

Shape Memory Structures:
Automatisierter Entwurf von unteraktuierten additiv gefertigten
schlangenähnlichen Festkörpergelenkstrukturen

Simon Schiele

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der
Technischen Universität München zur Erlangung eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh

Prüfer*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth
2. Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Die Dissertation wurde am 22.03.2023 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 29.09.2023
angenommen.

Vorwort

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik (MiMed) unter dem Ordinarius Prof. Dr. rer. nat. Dipl.-Ing. Tim C. Lüth an der Technischen Universität München (TUM).

Ich möchte mich bei meinem Doktorvater Prof. Tim C. Lüth für die Betreuung meiner Arbeit und die Unterstützung, Förderung und Kritik während meiner Zeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl bedanken. Des Weiteren danke ich der Prüfungskommission für die Begutachtung und Prüfung meiner Arbeit.

Weiter möchte ich herzlich meinem Mentor Dr. Franz Irlinger und Frau Renate Heuser danken, mit deren Hilfe ich die kleinen und großen Herausforderungen des Lehrstuhllalltags meistern konnte. Auch den Mitarbeitern aus der Werkstatt vor allem Gerhard Ribnitzky und Markus Wörl möchte ich besonders danken.

Diese Arbeit entstand in reger Zusammenarbeit mit verschiedenen Kollegen und Studierenden, ohne deren Unterstützung die Umsetzung nicht möglich gewesen wäre. Ich möchte mich bei allen meinen Kollegen des Lehrstuhls herzlich für die Unterstützung, den Wissensaustausch und die fachlichen Diskussionen bedanken. Ein besonderer Dank geht dabei an Yannick Krieger, Samuel Detzel, Christian Dietz, Konstantin Strübig, Simon Laudahn, Christoph Rehekampff und Markus Huber. Außerdem möchte ich mich besonders bei Henry Phalen für die internationale Zusammenarbeit bedanken. Während der Zeit am Lehrstuhl durfte ich verschiedene studentische Arbeiten betreuen, die zu der Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben. Ich danke Julian Kulozik, Sebastian Baumgartner, Laurin Schweigert, Maude Furmann, Isabella Ostner und Daniel Seikowsky für die studentischen Arbeiten, die in diese Arbeit eingeflossen sind.

Am meisten aber danke ich meiner Frau Hannah und meinen Kindern, die diese arbeitsintensive Zeit mit mir durchgestanden haben.

München, 15.03.2023

Simon Schiele

Kurzfassung

Die Interaktion von Robotern mit Menschen und komplexen Umgebungen motiviert die Entwicklung von Robotersystemen aus nachgiebigen Strukturen. Dabei ermöglichen additive Fertigungsverfahren die schnelle und kostengünstige Erstellung neuer und individualisierbarer Robotersysteme und Mechanismen. Aufbauend auf vorherigen Arbeiten wird im Rahmen dieser Arbeit die Entwicklung monolithischer schlangenähnlicher unteraktuierter Roboterstrukturen, deren automatisierte Entwurfsprozesse und deren additive Fertigung beschrieben. Diese Strukturen werden als Formgedächtnisstrukturen (*Shape Memory Structures*) bezeichnet, da sich die Strukturen mit nur einem Aktuierungsfreiheitsgrad in eine komplexe vordefinierte Form auslenken lassen. Die zunächst flexiblen Strukturen bestehen aus einer seriellen Kette von steifen Elementen und nachgiebigen Festkörpergelenken und werden über Seilzüge mit Hilfe weniger Aktoren in vorgegebene Posen ausgelenkt und versteift. Die Strukturen können bei sich wiederholenden Aufgaben oder in Umgebungen nützlich sein, bei denen ein einfacher Aufbau und eine einfache Steuerung wichtiger ist, als die Vielseitigkeit eines herkömmlichen Robotersystems.

The interaction of robots with humans and complex environments motivates the development of robotic systems made of compliant structures. In this context, additive manufacturing processes enable the rapid and economical development of new and individualized robotic systems and mechanisms. Based on previous research, this thesis describes the development of monolithic snake-like underactuated robotic structures, their automated design processes and their additive manufacturing. The structures are referred to as Shape Memory Structures, as these flexible structures can be deflected into a complex predefined shape with only one actuation degree of freedom. These additively manufactured flexible structures, which consist of a serial chain of stiff elements and flexure joints, are deflected into predefined poses via cable pulls using only few actuators and stiffened in these poses. The structures can be useful in repetitive tasks or environments where the simplicity of setup and control is more important than the versatility of a conventional robotic system.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	II
Kurzfassung	III
Inhaltsverzeichnis.....	IV
1. Motivation und Problemstellung.....	7
2. Stand der Technik.....	10
2.1 Kontinuumsrobotik	10
2.1.1 Kategorisierung.....	11
2.1.2 Roboterkinematik – Eine kurze Einführung.....	13
2.1.3 Piecewise-Constant-Curvature-Modell	16
2.2 Nachgiebige Mechanismen und Festkörpergelenke.....	17
2.3 Additive Fertigungsverfahren mit Kunststoffen	19
2.3.1 Für diese Arbeit relevante additive Fertigungsverfahren	20
2.3.2 Additive Fertigung von Kontinuumsrobotern und nachgiebigen Mechanismen	22
2.4 Codebasierte und automatisierte Konstruktion	23
2.4.1 3D-Modelle in der Mechanikkonstruktion.....	23
2.4.2 Codebasierte Erzeugung von 3D-Modellen.....	25
2.4.3 Automatisierter Entwurf von Robotern und (nachgiebigen) Mechanismen	26
2.5 Stand der Forschung am Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik ..	27
2.5.1 Konstruktion mit der SG-Library.....	27
2.5.2 Roboter- und Mechanismenentwurf mit nachgiebigen Strukturen	29
2.5.3 Formgedächtnisstrukturen (Shape Memory Structures).....	30
3. Kritik am Stand der Technik.....	33
4. Eigener Ansatz	35
4.1 Aufgabenstellung	35
4.2 Erwartete Vorteile	36
4.3 Einordnung und Abgrenzung	37
5. Konzept und Systementwurf	38
5.1 Grundlegendes Funktionsprinzip	38
5.2 Parameter und Nomenklatur zur Beschreibung der Strukturen	39
5.3 Lösungsstruktur.....	42
5.3.1 Mechanische Konzepte/Typen der Mehrposen-Formgedächtnisstrukturen	42
5.3.2 Festkörpergelenke	50
5.3.3 Kontaktstrukturen	51
5.3.4 Seilzugführungen	54
5.4 Lösungsprozess	58

6. Beschreibung der Kinematik der Strukturen	60
6.1 Beschreibung der direkten Kinematik.....	60
6.1.1 Verkettung der Elemente – Pseudo-Rigid-Body-Modell.....	61
6.1.2 Verkettung der Segmente – Piecewise-Constant-Curvature-Modell.....	63
6.2 Strategien zur Berechnung von Strukturen mit mehreren Endeffektorendposen....	65
6.2.1 Modellierung über eine Ersatzkinematik.....	65
6.2.2 Berechnung weiterer Konfigurationen basierend auf bestehender Struktur	68
6.2.3 Optimierungsbasierte Methode zur Berechnung weiterer Konfigurationen	70
7. Realisierung am Beispiel erster Funktionsmuster	75
8. Modellierung des Bewegungsverhaltens.....	77
8.1 Quasistatisches Modell der Strukturen.....	77
8.2 Anpassen des Endeffektorpfads	83
9. Implementierung mit der SG-Library.....	89
10. Herstellung der Formgedächtnisstrukturen	92
10.1 SLS-Verfahren	92
10.1.1 Auslegung der Strukturen	93
10.1.2 Herstellungsprozess und Nachbearbeitung	94
10.2 Desktop-Drucker im Niedrigpreissegment	94
10.2.1 Auslegung der Strukturen	94
10.2.2 Herstellungsprozess und Nachbearbeitung	97
10.3 Verbindungselemente.....	98
10.4 Verwendete Seilzüge.....	99
11. Anwendungsbeispiele	101
11.1 Kriechroboter	101
11.2 Pick-and-Place-System.....	106
12. Experimente	108
12.1 Bestimmung der Genauigkeit der Endeffektorendposen	108
12.2 Validierung des quasistatischen Modells	111
12.3 Evaluierung der Steifigkeiten von SLS-gefertigten Festkörpergelenken.....	117
13. Zusammenfassung	120
14. Ausblick	122
14.1 Alternative Konzepte automatisiert konstruierter aufgabenspezifischer <i>Low-Cost</i> -Mechanismen.....	123
Literaturverzeichnis.....	126
Abkürzungsverzeichnis.....	133
Notation und Symbolverzeichnis	135
Entstandene Publikationen.....	138

Beteiligte Personen und entstandene Studienarbeiten.....	139
Anhang	141
A MATLAB Software	142
A.1 Eingabeparameter.....	142
A.2 Die wichtigsten Funktionen	147
A.3 Aufbau der FG-Struktur	148
B Werte der Versuchsergebnisse	150
B.1 Experiment 1 - Bestimmung der Genauigkeit der Endeffektorendposen	150
B.2 Experiment 2 - Validierung des quasistatischen Modells.....	150
B.3 Experiment 3 - Evaluierung der Steifigkeiten von SLS-gefertigten Festkörpergelenken	152

1. Motivation und Problemstellung

Die Robotik ist im menschlichen Alltag bisher nur sehr eingeschränkt angekommen. Zwar werden in vielen Bereichen der Automatisierung in der Industrie Aufgaben von Robotern übernommen, jedoch ist ihr Einsatz durch den hohen Preis, die komplexe Bedienung und die Gefahren für den Menschen, die von den Robotern ausgehen, noch stark auf eben diese Industrieanwendungen beschränkt. Bei der Entwicklung neuartiger robotischer Systeme müssen diese begrenzenden Faktoren in Angriff genommen und die Grenzen aufgebrochen werden, um den Einsatz dieser Systeme in den vielen Lebensbereichen des Menschen zu realisieren. Nur so wird Robotik nicht mehr nur in Produktionsstätten von großen Unternehmen zu sehen sein, sondern auch in kleinen Unternehmen, handwerklichen Betrieben und Haushalten, wie das Beispiel des Staubsaugerroboters exemplarisch zeigt (Corke 2017).

In vielen Bereichen wird von Robotern verlangt, hochindividualisierte und spezifische Aufgaben zu erfüllen. Vor allem in der Medizintechnik werden individuelle Systeme für die patientenspezifische Anatomie und bestimmte Operationen gefordert. Auch in der Produktion sind auf Grund der steigenden Produktvielfalt und immer kürzeren Produktlebenszeit individuell anpassbare Systeme zur Bearbeitung und Handhabung von Teilen gefragt. Es wird dabei oft vergessen, dass für bestimmte, sich wiederholende Aufgaben kein Roboterarm mit vielen Freiheitsgraden benötigt wird, sondern ein auf die Aufgabe angepasster Mechanismus ebenso gut funktionieren kann. Während bei einem Roboter die Anschaffungskosten der hemmende Faktor sind, liegt die Schwierigkeit bei Mechanismen in der Synthese und der Herstellung der individuellen Mechaniken. Während ein Roboter neu programmiert wird, erfolgt bei dem Mechanismenentwurf die „Neuprogrammierung“ bei dem Entwurf desselben.

