. Das Papier beschreibt Entwürfe und ein Werkzeug. Kein Teil ist gedruckt, kein Wert ist gemessen, der Testbetrieb hat nicht begonnen.

Kein Medizinprodukt. Gegenstand sind Maschinen aus Gliederketten für Lehre, Versuch und Forschung, nicht zur Anwendung am oder im menschlichen Körper.

1. Ergebnis

Bis zur Fassung 1.9 war die Gliederkette ein Mittel, die Hand zu beschreiben. Sieben Maschinen standen fest in der Datenschicht; wer eine achte wollte, musste eine Datei von Hand schreiben und die Baukette fahren (FP06). Dieses Papier dreht das um: Der Finger wird zum Baustein, aus dem Anwender selbst Maschinen zusammensetzen.

Baustein der Fassung	Inhalt	Stand
Standardlinie	sieben druckbare Bausteine mit dem Querschnitt des Prüffingers; Glieder in jeder Länge von 24 bis 120 mm; dazu je Maschine eine erzeugte Trägerplatte, wenn die Anordnung flach ist	Entwurf, rechnerisch geprüft, ungedruckt
Werkstatt	Seite im Browser: Ketten anlegen, Maße ändern, bewegen, programmieren, prüfen, als Datei weitergeben	liegt vor, in Chromium geprüft
Vier Arbeitsweisen	Selbst bauen, Lernen und üben, Messen und forschen, Entwickeln und konstruieren	liegt vor
Sechs Übungen	Aufgaben, die die Werkstatt selbst prüft	liegen vor, mit Lernenden unerprobt
Bauteilerzeugung	aus einer Maschinendatei entstehen die Druckteile in den verlangten Längen, Zusammenbau und Baubericht	liegt vor, intern
Fünf Beispielmaschinen	kurzer Finger, zwei Finger, Fächer mit drei Fingern, Greifer mit drei Fingern, Gliederarm mit fünf Gelenken; alle vollständig aus der Standardlinie	Entwurf, ungedruckt
Testbetrieb	Aufgabenblätter für vier Gruppen, Rückmeldebogen, interner Plan, 16 Testfälle	vorbereitet, nicht begonnen

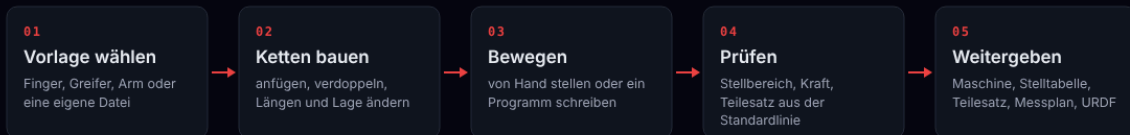
Aus einem Finger wird ein Baukasten

SCHICHT-WERK

In der Werkstatt setzt man aus den Bausteinen des Fingers eigene Maschinen zusammen, bewegt sie am Bildschirm und gibt sie als Datei weiter. Die Beispiele unten lassen sich vollständig aus der Standardlinie fertigen.



FÜNF SCHRITTE IN DER WERKSTATT



VIER ARBEITSWEISEN



Alle Bausteine sind Entwurf: gerechnet, nicht gedruckt. Die Werkstatt rechnet Lagen und Richtwerte, keine Festigkeit.

Bild 1: Oben die fünf Beispielmachines aus der Standardlinie in der Lage ihres Schaubilds, darunter die fünf Schritte in der Werkstatt und die vier Arbeitsweisen.

2. Die Standardlinie

Die Standardlinie fasst zusammen, was am Prüffinger und an der Hand konstruiert ist (FP05, FP07, FP08): 16 mm breit, Gelenke um die Querachse mit Achse M3, Anschläge bei -5 und 90 Grad, eine Beugesehne je Kette oder Kettenabschnitt.

Baustein	Modul	Länge	Masse voll gedruckt
Fingerfuß	M01	fest	9,1 g
Glied mit Gabel	M01	24 bis 120 mm	0,35 g je mm, abzüglich 2,5 g
Endglied	M01	24 bis 120 mm	0,35 g je mm, abzüglich 2,2 g
Führungseinsatz, gerade	M05	fest	1,5 g
Fingerkuppe	M04	fest	2,3 g

Baustein	Modul	Länge	Masse voll gedruckt
Spule	M06	fest	2,4 g
Servobügel	M06	fest	4,8 g

Neu ist nur der Längenbereich. Die Bauvorschrift der Glieder nahm die Länge schon immer als Eingabe; konstruiert und geprüft waren aber nur 40, 26 und 24 mm. Die Baukette prüft jetzt sechs Stützängen von 24 bis 120 mm in vier Paarungen: Fuß mit Glied, Glied mit Endglied, Glied mit Glied in beiden Reihenfolgen. In allen 24 Paarungen ist das Gelenk zwischen -4 und 88 Grad frei und stößt bei -7 und 93 Grad an.

Untere Grenze. Unter 24 mm geht es nicht: Das gerundete Ende des Endglieds hat 8,75 mm Radius und reicht bei kürzeren Gliedern in das Gelenk dahinter. Die Erkundung zeigte bei 22 mm bereits 8 mm^3 Durchdringung, bei 20 mm 111 mm^3 .

Obere Grenze. 120 mm ist ein Startwert, keine Festigkeitsgrenze. Ein Glied von 120 mm wiegt voll gedruckt rund 40 g und hängt an einer Achse M3; ob das trägt, ist nicht gerechnet.

Was die Standardlinie nicht kann. Gelenke um die Hochachse, Schubglieder, feste Knicke, andere Dicken, Ketten auf Ketten und alle Endstücke außer der Kuppe. Die Werkstatt lässt das alles zu, weil der Bewegungsprüfstand es rechnen kann, und weist es im Teilesatz als „kein Baustein“ aus.

3. Die Werkstatt

Die Werkstatt ist eine dritte Seite neben Rechner und Bewegungsprüfstand. Sie hat keinen eigenen Rechenkern für Bewegung: Sie ändert die Beschreibung der Maschine, und der Bewegungsprüfstand zeigt, bewegt und programmiert sie. Ansicht, Programmsprache, Stelltable und Prüfung des Stellbereichs sind dieselben wie dort (FP06).

Eigenes leistet sie an sechs Stellen:

1. **Aufbau ändern.** Ketten anfügen, verdoppeln, entfernen; Gelenke anfügen und entfernen; je nach Arbeitsweise nur Längen und Lage oder alle Größen des Formats.
2. **Nur gültige Maschinen.** Jede Änderung wird an einer Kopie geprüft und nur übernommen, wenn die Maschine danach in sich stimmt. Sonst bleibt der alte Stand, und eine Meldung nennt den Grund. Bis zu 30 Schritte lassen sich zurücknehmen.
3. **Antriebe mitführen.** Im einfachen Modus bekommt jedes bewegliche Gelenk ohne Antrieb einen: Drehgelenke um die Querachse hängen je Kette an einer Sehne.
4. **Abstand.** Die Werkstatt meldet, wenn Glieder einander zu nahe kommen: in Ruhelage, im geladenen Programm und mit allen Antrieben am oberen Ende (Abschnitt 5).
5. **Kennzahlen und Teilesatz.** Je Antrieb Sehnweg, Stellwinkel gegen Stellbereich und ein Richtwert der Kraft am Ende der gestreckten Kette; dazu, was sich aus der Standardlinie drucken lässt und was fehlt, mit Masse.
6. **Dateien.** Maschine speichern und laden (Format `gliederkette/1`), Stelltable, Teilesatz, Messplan, URDF.

Die Werkstatt speichert nichts im Browser und sendet nichts. Wer seine Arbeit behalten will, speichert die Maschinendatei.

3.1 Vier Arbeitsweisen

Arbeitsweise	Felder	zusätzlich
Selbst bauen	Name, Lage quer, Richtung, Endstück, Längen	Teilesatz; Antriebe automatisch
Lernen und üben	alle	Antriebe, Kennzahlen, Teilesatz, Übungen
Messen und forschen	alle	Antriebe, Kennzahlen, Messplan, URDF
Entwickeln und konstruieren	alle	alles

Die Arbeitsweise ändert, was die Seite zeigt, nicht die Maschine. Wer wechselt, verliert nichts.