Die Realisierung aufgabenspezifischer und individualisierter Kinematiken erfordert einen hohen Auslegungs- und Konstruktionsaufwand, daher kann nur eine Automatisierung des Entwurfsprozesses zu einem wirtschaftlichen Einsatz dieser individuellen Strukturen führen. Für die Wirtschaftlichkeit dieser individuellen Systeme ist neben der automatisierten Konstruktion eine schnelle und kostengünstige Fertigung notwendig, was mit dem Einsatz von additiven Fertigungsverfahren (3D-Druckern) erreicht werden kann. Die Weiterentwicklung und Verbreitung dieser Verfahren ermöglichen die Herstellung von neuartigen Robotersystemen und Mechanismen und haben das Potential, durch die günstige Herstellung von Einzelstücken, die Robotik für die breite Masse zur Verfügung zu stellen. Es ist auf einmal möglich, individualisierte Produkte zu realisieren, deren Herstellung bisher aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht möglich war.

Neben der Kostenfrage ist die Interaktion mit dem Menschen eine große Herausforderung für die Robotik. In der konventionellen Robotik wird das Ziel, einen Manipulator möglichst genau in eine bestimmte Position zu bringen, normalerweise über ein möglichst steifes Design der Komponenten umgesetzt. Durch starre Armglieder und motorisierte Gelenke sollen unerwünschte Bewegungen und Schwingungen verhindert werden. Ein Blick auf die Mechanik von biologischen Systemen lässt aber schnell den Schluss zu, dass die meisten beweglichen Dinge in der Natur nicht steif, sondern flexibel sind. Die zunehmende Interaktion zwischen Robotern und Menschen motiviert den Entwurf von weichen Robotersystemen aus nachgiebigen Strukturen. Dieses Forschungsgebiet hat unter den Schlagworten „Kontinuumsrobotik“ und „Soft-Robotik“ in den letzten Jahren viel Aufmerksamkeit erhalten. Die Beobachtung der faszinierenden kinematischen Eigenschaften von Schlangen, Tentakeln oder Rüsseln haben die Entwicklung von einer Vielzahl an schlangenähnlichen hyperredundanten Robotern¹, Kontinuumsrobotern und Soft-Robotern inspiriert. Die Vorteile gegenüber klassischen Roboterarmen zeigen sich in den besseren Möglichkeiten zur Miniaturisierung, einem höheren Nutzlast-zu-Eigengewicht-Verhältnis, der ungefährlicheren Mensch-Maschine-Interaktion und in ihrer besseren Manövrierfähigkeit vor allem in schwer zugänglichen Umgebungen wie z.B. in Katastrophengebieten oder in der minimalinvasiven Chirurgie (Burgner-Kahrs *et al.* 2015).

Basierend auf den Erfahrungswerten des Lehrstuhls im Bereich von patientenindividuellen Manipulatorsystemen für die Chirurgie wurden durch Krieger, Schiele *et al.* (2019) mit den sogenannten Formgedächtnisstrukturen (oder *Shape Memory Structures*) eine Möglichkeit zur Erzeugung von kostengünstigen und automatisiert entworfenen Manipulatoren und Strukturen für bestimmte Aufgaben vorgestellt. Diese robotischen Systeme sind flexible schlangenähnliche Festkörpergelenkstrukturen, die über einen Seilzug in eine bestimmte vordefinierte Pose versteift werden können. Die zu erschließenden Anwendungsgebiete sind in Abb. 1 schematisch dargestellt. Die Strukturen zielen zum einen auf den Einsatz in schwer erreichbaren Hohlräumen ab z.B. als Endoskop- und Instrumentenführungen in der minimalinvasiven Chirurgie. Weitere Einsatzgebiete stellen formspezifische Greifer, *Pick-and-Place*-Anwendungen oder mobile robotische Systeme in Form von Kriechrobotern dar. Obwohl es schon möglich ist mit Hilfe des bereitgestellten automatisierten Entwurfsprozesses Formgedächtnismechanismen zu entwerfen, die eine einzelne vorgegebene Pose erreichen können, muss dabei die Form der gesamten Struktur vom Benutzer der Software mit einer Raumkurve spezifiziert werden und es kann pro Struktur nur eine einzelne Pose vorgegeben

¹ als hyperredundant werden Roboter mit sehr viel mehr Gelenken als Antrieben bezeichnet

werden. Diese Arbeit baut auf diesen Vorarbeiten auf und beschreibt die Erweiterungen der Funktionalitäten der Software für die automatisierte Konstruktion der Strukturen, mit dem Ziel, dem realen Einsatz dieser Strukturen einen Schritt näher zu kommen.

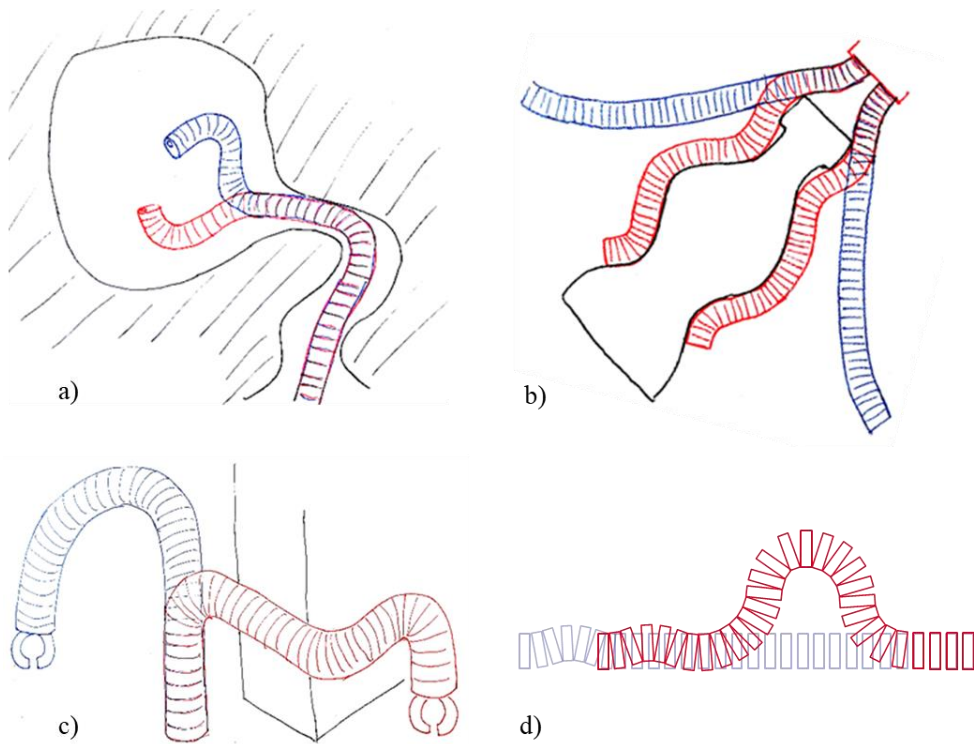


Abb. 1: Schematische Darstellung der Anwendungsgebiete der Formgedächtnisstrukturen: (a) Einsatz in schwer erreichbaren Lumen z.B. Endoskop- und Instrumentenführungen in der minimalinvasiven Chirurgie, (b) formspezifische Greifer, (c) *Pick-and-Place*-Systeme, d) Bewegungsapparat eines Kriechroboters

2. Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik der Kontinuumsrobotik, von nachgiebigen Mechanismen und der additiven Fertigung solcher Systeme zusammengefasst. Anschließend wird auf die codebasierte und automatisierte Konstruktion eingegangen. Es folgt eine Zusammenfassung des Stands der Forschung am Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik zu den genannten Themen. Zu guter Letzt werden die Vorarbeiten zu den Formgedächtnisstrukturen zusammengefasst.

2.1 Kontinuumsrobotik

Die Kontinuumsrobotik entstand aus der Idee, schlangen-, wurm- oder tentakelförmige Roboter zu bauen. Dabei ist es das Ziel, durch die große Bewegungsfreiheit eine gute Anpassung an die Umgebung zu erreichen, was im Bereich von schwer zugänglichen, unbekanntem oder empfindlichen Umgebungen von großem Vorteil ist. An den ersten schlangenähnlichen Robotern wurde bereits in den 1960er Jahren geforscht (Anderson & Horn 1967). Hirose entwickelte als ein weiterer Pionier in diesem Bereich verschiedene Schlangenroboter, die er als *Active Chord Mechanisms* (ACM) bezeichnete (Hirose 1993). Erst in den 1990er und 2000er Jahren hat das Forschungsgebiet größere Aufmerksamkeit erhalten, zum ersten Mal von Robinson und Davies zusammengefasst (Robinson & Davies 1999). Mittlerweile gibt es eine Vielzahl an Forschungsgruppen die sich mit dem Aufbau und der Modellierung schlangenartiger Roboter auseinandersetzen und welche in verschiedenen Übersichtsarbeiten zusammen gefasst wurden (Trivedi *et al.* 2008; Webster & Jones 2010; Rus & Tolley 2015; Walker *et al.* 2016; Kolachalama & Lakshmanan 2020). Es werden mobile Systeme für die Navigation in bzw. die Erkundung von unbekanntem Umgebungen entwickelt, Systeme für Inspektionsarbeiten in schwer zugänglichen Umgebungen und Systeme, die in der direkten Interaktion mit Menschen stehen. Durch den Einsatz von Robotern mit einer hohen Anzahl an Gelenken oder von Robotern aus weichen Materialien mit einem geringen E-Modul soll die Verletzungsgefahr bei der Interaktion von Robotern mit Menschen minimiert werden.

Kinematisch redundante Roboter haben eine höhere (redundante Roboter) oder eine sehr viel höhere (hyperredundante Roboter) Anzahl an Gelenken oder Freiheitsgraden (*degrees of freedom* oder DOF) als Arbeitsraumfreiheitsgrade (Chirikjian 1992). Bei Kontinuumsrobotern oder Soft-Robotern gibt es keine diskreten Gelenke mehr, sondern die Auflösung der beweglichen Teile wird unendlich hoch, das heißt der Roboter besteht aus flexiblen Materialien oder nachgiebigen Strukturen, die gezielt verformt werden können. Durch die große

Bewegungsfreiheit und die Nachgiebigkeit können sich diese Systeme besser an die Struktur eines Objekts in der Umgebung anpassen, sei es zur Navigation um ein Hindernis oder für das Greifen eines Körpers. Besonders im chirurgischen Kontext sind Kontinuumsroboter durch ihre Nachgiebigkeit und die Möglichkeit zur Miniaturisierung interessant (Burgner-Kahrs *et al.* 2015; da Veiga *et al.* 2020). Die Nachgiebigkeit dieser Roboter bringt zwar einen Sicherheitsvorteil bei der Interaktion mit dem Menschen, führt jedoch auch zu einem höheren Modellierungs- und Regelungsaufwand, da nicht mehr nur Gelenkpositionen angefahren werden, sondern die gesamte Verbiegung der Roboterstrukturen beachtet werden muss.