3.2 Richtwert der Kraft

Die Kraft rechnet der Kern des Sehnenhand-Rechners (FP02) mit festen Annahmen: Sehne und Führung wie bei der konstruierten Hand, 120 Grad Biegung im Schlauch als runder Wert aus der Auslegung (FP10: 92 bis 151 Grad), Hebel vom ersten getriebenen Gelenk bis zum Ende der gestreckten Kette. Für den Prüffinger ergibt das 4,0 N; die Auslegung nennt 3,9 bis 4,1 N. Der Reibwert bleibt unbelegt.

3.3 Übungen

Sechs Aufgaben, jede mit Ausgangslage, Hinweis und Merkmalen, die die Werkstatt prüft: zweiter Finger, kurzer Finger, Greifer mit drei Fingern, Stellbereich einhalten, Punkt anfahren, Arm auf Drehsockel. Die Merkmale stehen als Daten in der Beschreibung des Baukastens, nicht im Programm; eine siebente Übung ist ein Eintrag, kein Umbau. Die Baukette prüft bei jedem Lauf, dass die Musterlösung jede Aufgabe erfüllt und die Ausgangslage nicht.

Dass Lernende an einem Baukasten mehr begreifen, wenn sie selbst etwas bauen, das sich bewegt, ist die Grundannahme hinter Baukästen für die Lehre (Papert 1980; Resnick und Silverman 2005). Belegt ist das für die Werkstatt nicht: Kein Mensch außer dem Verfasser hat sie bedient.

4. Von der Maschinendatei zum Teilesatz

Die Werkstatt endet bei der Datei. Die Bauteile entstehen in der Baukette (`05_BUILD/baukasten.py`), aus derselben Bauvorschrift wie Prüffinger und Hand:

1. Beschreibung prüfen, mit einer eigenen, vom Werkzeug unabhängigen Fassung der Regeln.
2. Teilesatz bilden. Je Standardkette ein Fuß, ein Einsatz, Glieder in den verlangten Längen, eine Kuppe; je Sehnenantrieb Spule, Bügel und Servo; für flache Anordnungen eine Trägerplatte.

3. OpenSCAD-Quellen der Glieder schreiben und mit einem eigenen Leser gegenlesen.
4. Zusammenbau schreiben und in drei Stellungen mit dem numerischen Zwilling vergleichen:
Ruhelage, 30 Prozent der oberen Gelenkgrenzen, untere Gelenkgrenze.
5. Ketten und Trägerplatte in diesen Stellungen gegeneinander auf Durchdringung prüfen.
6. Baubericht schreiben: Ergebnis, Teilesatz, Lücken, was nicht geprüft ist.

Maschinendateien von außen kommen in einen Eingangsordner und laufen denselben Weg. Die Konstruktionsdateien bleiben betriebsintern, bis ein Baustein gedruckt und gemessen ist; ob und wann sie mit der Werkstatt hinausgehen, entscheidet der Inhaber.

Beispiel	Ketten	Antriebe	Druckteile voll gedruckt
Kurzer Finger	1	1	rund 38 g, dazu Platte
Zwei Finger	2	2	rund 89 g, dazu Platte
Fächer mit drei Fingern	3	3	rund 134 g, dazu Platte rund 22 g
Greifer mit drei Fingern	3	3	rund 114 g
Gliederarm mit fünf Gelenken	1	2	rund 60 g, dazu Platte

Trägerplatte. Stehen alle Ketten flach nebeneinander (Standardlinie, keine Neigung, keine Rolle, Beugung nach unten, Ansatz auf gleicher Höhe), erzeugt die Baukette eine Platte über den Füßen: je Fuß ein Sitz mit zwei Senkbohrungen M3 und dahinter eine Bohrung M4 zur Befestigung, zwischen benachbarten Sitzen ein Steg. Geprüft wird, dass jede Bohrung frei ist und über dem Gewindeeinsatz des Fußes sitzt und dass die Platte in keiner der drei Stellungen an ein Glied stößt. Für den Greifer mit drei Fingern, dessen Finger aufrecht stehen, gibt es keine Platte; dort bleibt der Körper eigene Konstruktion. Die Schnittstelle zum Fuß ist im Modulkatalog bemaßt.

Greifer mit drei Fingern: Teilesatz aus der Standardlinie, Gelenke bei 30 % ihrer Grenzen

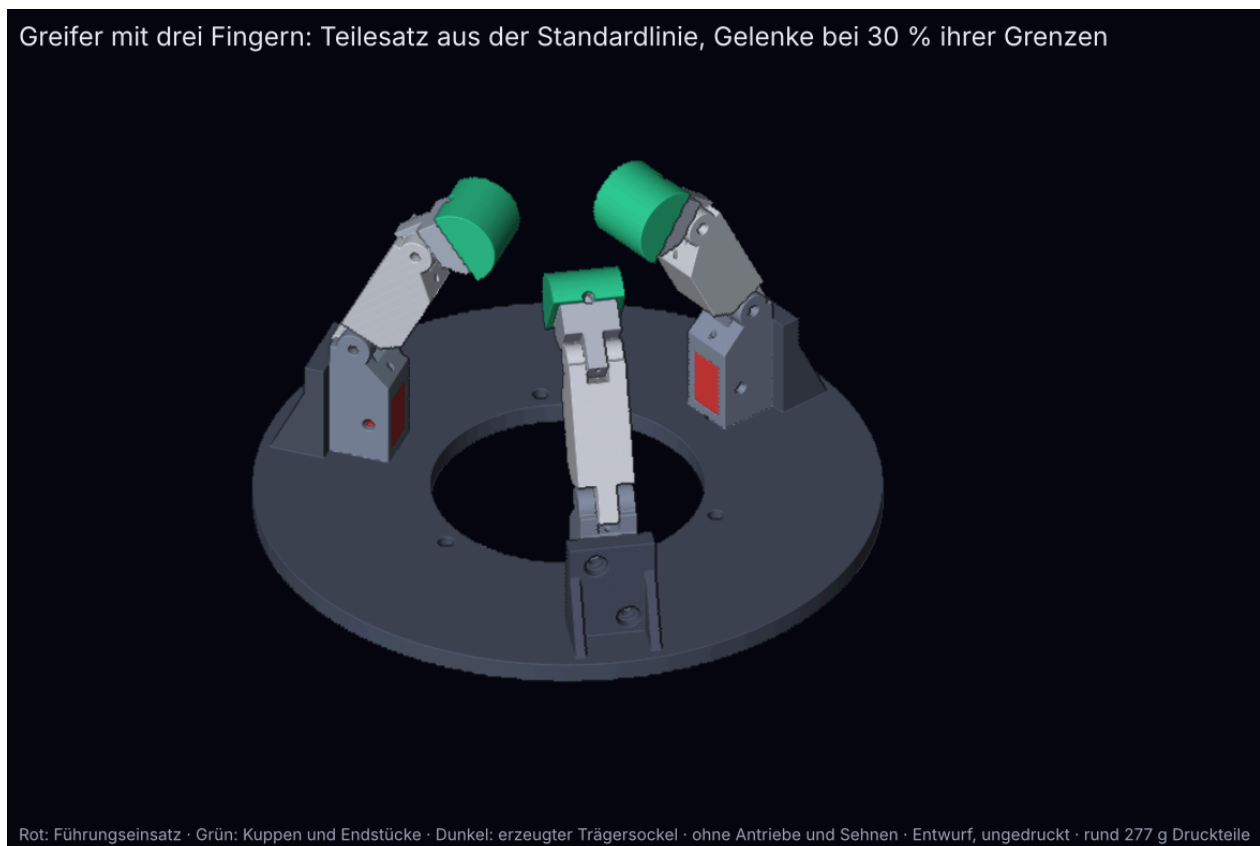


Bild 2: Greifer mit drei Fingern, gerechnet aus dem Teilesatz, Gelenke bei 30 Prozent ihrer Grenzen. Ohne Körper, Antriebe und Sehnen.