2.1.1 Kategorisierung

Burgner-Kahrs beschreibt Kontinuumsroboter als aktuierbare Strukturen, die Formen mit stetigem Tangentenvektor einnehmen können (Burgner-Kahrs *et al.* 2015). Rus und Tolley definieren einen Soft-Roboter als System mit der Fähigkeit zum autonomen Handeln, das hauptsächlich aus Materialien mit einem E-Modul von $10^4 - 10^9 Pa$ besteht (Rus & Tolley 2015). Die Bezeichnungen Soft-Roboter und Kontinuumsroboter werden oft als Synonyme verwendet, obwohl Soft-Roboter eine Unterkategorie der Kontinuumsroboter darstellen. Kontinuumsroboter können auch aus steiferen Materialien aufgebaut sein, unter der Voraussetzung, dass die Form des Roboters eine stetige Raumkurve abbildet. Präferiert sind dabei Materialien mit einer hohen Dehngrenze, um auch bei höherer Materialsteifigkeit einen großen Arbeitsraum zu erreichen. Als Beispiel hierfür können die *Concentric Tube Robots* hergenommen werden, die aus Nitinol oder Kunststoffen hergestellt werden (Dupont *et al.* 2010; Gilbert *et al.* 2016). Dabei werden Röhren mit verschiedenen Krümmungen ineinandergeschoben und durch das relative Verschieben dieser Röhren verschiedene Konfigurationen erzeugt. Eine schematische Einordnung von Kontinuumsrobotern ist in Abb. 2 dargestellt (Robinson & Davies 1999; Trivedi *et al.* 2008).

Bei der Art des Aufbaus wird zwischen intrinsisch weichen und extrinsisch weichen Kontinuumsrobotern unterschieden. Als intrinsisch weich wird ein System bezeichnet, dessen Nachgiebigkeit durch die Materialeigenschaften bestimmt wird. Das heißt die gesamte Roboterstruktur verbiegt sich, um die Zielkonfiguration zu erreichen². Bei extrinsisch weichen Systemen sind nur Teile der Struktur nachgiebig, z.B. durch den Einsatz von Federn oder Festkörpergelenken. Hier erfolgt die Biegung nur an den Stellen der nachgiebigen Strukturen. Je nach Aufbau der verwendeten nachgiebigen Strukturen sind extrinsisch weiche Systeme

²Nicht zu verwechseln mit der intrinsischen Nachgiebigkeit der Gelenke von steifen Robotern, deren Steifigkeiten aktiv eingestellt werden können (Albu-Schäffer *et al.* 2011).

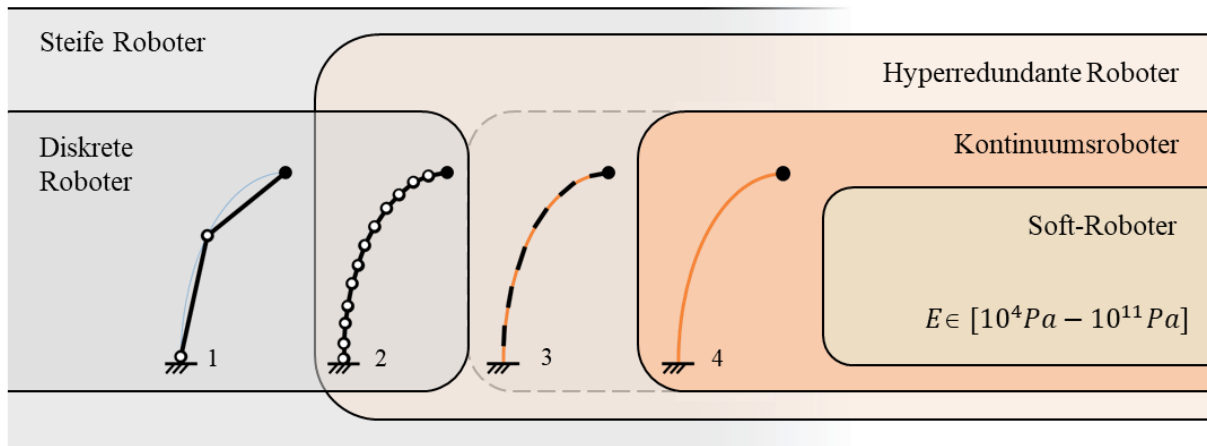


Abb. 2: Kategorisierung von Robotern nach Materialien und Freiheitsgraden (angelehnt an Robinson & Davies 1999 und Trivedi *et al.* 2008). (1) Roboter mit diskreten Gelenken, (2) Roboter mit mehr Gelenken als Arbeitsraumfreiheitsgraden (hyperredundant), (3) Hyperredundante extrinsisch weiche Roboter mit Festkörpergelenken, (4) Intrinsic weiche Kontinuumsroboter mit der Unterkategorie Soft-Roboter.

keine „echten“ Kontinuumsroboter, haben aber Strukturteile, die sich wie Kontinuumsroboter verhalten. (Paik 2015; Wallin *et al.* 2018)

Auch bei der Ansteuerung von Kontinuumsrobotern wird in intrinsische und extrinsische Systeme unterteilt (Robinson & Davies 1999). Bei einer intrinsischen Ansteuerung ist die Aktuierung im Inneren des Roboter(arm)s verortet. Das ist üblicherweise bei pneumatisch oder hydraulisch angesteuerten Systemen der Fall, das heißt das System besteht aus gas- oder flüssigkeitsgefüllten Kammern, die durch eine Druckveränderung verlängert oder gebogen werden. Auch Systeme aus Formgedächtnislegierungen (*Shape Memory Alloys*, SMA) oder Systeme mit künstlichen Muskeln fallen in diese Kategorie. Bei einer extrinsischen Ansteuerung sitzt die Ansteuerungseinheit außerhalb des Roboters und die Kräfte werden über Seilzüge oder andere mechanische Kopplungen in die Struktur übertragen. Um Manipulatoren mit kleinem Durchmesser zu erhalten und damit in schwer erreichbaren und engen Umgebungen zu arbeiten, sind extrinsische Systeme von Vorteil, da so die Aktuierungseinheiten aus dem Manipulator des Roboters in die Peripherie verlagert werden. Natürlich gibt es bei dieser Kategorisierung der Art des Aufbaus und Ansteuerung auch hybride Systeme, die diese Konzepte vermischen und sich nicht eindeutig einer Kategorie zuordnen lassen. Auch die ansteuerbaren Arbeitsraumfreiheitsgrade unterscheiden sich je nach System stark, so kann z.B. ein Endoskop mit steuerbarer Spitze auch als Kontinuumsroboter mit einem einzigen Ansteuerungsfreiheitsgrad betrachtet werden. (Robinson & Davies 1999; Burgner-Kahrs *et al.* 2015; Walker *et al.* 2016)

2.1.2 Roboterkinematik – Eine kurze Einführung

Bevor die Beschreibung der Kinematik von Kontinuumsrobotern erfolgt, soll hier eine kurze Einführung in die grundlegenden Prinzipien der Roboterkinematik gegeben werden. Mit der Roboterkinematik wird die Bewegung eines Roboters beschrieben, ohne die wirkenden Kräfte und Momente zu beachten. Klassischerweise besteht ein serieller Roboterarm aus einer Verkettung von steifen Armgliedern, die über rotatorische oder translatorische Gelenke verbunden sind. Das eine Ende dieser seriellen kinematischen Kette ist fest mit der Umgebung verbunden, während am anderen Ende der Endeffektor des Roboters mit einem Werkzeug oder einem Greifer angebracht ist. Ein einfaches Beispiel für eine solche Roboterkinematik mit drei Gelenken ist in Abb. 3.a dargestellt. Eine Möglichkeit, um Roboterbewegungen mathematisch zu beschreiben, besteht darin, alle Armglieder mit körpereigenen Koordinatensystemen zu versehen und als Bezugssystem ein Weltkoordinatensystem w zu definieren (s. Abb. 3.b).

Eine anschauliche Beschreibung der Koordinatensysteme und der Transformationen zwischen den Koordinatensystemen kann mit homogenen Transformationsmatrizen erfolgen. In der homogenen Transformationsmatrix \mathbf{T} werden die Translationen und Rotationen in alle drei Raumrichtungen mit dem Translationsvektor \mathbf{t} und der Rotationsmatrix \mathbf{R} zusammengefasst. Die Transformationsmatrix von Koordinatensystem 1 zu Koordinatensystem 2 lässt sich damit wie folgt beschreiben:

$${}^2\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} {}^2\mathbf{R}_1 & {}^2\mathbf{t}_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Die Rotationsmatrix ${}^2\mathbf{R}_1$ beschreibt die Orientierung von Koordinatensystem 1 dargestellt in Koordinatensystem 2 und ${}^2\mathbf{t}_1$ den Translationsvektor des Ursprungs von Koordinatensystem 2 zu dem Ursprung von Koordinatensystem 1. Die Transformation von Vektor ${}^1\mathbf{p}$ (Punkt p dargestellt im Koordinatensystem 1) zu Vektor ${}^2\mathbf{p}$ (Punkt p dargestellt im Koordinatensystem 2) erfolgt dann mit folgender Formel:

$$\begin{bmatrix} {}^2\mathbf{p} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^2\mathbf{T}_1 \cdot \begin{bmatrix} {}^1\mathbf{p} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Zur Vereinfachung der Nomenklatur wird der Index des Weltkoordinatensystems im Folgenden weggelassen, das heißt \mathbf{T}_x liest sich als ${}^w\mathbf{T}_x$. Die homogenen Transformationsmatrizen beschreiben also die Posen der Gelenkglieder im Raum und können für Koordinatentransformationen zwischen den Gliedern verwendet werden (s. Abb. 3.c).

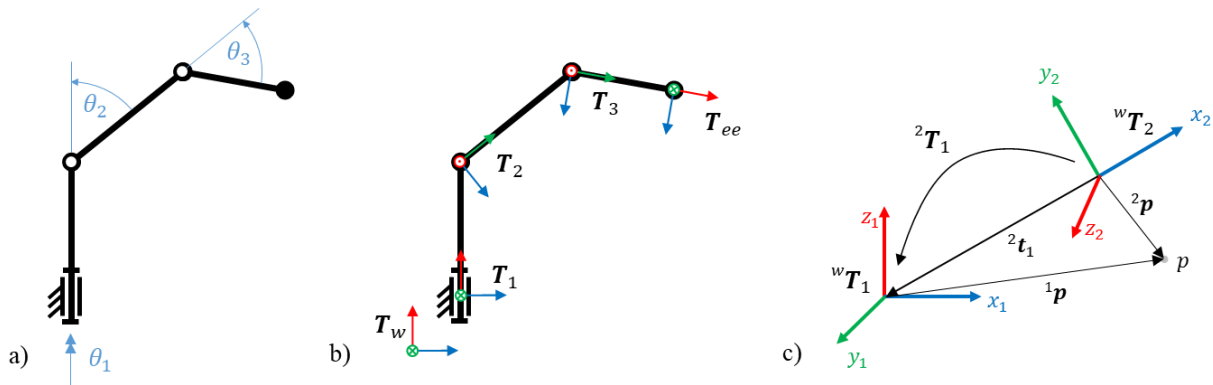


Abb. 3: a) Beispiel einer Roboterkinematik mit drei Armgliedern und drei Drehgelenken mit den Drehwinkeln $\theta_1, \theta_2, \theta_3$. b) Roboterkinematik mit körperfesten Koordinatensystemen T_{1-3} an den Robotergliedern, Weltkoordinatensystem T_w und Endeffektorkoordinatensystem T_{ee} . c) Koordinaten(system)transformation mit homogenen Transformationsmatrizen.