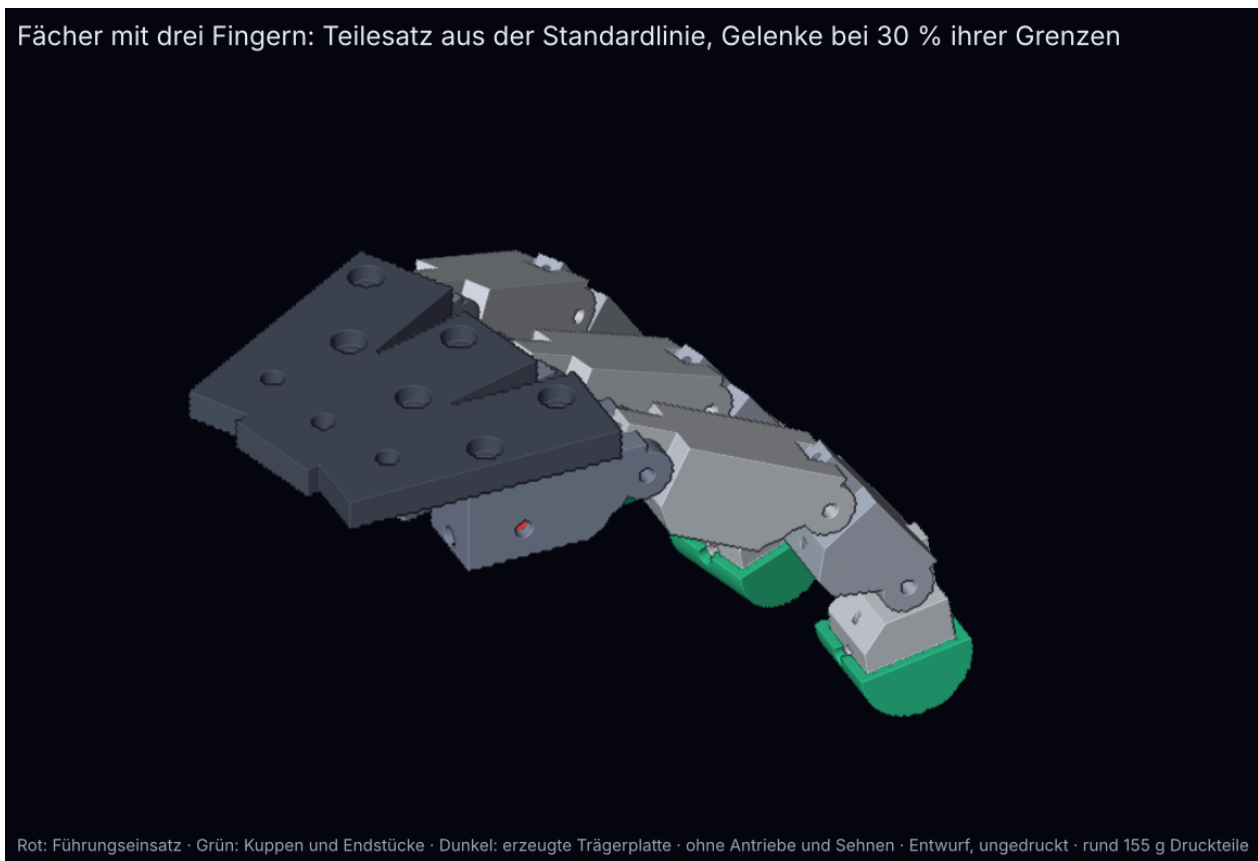
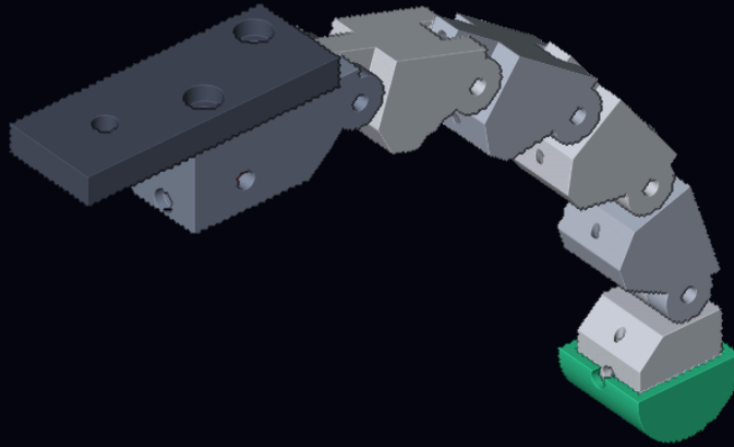


Bild 3: Fächer mit drei Fingern und der dafür erzeugten Trägerplatte.