Die Umrechnung der Gelenkwinkel eines Roboters in die Pose des Endeffektors und die umgekehrte Berechnung der Gelenkwinkel aus der Endeffektorpose geschieht über die Berechnung der Vorwärtskinematik (direkte Kinematik) und der Rückwärtskinematik (inverse Kinematik). Bei der Vorwärtskinematik wird die Endeffektorpose T_{ee} in Abhängigkeit der Gelenkwinkel $\theta = [\theta_1 \ \dots \ \theta_n]$ beschrieben. Das heißt bei bekannten Gelenkwinkeln kann die Position und Orientierung des Endeffektors (Endeffektorpose) berechnet werden:

$$T_{ee} = f(\theta) \tag{2.3}$$

Durch eine Verkettung der homogenen Transformationsmatrizen lässt sich die Vorwärtskinematik berechnen. Für das Beispiel aus Abb. 3 sieht diese Verkettung folgendermaßen aus:

$$T_{ee} = f(\theta) = {}^wT_1(\theta_1) \cdot {}^1T_2(\theta_2) \cdot {}^2T_3(\theta_3) \cdot {}^3T_{ee} \tag{2.4}$$

Die Berechnung der Vorwärtskinematik ist für serielle Gelenkketten mit Drehgelenken einfach durchführbar und hat eine eindeutige Lösung. Bei diesen Kinematiken gibt es bei bekannten Gelenkwinkeln daher immer eine eindeutige zugehörige Endeffektorpose.

Oftmals liegt in der Praxis aber ein anderes Problem vor: Wie können bei einem Roboterarm (einer seriellen Gelenkkette) die Gelenkwinkel aus einer vorgegebenen Endeffektorpose bestimmt werden? Soll z.B. eine gegebene Trajektorie abgefahren werden, müssen für jeden kartesischen Punkt auf dieser Trajektorie die passenden Gelenkwinkel bestimmt werden. Sollen aus einer gegebenen Endeffektorpose die Gelenkwinkel berechnet werden, ergibt sich durch die Invertierung von Formel (2.3):

$$\boldsymbol{\theta} = f^{-1}(\mathbf{T}_{ee}) \quad (2.5)$$

Die Berechnung dieses Problems kann auf zwei verschiedene Arten durchgeführt werden. Die erste Möglichkeit ist die Bestimmung der analytischen Lösung der Rückwärtskinematik mit algebraischen oder geometrischen Ansätzen (*closed-form solution*). Diese Invertierung der Vorwärtskinematik kann je nach Kinematik schnell sehr aufwendig werden, da das zu lösende Gleichungssystem hochgradig nichtlinear ist. Für die üblichen in der Industrie eingesetzten Roboterkinematiken sind die analytischen Lösungen jedoch bekannt (Murray *et al.* 2017). Wenn eine analytische Lösung vorliegt, führt die Berechnung des Gleichungssystems zu mehreren Ergebnissen, da bei einer Gelenkkette die Endeffektorpose mit verschiedenen Gelenkkonfigurationen erreicht werden kann. Für einen seriellen Roboter mit sechs Drehachsen kann es bei einer gegebenen Endeffektorpose schon 16 Lösungen für die Gelenkwinkel geben. Allerdings gibt es für bestimmte Kinematiken keine analytische Lösung (Corke 2017), bei redundanten Robotern gibt es unendlich viele Lösungen (Murray *et al.* 2017) und ändert sich die Kinematik des Roboters – wie z.B. bei modularen Systemen – ist die aufwändige Suche nach einer analytischen Lösung der Rückwärtskinematik nicht sinnvoll (Yang & Chen 2022).

Eine weitere Möglichkeit um eine Lösung für das Problems aus (2.5) zu finden ist die Verwendung von numerischen Solvern. Hier wird das folgende Optimierungsproblem numerisch gelöst:

$$\mathbf{e} = \min_{\boldsymbol{\theta}} |f(\boldsymbol{\theta}) - \mathbf{T}_{ee}| \quad (2.6)$$

Dabei wird versucht den Fehler \mathbf{e} zwischen Vorwärtskinematik $f(\boldsymbol{\theta})$ und der gewünschten Endeffektorpose \mathbf{T}_{ee} zu minimieren. Das Problem der numerischen Solver ist, dass zum einen nur eine Lösung der verschiedenen Lösungsmöglichkeiten gefunden wird und zum anderen keine explizite Kontrolle gegeben ist, welche der verschiedenen Lösungsmöglichkeiten gefunden wird, also welche Armkonfiguration bei der gefundenen Lösung vorliegt. Es kann nur über den Startwert des Optimierungsproblems implizit beeinflusst werden, welche der Lösungen des Problems gefunden werden (Corke 2017).

Es gibt in der Robotik verschiedene Ansätze die Beschreibung der Kinematik zu standardisieren und zu vereinfachen. Die Denavit-Hartenberg (DH) Transformation ist eine weit verbreitete Methode, um die Anbringung der lokalen Koordinatensysteme an die Armglieder zu systematisieren und damit das Gleichungssystem der Vorwärtskinematik zu vereinfachen. Dabei werden die körperfesten Koordinatensysteme der Armglieder nach den Denavit-Hartenberg Konventionen festgelegt, welche gewisse Einschränkungen bei der Platzierung der

Koordinatensysteme vorgeben. Es reichen dann vier statt sechs Parameter zur Beschreibung der Transformation zwischen zwei Armgliedern (Denavit & Hartenberg 1955; Craig 2005). Statt die Roboterkinematik mit lokalen Koordinatensystemen zu beschreiben, kann diese auch mit Exponentialkoordinaten (*product of exponentials*) erfolgen (Brockett 1984). Hier werden zunächst nur zwei Koordinatensysteme definiert, das Welt- und das Endeffektorkoordinatensystem. Die einzelnen Gelenke werden mit Schrauben erster Art (*twists*) beschrieben, welche zum einen aus dem Vektor der Drehachse ω bestehen und zum anderen einem Geschwindigkeitsvektor v , der die Geschwindigkeit des Ursprungs relativ zur betrachteten Achse beschreibt. Mit dieser Beschreibung werden die einzelnen Gelenkbewegungen als Schraubbewegungen definiert und es ist keine Definition der Koordinatensysteme an den Gliedern nötig. Die Berechnung kann dann direkt über die Verkettung der Exponentialkoordinaten erfolgen. Für eine weiterführende Beschreibung der Kinematik von Robotern wird hier auf Craig (2005), Corke (2017), Murray *et al.* (2017) und Mareczek (2020) verwiesen.

2.1.3 *Piecewise-Constant-Curvature-Modell*

Im Gegensatz zu konventionellen Robotern mit diskreten Gelenken und steifen Verbindungselementen, bei denen die Pose des Roboters zu jedem Zeitpunkt durch die Auslenkung der Gelenke und durch die Länge der Verbindungselemente eindeutig bestimmt werden kann, führen die Form und die Funktionsweise von Kontinuumsrobotern zu neuen Problemen bei der Modellierung und der Steuerung. Zum einen gibt es keine diskreten Gelenke mehr, an denen die Auslenkung des Roboters mit Encodern abgemessen werden kann, zum anderen verformt sich die gesamte Struktur elastisch, meist nichtlinear, abhängig von der Aktuierung und von externen Kräften und Momenten.

Es wurden daher vereinfachte Modellierungsansätze gesucht, die die Auslenkung und die Bewegung von Kontinuumsrobotern ausreichend genau beschreiben können und die sich mathematisch besser handhaben lassen. Ein weit verbreiteter Ansatz ist die Modellierung des Kontinuumsroboters als Kette von tangentialstetig verbundenen Kreissegmenten, das *Piecewise-Constant-Curvature-Modell* (Webster & Jones 2010). Hier wird die Annahme getroffen, dass sich die einzelnen Segmente des Roboters mit einer konstanten Krümmung auslenken. Wie in Abb. 4 dargestellt, ergeben sich pro Segment die drei Parameter r, l, φ (alternativ r, θ, φ) zur Beschreibung der Transformation von der Basis bis zum Ende des Segments.

Die Beschreibung eines beliebigen Kontinuumsroboter mit Hilfe dieses Modells bringt den Vorteil, dass die Berechnung der Vorwärts- und Rückwärtskinematik nur noch von den Kreissegmentparametern abhängt. Es muss nun nur noch eine Abbildung der systemspezifischen Aktuatorenparameter auf die Kreissegmentparameter erfolgen. Wird ein seilzuggesteuertes System betrachtet, erfolgt so die Berechnung von Vorwärts- und Rückwärtskinematik im Konfigurationsraum der Kreissegmentparameter und die benötigten Seilzuglängen können mit wenig Aufwand aus diesen Konfigurationen berechnet werden. Andersherum können bei diesem System mit Hilfe des Modells und z.B. über die Bestimmung der Seilzugspannungen und der Seilzuglängen Aussagen über die Pose des Roboters gemacht werden (Robinson & Davies 1999).

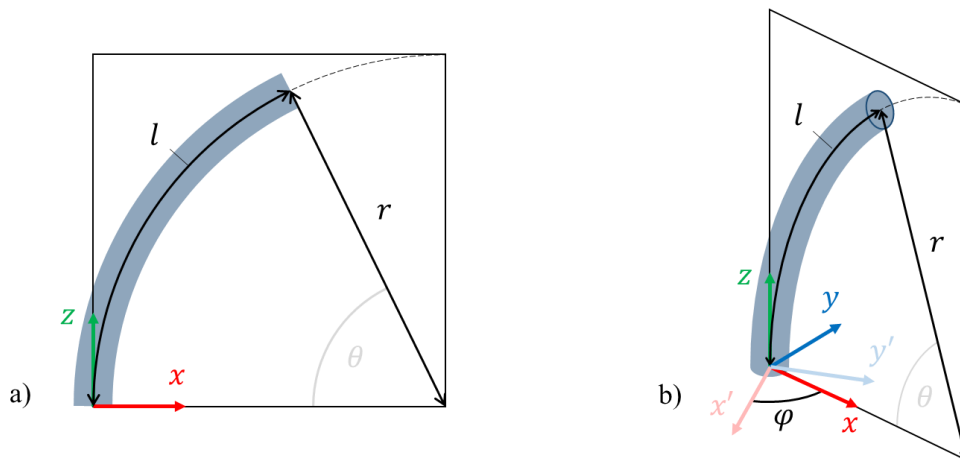


Abb. 4: Beschreibung eines Robotersegments durch das *Piecewise-Constant-Curvature*-Modell. a) Mit den Parametern r, l, φ kann die Transformationsmatrix von der Basis zum Ende des Kreissegments beschrieben werden. b) φ beschreibt dabei die Verdrehung zum vorherigen Kreissegment. (angelehnt an Webster & Jones 2010)

2.2 Nachgiebige Mechanismen und Festkörpergelenke

Montagefreie Mechanismen (*non-assembly mechanisms*) und nachgiebige Mechanismen (*compliant mechanisms*) haben in Kombination mit der additiven Fertigung neue Aufmerksamkeit erhalten, da durch den geringeren Produktionsaufwand aufgabenspezifische Roboter und Mechanismen schnell und kostengünstig hergestellt werden können (Mavroidis *et al.* 2001). Wie die Namensgebung vermuten lässt, benötigen montagefreie Mechanismen keine Montage nach der Herstellung. Nachgiebige Mechanismen können als Untergruppe von montagefreien Mechanismen kategorisiert werden, wobei sie unter die Gruppe der Materialbasierten montagefreien Mechanismen fallen (Lussenburg *et al.* 2021). Howell definiert Nachgiebigkeit in seinem Buch *Handbook for Compliant Mechanisms*: „If something bends to

do what it is meant to do, then it is compliant.“ (Howell *et al.* 2013). Das heißt, die Bewegung des Mechanismus geschieht durch eine Verformung von Teilen der geometrischen Körper. In der Mikrosystemtechnik werden nachgiebige Mechanismen schon lange eingesetzt und sind z.B. für Beschleunigungssensoren unverzichtbar. Ebenso findet man sie in der Feinmechanik, um spielfreie Gelenke zu erhalten. Auch in größeren Abmessungen gibt es viele Anwendungsfälle für nachgiebige Mechanismen und Strukturen, da so bewegliche Teile in einem Stück hergestellt werden können. Ein populäres Beispiel sind Filmgelenke bei Deckeln von Shampooflaschen.