Gliederarm mit fünf Gelenken: Teilesatz aus der Standardlinie, Gelenke bei 30 % ihrer Grenzen



Rot: Führungseinsatz · Grün: Kuppen und Endstücke · Dunkel: erzeugte Trägerplatte · ohne Antriebe und Sehnen · Entwurf, ungedruckt · rund 68 g Druckteile

Bild 4: Gliederarm aus vier Gliedern mit Gabel von 26 mm und einem Endglied von 24 mm.

Beugerichtung. Die Beschreibung kennt für jede Kette eine Beugerichtung. Der gedruckte Finger beugt nur nach einer Seite; eine Kette mit umgekehrter Beugerichtung liegt im Zusammenbau deshalb um ihre Längsachse gewendet. Die Gelenkpunkte bleiben dieselben; die Baukette vergleicht sie mit dem Bewegungsprüfstand.

5. Zwei Befunde aus der Arbeit und was daraus wurde

Der Greifer stieß mit sich selbst zusammen. Im ersten Entwurf standen die drei Finger 45 mm aus der Mitte. Der Bewegungsprüfstand zeigte das Programm ohne Einwand, weil er Lagen rechnet und keine Körper. Die Bauteilerzeugung meldete bei 27 Grad an jedem Gelenk rund 150 mm³ Durchdringung je Fingerpaar: Die Kuppen trafen einander. Die Finger stehen jetzt 60 mm aus der Mitte. Der Befund zeigt die Grenze eines Werkzeugs, das nur Lagen rechnet: Was am Bildschirm läuft, kann am Teil anstoßen.

Seit v2.1 hat die Werkstatt deshalb eine Abstandsprüfung. Sie nimmt jedes Glied als Stab mit der Dicke seiner Kette und rechnet die kleinste Luft zwischen allen Gliedern, die nicht aneinander anschließen: in Ruhelage, an 240 Zeitpunkten des geladenen Programms und mit allen Antrieben zugleich am oberen Ende. Den ersten Entwurf des Greifers meldet sie mit 3 mm Überschneidung bei 27 Grad. Das ist eine grobe Prüfung: Kuppen, Füße und Körper kennt sie nicht, und zwischen den Zeitpunkten sieht sie nichts. Die Bauteilerzeugung prüft weiter an den wirklichen Körpern, jetzt in drei Stellungen. Die Baukette vergleicht beide: Wo die Bauteilerzeugung keine Durchdringung findet, darf auch die Werkstatt keine melden.

Die Seite war am Telefon zu breit. Der Testlauf im Browser meldete bei 360 Bildpunkten Breite eine Seite von 365 Bildpunkten; die Tabelle des Teilesatzes ragte hinaus. Sie läuft jetzt in einem eigenen Rahmen.

6. Prüfung

Prüfung	Umfang
Beschreibungen	sieben Maschinen und sechs Beispiele von zwei unabhängigen Prüfungen ohne Mangel; 57 verstellte Fassungen von beiden zurückgewiesen
Dateien	jede Maschine gespeichert, wieder geladen, gleich
URDF	Ausgabe der Werkstatt Zeichen für Zeichen gleich der Ausgabe der Baukette, für alle sieben Maschinen
Teilesatz	Werkstatt und Bauteilerzeugung nennen dieselben Bausteine, Längen und Mengen; Masse auf 0,5 g gleich
Gelenkpunkte	Zwilling der Bauteilerzeugung gegen den Bewegungsprüfstand, fünf Beispiele in bis zu drei Stellungen, auf 0,001 mm
Abstand	Gegenprobe mit dem zu engen Greifer schlägt an; in den geprüften Stellungen der Beispiele meldet die Werkstatt nichts
Trägerplatte	zweite Lesung, Bohrungen frei und über den Gewindeeinsätzen, keine Durchdringung mit den Ketten
Bausteine	24 Gelenkpaarungen über sechs Längen; Masse über die Länge geradlinig
Übungen	sechs Musterlösungen erfüllen, sechs Ausgangslagen nicht
Bedienung	vierzehn von sechzehn Testfällen fährt die Baukette selbst im Browser, darunter die Bedienung nur mit der Tastatur; zwei sind von Hand zu prüfen

Die zwei händischen Testfälle sind Firefox und Safari sowie die Übergabe eines Teilesatzes an die Fertigung.

7. Testbetrieb

Der Testbetrieb soll klären, ob Menschen mit unterschiedlichem Vorwissen mit der Werkstatt eine eigene Maschine entwerfen, bewegen und weitergeben können, und wo sie hängen bleiben.