Eine Weiterentwicklung nachgiebiger montagefreier Mechanismen sind kontaktgestützte nachgiebige Mechanismen (*contact-aided compliant mechanisms*), zur Realisierung von nicht-glatten (oder nicht stetig differenzierbaren) Endeffektorbahnkurven. Hier wird, durch eine bewusste Kollision der Struktur mit sich selbst oder mit in der Umgebung angebrachten Hindernissen, die Bahnkurve beeinflusst (Mankame & Ananthasuresh 2002). Durch Anschläge innerhalb der Struktur kann die Steifigkeit ab einer bestimmten Verbiegung stark erhöht werden oder eine asymmetrische Steifigkeit erreicht werden, so zeigen z.B. Tummala *et al.* (2014) den Einsatz solcher Strukturen in Ornithoptern³ auf. Der Einsatz kontaktgestützter Mechanismen eröffnet neue Möglichkeiten patientenindividuelle und aufgabenspezifische Systeme für die minimalinvasive Chirurgie herzustellen, indem die maximale Krümmung der eingeführten flexiblen Instrumente an den Patienten und die Operation angepasst wird (Ros-Freixedes *et al.* 2019).

Ein essenzieller Bestandteil von nachgiebigen Mechanismen sind Festkörpergelenke. Ein Festkörpergelenk verbindet zwei steife Körper als biegeweiches Zwischenstück. Als Festkörpergelenk wird demnach ein nachgiebiges Element bezeichnet, das Freiheitsgrade äquivalent zu einem konventionellen mechanischen Gelenk hat, das heißt ein Festkörpergelenk hat bestimmte Rotations- oder Translationsfreiheitsgrade mit definierten Rotations- und Translationsachsen. Festkörpergelenke haben verschiedene Vorteile gegenüber konventionellen Gelenken. Sie können aus einer Materialschicht bzw. aus dem gleichen Werkstoff wie das angrenzende Material hergestellt werden, daher können sie z.B. in Ätzprozessen (in der Mikrosystemtechnik), Biegeprozessen, Schneidprozessen oder in additiven Fertigungsverfahren hergestellt werden. Sie müssen nicht montiert werden, sie sind sehr klein herstellbar, müssen nicht geschmiert werden und es gibt keine Abnutzung durch Reibung. Es ergeben sich aber auch Nachteile, da die Bewegungsfreiheit durch die

³Schwingflügler, Fluggerät mit schlagenden Flügeln

Elastizitätsgrenze eingeschränkt ist, die Biegung nichtlinear ist und es zu Ermüdungsausfällen kommen kann (Rad 2014).

Eine weit verbreitete Methode nachgiebige Mechanismen und Festkörpergelenke zu modellieren ist das *Pseudo-Rigid-Body*-Modell (PRBM). Es beschreibt die Mechanismen als einfache Gelenkketten und vereinfacht Beschreibung und Analyse der Kinematik. In Abb. 5 ist das Prinzip dieser Modellierung anhand eines drehgelenkartigen Festkörpergelenks dargestellt. Das Festkörpergelenk wird hier als einfaches Drehgelenk mit einer Rückstellfeder modelliert. Damit lässt sich die nichtlineare Verbiegung des Festkörpergelenks vereinfacht als Rotation um eine feste Achse mit einem Rückstellmoment M beschreiben. Das Rückstellmoment berechnet sich mit der Drehfederkonstante c und dem Auslenkwinkel α :

$$M = c \cdot \alpha \quad (2.7)$$

mit:

$$c = \frac{E \cdot I}{h_f} \quad (2.8)$$

Bei der Biegung dieses Festkörpergelenks setzt sich die Drehfederkonstante c aus dem E-Modul E , dem Flächenträgheitsmoment I und der Höhe des Gelenks h_f zusammen. Dieser Zusammenhang gilt für Gelenke, deren Bereich der Biegung h_f sehr viel kleiner als die Dimension der angrenzenden Festkörper ist. (Howell & Midha 1994; Lusk 2013)

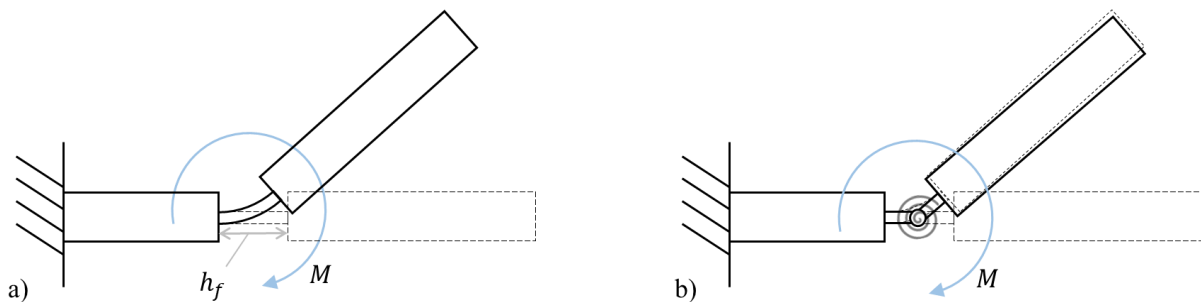


Abb. 5: a) Ausgelenktes Festkörpergelenk mit der Höhe h_f und Rückstellmoment M . b) *Pseudo-Rigid-Body*-Modellierung des Gelenks als Drehgelenk mit Drehfeder.

2.3 Additive Fertigungsverfahren mit Kunststoffen

Im Gegensatz zu den herkömmlichen abtragenden (subtraktiven, spanenden) Verfahren oder formativen Verfahren (durch Umformen eines Volumens), wird bei der additiven oder generativen Fertigung ein Bauteil durch das Auftragen von Material erzeugt. Mit den

Weiterentwicklungen, den sinkenden Kosten und der großen Verbreitung von additiven Fertigungsverfahren ergeben sich neue Möglichkeiten, Roboter und Mechanismen schnell und kostengünstig zu fertigen. Zum einen können neue Geometrien realisiert werden, die mit herkömmlichen spanenden Herstellungsverfahren nicht möglich sind, zum anderen ist die wirtschaftliche Herstellung von individuellen Einzelstücken möglich. Zunächst wurden die additiven Fertigungsverfahren hauptsächlich für das Erstellen von Funktionsmustern und Prototypen verwendet (*Rapid Prototyping*). Es gibt eine Vielzahl von additiven Fertigungsverfahren für viele verschiedene Werkstoffe, einen Überblick gibt die EN ISO/ASTM 52900:2021 Norm (Deutsches Institut für Normung e. V., 2021). Die Verfahren der additiven Fertigung von Kunststoffen lassen sich in vier Hauptkategorien einteilen: Materialextrusionsverfahren (*Material Extrusion*) wie *Fused Deposition Modelling* (FDM) oder auch als *Fused Filament Fabrication* (FFF) bezeichnet, Pulverbettverfahren (*Powder Bed Fusion*) wie das *Binder Jetting* oder das Selektive Lasersintern (SLS), Freistrahlmaterialeintrag (*Material Jetting*) und badbasierte Photopolymerisationsverfahren (*Vat Photopolymerization*) wie die Stereolithografie (SLA). In diesem Kapitel werden die in dieser Arbeit eingesetzten additiven Fertigungsverfahren beschrieben. Die verwendeten Maschinen und deren Einstellungsparameter zur Herstellung der in dieser Arbeit beschriebenen Strukturen sind genauer in Kapitel 10.1 und 10.2 beschrieben.

2.3.1 Für diese Arbeit relevante additive Fertigungsverfahren

Vor allem das FDM-Verfahren hat sich durch die kostengünstigen Desktop-Drucker weit verbreitet (Wohlers *et al.* 2020). Neben den geringen Maschinenkosten ist dabei auch das günstige Material, üblicherweise Thermoplaste wie Polylactide (PLA) oder Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), und die einfache Handhabung der Maschinen zu nennen. In diesem Verfahren wird ein Kunststofffilament in einer Düse aufgeschmolzen und auf der Bauplattform schichtweise aufgetragen, bis das gewünschte Bauteil entsteht (s. Abb. 6). Es werden hier verfahrensbedingt Stützstrukturen für Überhänge und Hohlräume benötigt, welche nachträglich entfernt werden müssen. Diese sehr kostengünstigen Drucker haben in der Regel höhere Fertigungsungenauigkeiten als professionelle pulverbasierte Anlagen. (Gibson *et al.* 2021)

Bei Pulverbettverfahren wird schichtweise Pulver auf die Bauplattform geschoben und mit Hilfe thermischer Energie durch einen Laser oder durch das Einbringen von Klebemittel im Bereich der Bauteile verfestigt. Mit jeder Schicht fährt die Plattform eine Schichtdicke nach unten und es entsteht ein Pulverblock, welcher die Bauteile enthält (s. Abb. 7). Die Bauteile müssen danach von dem Restpulver befreit werden. Das Verfahren hat den Vorteil filigrane Strukturen mit beliebigen Geometrien herstellen zu können, wobei zum einen keine

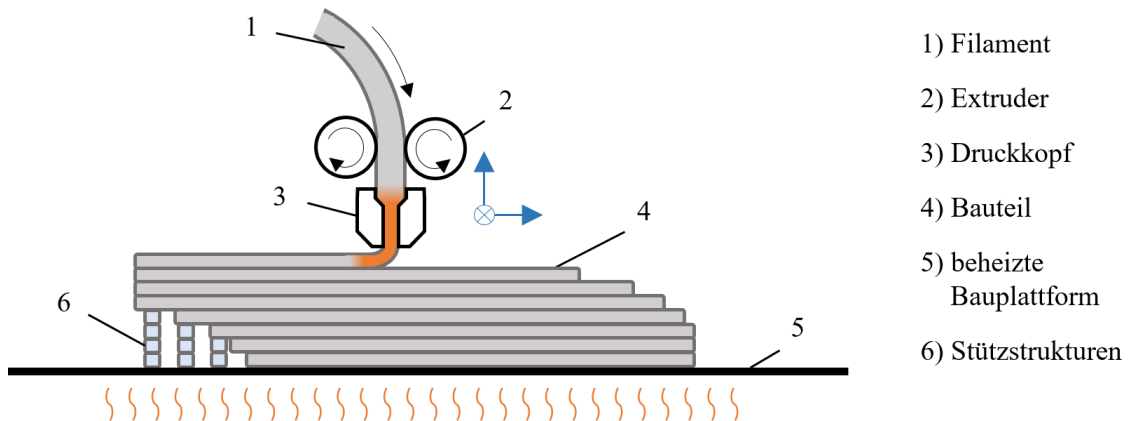


Abb. 6: Funktionsprinzip eines FDM-Druckers: Das Filament (1) wird mit Hilfe eines Extruders (2) in den Druckkopf (3) mit Heizelement und Düse geschoben. Der geschmolzene Kunststoff wird schichtweise aufgetragen und das Bauteil (4) entsteht auf der beheizten Bauplattform (5). Starke Überhänge werden auf Stützstrukturen (6) aufgebaut, welche nachträglich entfernt werden müssen.

Stützstrukturen benötigt werden und zum anderen eine hohe Genauigkeit realisierbar ist. Des Weiteren sind durch den Einsatz von technischen Thermoplasten höhere mechanische und thermische Belastbarkeiten als bei FDM-Verfahren umsetzbar. Die Bauteile müssen nach dem Druck von dem anhaftenden Restpulver befreit werden, daher ist eine Nachbearbeitung notwendig. Dies kann durch händische Reinigung, Trowalisieren oder Abstrahlen geschehen. Der Oberflächenrauheit der Teile kann in weiteren Nachbearbeitungsschritten entgegengewirkt werden, wie z.B. durch Lackieren, Polieren, Trowalisieren oder lösungsmittelbasiertem Glätten.

Die hohe Auflösung des Druckverfahrens, sowie die Tatsache, dass keine Stützstrukturen verwendet werden müssen, machen dieses Verfahren besonders für nachgiebige Mechanismen und Festkörpergelenke interessant. Wegener & Witt beschreiben in ihrer Arbeit verschiedene Konstruktionsregeln für das SLS-Verfahren, unter anderem Richtwerte für minimale Spaltbreiten (Wegener & Witt 2012). In diesem Verfahren werden thermoplastische Kunststoffe verarbeitet, üblicherweise Polyamide (PA) wie PA11 und PA12 oder thermoplastische Elastomere wie TPU (Thermoplastisches Polyurethan). Auch Kunststoffe für medizinische Anwendungen wie PEEK (Polyetheretherketon) oder das als biokompatibel zertifizierte PA2200 (basiert auf PA12) können in dem SLS-Verfahren verarbeitet werden. PA12 Polymere sind teilkristalline Thermoplaste, welche sich besonders gut für die Herstellung von nachgiebigen Strukturen bzw. Festkörpergelenken eignen. Die Teilkristallinität sorgt dafür, dass das Material über die Streckgrenze verformt werden kann, ohne zu brechen. Die

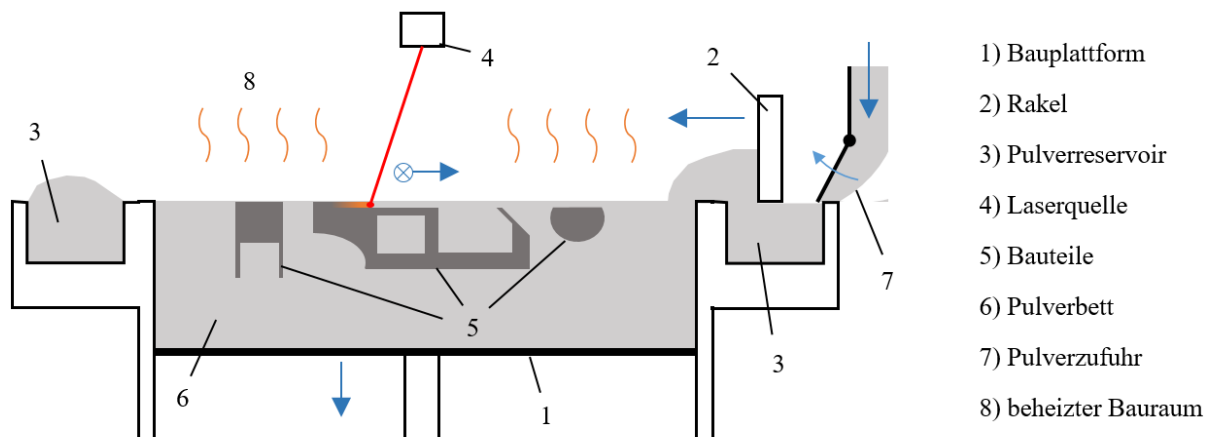


Abb. 7: Funktionsprinzip des SLS-Verfahrens: Die Bauplattform (1) fährt eine Schichthöhe nach unten, woraufhin eine Rakel (2) eine Schicht Pulver aus den Pulverreservoirs (3) auf der Bauplattform verteilt. Ein Laser (4) schmilzt das Pulver lokal an den Stellen der Bauteile (5) auf. Es entsteht ein Pulverblock (6) welcher die Bauteile enthält. Neues Pulver wird über eine Zuführklappe (7) bereitgestellt. Der gesamte Bauraum (8) wird auf die materialabhängige Prozesstemperatur erhitzt.

Spannungen im Material werden während der Verformung über Fließvorgänge abgebaut. (Breuninger *et al.* 2012)

2.3.2 Additive Fertigung von Kontinuumsrobotern und nachgiebigen Mechanismen

Da Polymere eine breite Spanne an physikalischen und vor allem mechanischen Eigenschaften abdecken, bieten sie sich für den Einsatz von nachgiebigen Systemen an. Die additive Fertigung von Komponenten aus weichen Kunststoffen hat daher im Bereich der Kontinuums- und Soft-Robotik viele Anwendungsmöglichkeiten. Auch für den Entwurf und die Herstellung von nachgiebigen Mechanismen bieten sich additive Fertigungsverfahren an. Zum einen können Geometrien erzeugt werden, die mit herkömmlichen Fertigungsverfahren gar nicht umsetzbar wären und zum anderen ist eine wirtschaftliche Herstellung von individuellen, an ihre Aufgabe angepassten Systeme nur mit additiven Fertigungsverfahren möglich. Der Stand der Forschung im Bereich der additiven Fertigung von Soft Robotern wird in den Übersichtsarbeiten von Schmitt *et al.* (2018), Gul *et al.* (2018) und Wallin *et al.* (2018) zusammengefasst. Durch die Designfreiheit der additiven Fertigungsverfahren sind montagefreie Mechanismen prädestiniert für die Herstellung mit diesen. Cuellar *et al.* (2018) und Lussenburg *et al.* (2021) geben einen Überblick über montagefreie Mechanismen und deren (additive) Fertigung. Montagefrei heißt in der Praxis, dass nur noch herstellungsspezifische Nachbearbeitungsschritte notwendig sind, also im 3D-Druck das Entfernen von Stützstrukturen oder das Entfernen von Restpulver.

Einige der relevanten Arbeiten im Bereich der additiven Fertigung von Kontinuumsrobotern und nachgiebigen Mechanismen sind im Folgenden zusammengefasst. Ein sehr bekanntes Beispiel für einen SLS-gefertigten hyperredundanten Manipulator ist der bionische Handling-Assistent der Firma Festo (Esslingen, Deutschland). Dieser rüsselförmige Roboter besteht aus vielen einzelnen pneumatisch angetriebenen Elementen. Durch dünnwandige Blasebalgstrukturen können solche pneumatisch angetriebene Systeme mit dem SLS-Verfahren umgesetzt werden (Grzesiak *et al.* 2011; Rost & Schädle 2013; Scharff *et al.* 2017). Die Herstellung von aufgabenspezifischen *Concentric Tube Robots* mit additiven Fertigungsverfahren konnte gezeigt werden (Amanov *et al.* 2015). Verschiedene monolithische Mechanismen für robotische Finger wurden im SLS-Verfahren (Groenewegen *et al.* 2015) und im FDM-Verfahren (Mutlu *et al.* 2016) gefertigt. Mit Hilfe der *Infill*-Einstellungen des FDM Druckverfahrens lassen sich mit nur einem Material verschiedene Steifigkeiten erzeugen, wie bei diesem Entwurf von nachgiebigen seilzuggesteuerten Fingern für Handprothesen gezeigt wurde (Mutlu *et al.* 2016). Im Bereich der Soft-Robotik wurde die Herstellung von pneumatischen Aktuatoren (PneuNets) im SLA-Verfahren und FDM-Verfahren mit Elastomeren bereits in mehreren Arbeiten umgesetzt (Peele *et al.* 2015; Yap *et al.* 2016). Um auch weniger flexible Kunststoffe wie ABS oder sogar metallische Werkstoffe für Festkörpergelenke mit großen Auslenkwinkeln einsetzen zu können, bieten sich spiralförmige oder helixförmige nachgiebige Strukturen an (Mirth 2014; Scarcia *et al.* 2016; Hu *et al.* 2019; Feng *et al.* 2020). Ein weiteres Konzept für additiv gefertigte Festkörpergelenke mit großen Auslenkwinkel sind *Rolling-Contact Joints*, bei denen während der Bewegung zwei gegenläufige Bänder auf gekrümmten Oberflächen abrollen (Jeanneau *et al.* 2004).

2.4 Codebasierte und automatisierte Konstruktion

Um den Einsatz anwendungsspezifischer Roboter und Mechanismen zu ermöglichen, ist neben der schnellen Herstellung eine Automatisierung der Konstruktionsprozesse erforderlich. In diesem Kapitel wird ein Überblick über 3D-Modelle in der Mechanikkonstruktion, über die codebasierte Konstruktion und über den automatisierten Entwurf von Robotern und Mechanismen gegeben.