Vorbereitet sind:

- vier Aufgabenblätter, je Arbeitsweise eines, mit 3 bis 5 Schritten und einer Richtzeit von 20 bis 60 Minuten,
- ein Rückmeldebogen ohne Angaben zur Person,
- ein interner Plan mit vier Phasen über vier Wochen, Kriterien für Erfolg und Abbruch und 16 Testfällen,
- der Eingangsordner und die Bauteilerzeugung für Maschinen, die gefertigt werden sollen.

Nicht vorbereitet ist der Ort: Die Werkstatt ist nicht hochgeladen. Sie läuft aus einem Ordner; für einen geschlossenen Test genügt es, den Ordner weiterzugeben.

Baukästen aus wenigen gleichen Modulen sind in der Robotik lange bekannt, von Systemen, die sich selbst umbauen (Yim u. a. 2007), bis zu offenen Bausätzen für die Lehre (Zykov u. a. 2007). Die Standardlinie ist bescheidener: ein passiver Baustein, der Antrieb sitzt abseits. Ob sie für mehr taugt als für Finger, zeigt erst ein gedruckter Gliederarm.

8. Grenzen

- Kein Baustein ist gedruckt. Der Längenbereich ist gerechnet, nicht erprobt.
- Die Werkstatt prüft keine Festigkeit, kein Gewicht am Gelenk und keine Standsicherheit. Zusammenstöße prüft sie nur grob, an Stäben statt an Körpern. Die Bauteilerzeugung prüft an den Körpern, aber nur in drei Stellungen.
- Eine Trägerplatte gibt es nur für flache Anordnungen; ihre Festigkeit ist nicht gerechnet. Sonst gehört der Körper zu keinem Teilesatz, ebenso wenig Halter für Schläuche und die Lage der Antriebseinheit.
- Die Kraft ist ein Richtwert mit unbelegtem Reibwert und einer angenommenen Biegung von 120 Grad.
- Für alles außerhalb der Standardlinie gibt es keine Bauteile: Drehsockel, Schubglied, Gelenk mit Antrieb am Gelenk, Endstücke.
- Die Werkstatt ist nur in Chromium geprüft. Die Sicherheitsprüfung der Webfassung ist nicht gelaufen.
- Die Übungen und Aufgabenblätter hat niemand außer dem Verfasser bearbeitet.

9. Nächste Schritte

1. Einen Gliederarm aus der Standardlinie drucken: vier Glieder von 26 mm, ein Endglied. Er prüft das kürzeste Glied mit Gabel, das der Prüffinger nicht enthält.
2. Die zwei händischen Testfälle abarbeiten.
3. Den internen Durchlauf des Testbetriebs machen; danach entscheiden, wer eingeladen wird.
4. Den Fächer mit seiner Trägerplatte drucken; er prüft die Platte, die Stege und das Lochbild an drei Füßen.

10. Literatur

- Papert, S. (1980): Mindstorms. Children, Computers, and Powerful Ideas. Basic Books, New York.
- Resnick, M.; Silverman, B. (2005): Some reflections on designing construction kits for kids. Proceedings of the 2005 Conference on Interaction Design and Children. Titel und Verfasser per Suche bestätigt; Seitenangaben am Original zu prüfen.
- Yim, M.; Shen, W.-M.; Salemi, B.; Rus, D.; Moll, M.; Lipson, H.; Klavins, E.; Chirikjian, G. S. (2007): Modular self-reconfigurable robot systems: challenges and opportunities for the future. IEEE Robotics & Automation Magazine 14 (1). Titel und Verfasser per Suche bestätigt; Seitenangaben am Original zu prüfen.
- Zykov, V.; Chan, A.; Lipson, H. (2007): Molecubes: an open-source modular robotics kit. Beitrag zu einem Workshop der IROS 2007. Titel per Suche bestätigt; Verfasserreihe und Fundstelle am Original zu prüfen.

- Eigene Papiere dieses Pakets: FP02 (Rechenmodell), FP05 (Prüffinger), FP06 (Vom Finger zum Baukasten), FP07 und FP08 (Hand, Antrieb, Steuerung), FP09 (URDF), FP10 (Auslegung).