2.4.1 3D-Modelle in der Mechanikkonstruktion

Der Weg eines physischen Produkts von der Idee zur Realisierung führt heutzutage unweigerlich über den Computer. Klassischerweise wird hier ein Objekt über ein MCAD (*Mechanical Computer Aided Design*) Programm über eine dreidimensionale interaktive Benutzeroberfläche entworfen. Die Beschreibung eines Objekts als Volumenmodell kann auf

verschiedene Arten geschehen: Die erste Möglichkeit ist eine ergebnisorientierte Darstellung, die *Boundary Representation* (B-Rep). Hier wird ein Volumen mit Hilfe von Punkten, Kanten und Oberflächen beschrieben. Wird noch die Reihenfolge der Punkte einer Fläche beachtet und damit jeder Fläche ein Normalenvektor zugeordnet, wird ein „Innen“ und „Außen“ der Flächen bzw. des Volumens definiert. Im Gegensatz dazu steht die *Constructive Solid Geometry* (CSG), bei der ein Volumen über boolesche Operationen von verschiedenen Grundkörpern (Volumenprimitive) zusammengesetzt wird. Beide Repräsentationen haben bestimmte Vor- und Nachteile. Da bei der B-Rep die explizite Geometrie gespeichert ist, kann diese auch direkt manipuliert werden, jedoch ist in der Struktur keine direkte Historie der Änderungen gespeichert und der Speicherbedarf ist verglichen mit CSG-Objekten hoch. Bei der CSG-Repräsentation wird das Objekt implizit gespeichert, was in bestimmten Situationen bei scheinbar einfachen Manipulationen wie z.B. bei der Verrundung von Kanten zu Fehlern führen kann. Dafür ist die Historie der Objektmanipulation gespeichert und ein nachträgliches Ändern eines Zwischenschritts ist mit wenig Aufwand möglich. Gerade bei der Herstellung von mechanischen Komponenten in spanenden Verfahren ist die CSG-Repräsentation von Vorteil, da diese Verfahren auch Volumenprimitive in Form der Werkzeuggeometrien aufweisen. Die CSG-Repräsentation ist bei der parametrischen Konstruktion von großem Vorteil, da hier alle Zwischenschritte der Konstruktion einfach geändert werden können. CAD-Programme wie CATIA V5 oder SolidWorks (Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, Frankreich) greifen auf die CSG-Volumenrepräsentation zurück. Die meistens MCAD-Programme bieten jedoch beide Möglichkeiten der Volumenmodellierung oder verwenden eine hybride Form der beiden. (Farin *et al.* 2002; Eigner *et al.* 2014)

Bei Komponenten, die im 3D-Druck hergestellt werden, hat sich die Repräsentation durch Oberflächenmodelle (also B-Rep Formate) durchgesetzt. Das heißt nicht unbedingt, dass die Konstruktion in der B-Rep erfolgt, jedoch wird das Modell üblicherweise zur Weiterverarbeitung in ein Oberflächenmodell umgewandelt. Das Slicen, also die Umrechnung des Modells zu einem Stapel von druckbaren Schichten, ist bei dieser Repräsentation einfacher umzusetzen. Ein verbreitetes Standarddatenformat ist dabei das STL-Format (*Standard Tessellation Language*). Hier wird die Oberfläche des Modells trianguliert, das heißt sie wird durch ein Netz aus Dreiecken repräsentiert. Die Bearbeitung von Oberflächenmodellen wie STL-Dateien wird durch die fehlende Konstruktionshistorie erschwert. Oft werden STL-Dateien als „tote“ Dateien bezeichnet, da sich deren Bearbeitung in CSG basierten MCAD-Programmen als umständlich gestaltet. Standardmäßig werden das Importieren und Exportieren von STL-Dateien angeboten, sowie bestimmte Funktionen zur Reparatur und Analyse der Dateien. Sollen aber Bearbeitungsschritte durchgeführt werden, die über das Skalieren der

Modelle hinausgehen, wird üblicherweise eine Umwandlung der B-Rep in eine CSG-Repräsentation gefordert. Es gibt spezielle Programme zur Bearbeitung, Analyse und Reparatur von STL-Dateien. Populäre Programme sind dabei FreeCAD, Meshmixer (Autodesk, San Francisco, USA), Blender (Blender Foundation, Amsterdam, Niederlande), MeshLab (ISTI – CNR, Pisa, Italien) oder der 3D Builder (Microsoft, Washington, USA). Erwähnenswert sind außerdem sogenannte *Sculpting* Programme zur Freiformmodellierung von Volumenmodellen, welche aber weniger in der Mechanikkonstruktion eingesetzt werden, sondern in der grafischen Datenverarbeitung z.B. bei animierten Filmen oder Computerspielen.

2.4.2 Codebasierte Erzeugung von 3D-Modellen

Die parametrische Konstruktion ist Grundlage für die meisten MCAD-Programme. Dabei wird ein Volumenmodell so erstellt, dass es sich nachträglich durch das Anpassen bestimmter Parameter ändern lässt, ohne das Objekt nochmal neu zu konstruieren. Die Weiterentwicklung der parametrischen Konstruktion mit einem höheren Grad an Automatisierung ist die generative, algorithmische oder automatisierte Konstruktion. Bei diesen Konstruktionsparadigmen werden unter Vorgabe von Randbedingungen konstruktive Lösungen für ein Objekt automatisch entworfen. Die automatisierte Konstruktion wie sie hier in der Arbeit verstanden wird, bedeutet, dass unter Vorgabe von Anforderungen auf einem abstrakteren Level als rein geometrische Abmessungen und Beziehungen, die gesamte Struktur des Objekts entworfen wird. Am Beispiel eines Roboterarms soll kurz der Unterschied der parametrischen Konstruktion zur automatisierten Konstruktion erläutert werden: Wird der Roboterarm parametrisch konstruiert, können z.B. die Gliedlängen des existierenden Roboters einfach geändert werden, ohne den gesamten Arm neu konstruieren zu müssen. Bei einer automatisierten Konstruktion des Roboterarms wird aber die Struktur des gesamten Arms unter Vorgabe einer Bewegungsaufgabe ausgelegt. Die Herangehensweise der Erzeugung von Körpern über Programmcode vereinfacht diese Automatisierung der Erstellung der Objekte.

Während die Bearbeitung von Volumenmodellen in den klassischen MCAD-Programmen über eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) umgesetzt wird, gibt es für die Erzeugung von 3D-Objekten auch eine Reihe an domänenspezifischen Bibliotheken, Sprachen und APIs (*Application Programming Interfaces*). Diese werden zur textbasierten/codebasierten Erzeugung und Bearbeitung von Volumenmodellen verwendet. Ein großer Vorteil der codebasierten Konstruktion ist die einfache Parametrisierung und die schnelle nachträgliche Änderung von Werten, um mit geringem Aufwand Varianten des Ursprungsmodells zu erhalten. Der initiale Aufwand, um ein Objekt in einer codebasierten Konstruktionsumgebung zu entwerfen, mag zwar größer sein, werden jedoch viele Varianten eines Objekts benötigt oder

müssen Spezifikationen nachträglich geändert werden, zahlt sich dieser Mehraufwand aus (Machado *et al.* 2019). Des Weiteren kann oft auf ein großes Repertoire an bestehenden Softwarebibliotheken zurückgegriffen werden, was gerade im Hinblick auf eine Automatisierung der Konstruktion viele Möglichkeiten und Vorteile bietet.

Eine bekannte C++ Programmbibliothek ist die Computational Geometry Algorithms Library oder CGAL (Fabri & Pion 2009), auf deren Funktionen viele Programme zurückgreifen und auf die einige der Sprachen zur Geometrieerzeugung basieren. Eine weitere C++ Bibliothek ist die Open Cascade Technology oder OCCT (Open Cascade S.A.S. 2022), auf welcher z.B. FreeCAD und die Python Bibliothek CadQuery aufgebaut sind. In manchen CAD-Programmen kann die codebasierte Konstruktion über eine API geschehen, z.B. bei Blender und FreeCAD über eine Python API. Eine weitere Möglichkeit sind Makros, z.B. erlaubt CATIA V5 die Implementierung von Visual Basic Skripten. Es gibt eine Reihe an eigenen Sprachen für die Erzeugung von 3D-Geometrien, Beispiele hierfür sind OpenSCAD, OpenJSCAD, ImplicitCAD, FormWriter oder die Geometric Description Language. (Machado *et al.* 2019)

2.4.3 Automatisierter Entwurf von Robotern und (nachgiebigen) Mechanismen

Der automatisierte Entwurf von Robotern bezieht sich auf die Verwendung von Computeralgorithmen und Software zur Erstellung von Robotersystemen oder der Optimierung des Entwurfs derselben. Dies kann sowohl die Erstellung von Plänen für die physische Konstruktion von Robotern als auch den Entwurf von Steuerungssystemen, Sensoreinheiten und anderen Softwarekomponenten umfassen. Ziel des automatisierten Roboterdesigns ist es, den Prozess der Entwicklung neuer Roboter schneller, effizienter und zugänglicher zu machen. Evolutionäre Algorithmen, maschinelles Lernen und Optimierungsalgorithmen werden bei der automatisierten Roboterentwicklung häufig eingesetzt, um die großen Lösungsräume zu erkunden und Lösungen zu generieren, die für bestimmte Leistungskriterien optimal sind. Viele der Ansätze zur automatisierten physischen Konstruktion von Robotern basieren auf dem Einsatz von Optimierungsverfahren, bei denen die Konstruktions- oder Funktionsparameter eines Roboters optimiert werden. In den meisten Fällen gibt es bereits bestehende Roboterstrukturen, die für bestimmte Aufgaben optimiert werden (Digumarti *et al.* 2014). Für eine etwas größere Designfreiheit können modulare Systeme eingesetzt werden, die je nach Anforderungen automatisch zu einem Gesamtsystem zusammengesetzt werden (Jing *et al.* 2016; Ha *et al.* 2018). Auf diesem Prinzip basiert auch die Arbeit von Sung für den automatisierten Entwurf von Origami Faltrobotern (Sung 2016). Hier wird eine Datenbank mit parametrisierten Mechanismen und Gelenkstrukturen verwendet, aus denen der Benutzer das Gesamtsystem erstellen kann. Basierend auf den Arbeiten von Sims (1994) beschreiben Lipson

& Pollack (2000) wie für eine individuelle Aufgabe angepasste Roboter automatisch entworfen und anschließend additiv gefertigt werden können. Dabei werden mit einem genetischen Algorithmus Lösungen entworfen, diese simuliert und bewertet und, falls eine geeignete Lösung gefunden wurde, anschließend additiv gefertigt.

Auch im Bereich des Mechanismenentwurfs gibt es verschiedene Ansätze, die Synthese der Kinematik zu automatisieren. Die kinematische Synthese hat das Ziel, Kinematiken und darauf basierende Mechanismen oder Getriebe zu finden, die vorgegebene Bewegungen unter Einhaltung gegebenen Randbedingungen erfüllen (Federhofer 1932). Sie kann in den folgenden zwei Schritten durchgeführt werden: 1) Typensynthese: Die Auswahl der Getriebetypen, der mechanischen Komponenten und Antriebe. 2) Maßsynthese: Die Bestimmung der kinematischen Abmessungen der Getriebeelemente (Kerle *et al.* 2015). Besonders für die Maßsynthese und den Entwurf des darauf basierenden Mechanismus gibt es verschiedene Ansätze zur Automatisierung. Forschungsgruppen der ETH Zürich und Disney Research haben verschiedene Umgebungen für den automatisierten Entwurf von animierten mechanischen Figuren für die Filmindustrie vorgestellt. Damit können Stirnradgetriebe (Coros *et al.* 2013), Koppelgetriebe (Thomaszewski *et al.* 2014) oder additiv gefertigte nachgiebige Mechanismen (Megaro *et al.* 2017) für bestimmte Bewegungsmuster automatisiert erstellt werden. Auch die Topologieoptimierung bietet Möglichkeiten für den Entwurf von nachgiebigen Mechanismen (Bendsøe & Sigmund 2004). Hier werden die Zielbewegung, die Aktuierung, die Anbindung an die Umgebung und der Designbereich des Mechanismus angegeben, um einen für diese Aufgabe passenden Mechanismus automatisch zu berechnen (Ananthasuresh *et al.* 1994; Saxena & Ananthasuresh 2001; Mankame & Ananthasuresh 2002; Saxena 2005).

2.5 Stand der Forschung am Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik

Seit der Berufung von Professor Lüth im Jahr 2005 entwickelt der Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik (MiMed) Manipulatoren und Mechanismen mit dem Fokus auf patientenindividuellen und aufgabenspezifischen Low-Cost-Systemen. Im Folgenden wird der Stand der Forschung am Lehrstuhl MiMed in den für diese Arbeit relevanten Gebieten zusammengefasst.

2.5.1 Konstruktion mit der SG-Library

Die am Lehrstuhl entwickelte Toolbox *Solid-Geometry Library* (SG-Library) für MATLAB (Mathworks, Natick, USA) ist eine Bibliothek aus Funktionen zur Erzeugung, Bearbeitung und

Simulation von Oberflächenmodellen im STL-Format und wird als Werkzeug für die codebasierte und automatisierte Konstruktion von Robotern und Mechanismen verwendet (Lueth 2015). Die Toolbox bietet dem Benutzer allgemeinere Modellierungsfunktionen als konventionelle CAD-Programme. Es werden z.B. Funktionen zur mechanischen Konstruktion, zur Modellierung von Kinematiken und zur Mehrkörpersimulation bereitgestellt. In der SG-Library werden dreidimensionale Körper direkt als aus Dreiecken bestehende Oberflächenmodelle erstellt und bearbeitet, was den Import, die Bearbeitung und den Export von STL-Dateien für den 3D-Druck vereinfacht. Durch die Implementierung der SG-Library in der MATLAB Umgebung kann außerdem auf die große Anzahl von vorhandenen MATLAB Bibliotheken und Algorithmen zurückgegriffen werden. So können z.B. verschiedene Optimierungsalgorithmen und numerische Solver für die Automatisierung von Konstruktionsprozessen verwendet werden.

Die SG-Library verwendet eine Reihe an Datentypen, die hier im Folgenden kurz zusammengefasst werden. Das Vorgehen zur Konstruktion von Objekten kann ähnlich wie bei konventionellen CAD-Programmen erfolgen: Es wird eine Skizze erstellt, deren zweidimensionale Punktliste als $n \times 2$ Matrix gespeichert wird. Diese Punktliste wird als *point list* (PL) oder *closed polybool list* (CPL) bezeichnet. Mit Hilfe einer Kantenliste oder *edge list* (EL) wird definiert wie die Punkte der CPL verbunden sind, indem jede Kante mit den Indizes zweier Punkte beschrieben wird. Die Skizze kann nun extrudiert werden und dabei mit Hilfe von Triangulierungsfunktionen als ein Oberflächenmodell aus Dreiecken dargestellt werden. Dieses Oberflächenmodell wird mit einer 3D-Punktliste ($n \times 3$ Matrix), der *vertex list* (VL), und analog zur EL einer Liste der Dreiecksflächen ($n \times 3$ Matrix), der *facet list* (FL), beschrieben. In der VL sind die kartesischen Koordinaten der Punkte gespeichert. Die FL beschreibt die Dreiecke, indem für jedes Dreieck die Indizes der drei Punkte aus der VL in einer Zeile gespeichert werden. Die Reihenfolge der Indizes gibt mit der Rechten-Faust-Regel die Richtung des Normalenvektors des Dreiecks vor, welcher bei einer geschlossenen Oberfläche des Objekts immer nach außen zeigt und damit das Innere und das Äußere des Objekts definiert. Der durch die VL und FL beschriebene Körper wird als *solid geometry* (SG) bezeichnet. Eine SG wird in MATLAB als *structure array* gespeichert und kann neben den Feldern VL und der FL noch weitere Informationen zu dem 3D-Objekt beinhalten. Ein weiteres wichtiges Konzept ist das Anhängen von körperfesten Koordinatensystemen (*frames*), die als homogene Transformationsmatrizen in der SG-Datenstruktur gespeichert werden können.

2.5.2 Roboter- und Mechanismenentwurf mit nachgiebigen Strukturen

Am Lehrstuhl befasst sich die Arbeitsgruppe *Robotics & Mechanisms* mit Forschungsfragen auf dem Gebiet der Kinematik und Robotik. Dazu gehört die Entwicklung von computergestützten Methoden und Verfahren zur kinematischen Auslegung von Robotern und Gelenkstrukturen. Die entwickelten Methoden werden in der im vorherigen Kapitel beschriebenen SG-Library implementiert und damit Anwendern zur Verfügung gestellt. Der Lehrstuhl hat eine lange Historie im Bereich des Roboterentwurfs, des Mechanismenentwurfs und der Kinematiksynthese. Es wurden verschiedene schlangenähnliche Manipulatorsysteme für die minimalinvasive Chirurgie entwickelt, z.B. für gastroenterologische (Roppenecker 2017; Krieger 2021), laparoskopische (Brecht *et al.* 2019) und endonasale Eingriffe (Coemert *et al.* 2020). Die flexiblen, auf Festkörpergelenken basierenden Systeme wurden mit unterschiedlichen Herstellungsverfahren monolithisch hergestellt und können durch den automatisierten Konstruktionsprozess auf patientenindividuelle Anatomien angepasst werden. Der Entwurf von nachgiebigen chirurgischen Zangen konnte mit Hilfe von Topologieoptimierung umgesetzt und automatisiert werden (Sun *et al.* 2020).

Im Zuge der Entwicklung der monolithischen Robotersysteme wurden am Lehrstuhl MiMed bereits viele Erfahrungswerte zu nachgiebigen Strukturen und Mechanismen gesammelt. Die Möglichkeit des Einsatzes von additiv gefertigten Festkörpergelenken konnte für verschiedene Manipulatoren gezeigt werden. Kreiskerbelenke mit einem Kerbradius als halbe Gelenkhöhe haben sich dabei durch den quasi unveränderlichen Rotationsmittelpunkt und durch die Möglichkeit, diese Gelenke im SLS Druck herzustellen, als sehr nützlich erwiesen. Die Gelenke werden durch die Gelenkbreite b_f , die Dicke an der dünnsten Stelle d_f und die Gelenkhöhe h_f

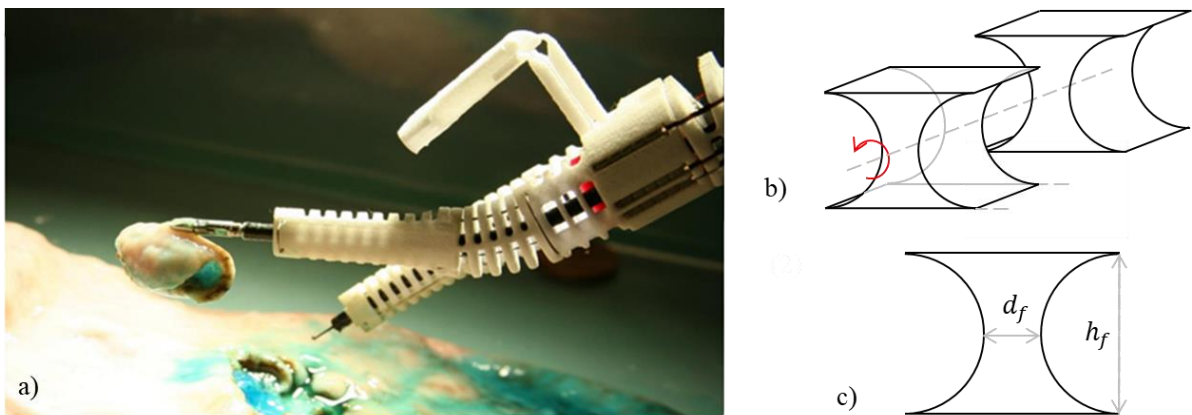


Abb. 8: a) Endeffektor eines additiv gefertigten *Single Port Overtube* (SPOT) Manipulatorsystems für die gastroenterologische Chirurgie (entnommen aus Roppenecker 2017), b) Isometrische Ansicht und c) Seitenansicht der eingesetzten Kreiskerbelenke.

– entspricht zweimal dem Kerbradius – beschrieben (eine ausführlichere Beschreibung der Festkörpergelenkparameter erfolgt in Kapitel 5.3.2). Die Auslegung der Gelenke basiert dabei auf den Erfahrungswerten, die bei dem Entwurf der SLS-gefertigten Snake-Like Manipulatoren gemacht wurden (Roppenecker 2017). Bei einer Gelenkhöhe h_f von 1 mm bewegen sich dabei die realisierbaren Gelenkdicken d_f im Bereich von 0,5 mm bis 1,2 mm. In Krieger *et al.* (2017) wurden SLS-gefertigte Festkörpergelenke auf die Dauerfestigkeit untersucht und es konnte gezeigt werden, dass diese drehgelenkartigen Kreiskerbgelenke zwischen 2000 und 3000 Zyklen überleben können.

2.5.3 Formgedächtnisstrukturen (*Shape Memory Structures*)

Basierend auf den Arbeiten im Bereich der 3D-gedruckten Manipulatorsystemen und Kontinuumsrobotern wurde von Krieger, Schiele *et al.* (2019) ein Konzept für den automatisierten Entwurf anwendungsspezifischer monolithischer Roboterstrukturen – sogenannte "Formgedächtnisstrukturen" oder „*Shape Memory Structures*“ – vorgestellt. Bei diesem Ansatz wird eine schlangenförmige Struktur, die aus einer Abfolge von starren Zwischenelementen und Festkörpergelenken besteht, durch die Betätigung eines durch die Struktur geführten Seilzugs in eine vordefinierte Konfiguration ausgelenkt. Die ausgelenkte Konfiguration der Struktur und die daraus resultierende Pose des Endeffektors wird bei der Konstruktion durch die relative Position des Seilzugs und des Festkörpergelenks an jedem Element bestimmt. Dabei ist die Grundidee, einfache aufgabenspezifische schlangenähnliche Robotersysteme zu entwerfen, die 3D-druckbar sind und nur eine minimale Anzahl von Aktoren benötigen. Die Bezeichnung Formgedächtnisstrukturen (*Shape Memory Structures*) ist an die Formgedächtnislegierungen (*Shape Memory Alloys*) angelehnt. Analog zu Formgedächtnislegierungen wird eine definierte Form der Formgedächtnisstrukturen nur durch eine einzige Zustandsänderung bzw. einen einzigen Aktor erreicht, in diesem Fall durch die mechanische Kraft des Seilzugs und nicht wie bei den Formgedächtnislegierungen durch eine thermische Veränderung.

Zu den möglichen Anwendungen dieser kontaktunterstützten Roboterstrukturen gehören formspezifische Greifer, aufgabenspezifische Roboterarme und patientenspezifische Endoskop- und Instrumentenführungen für medizinische Eingriffe. Diese Anwendungsszenarien wurden durch Krieger, Schiele *et al.* (2019) bereits aufgezeigt und es wurde ein Experiment zur Validierung der Genauigkeit der Endeffektorpositionen durchgeführt. Einige Bilder der entstandenen Funktionsmuster sind in Abb. 9 dargestellt. Es wurden dabei auch erste Ansätze für den Entwurf von Strukturen mit mehreren Endeffektorposen z.B. für *Pick-and-Place*-Anwendungen untersucht (s. Abb. 9.b). Allerdings

war hier die zweite Endeffektorpose nicht Teil des automatisierten Konstruktionsprozesses und sie wurde durch eine Spiegelung der ersten Strukturkonfiguration erreicht.

Die in dieser Arbeit beschriebene Konzepte bauen auf diesem bestehenden Entwurfsprozess für monolithische flexible Roboterstrukturen mit reduzierten Aktuatoren von Krieger, Schiele *et al.* (2019) auf, hier Einposen-Formgedächtnisstrukturen genannt. Für ein besseres Verständnis der darauf aufbauenden Erweiterungen wird der bisherige Funktions- und Entwurfsprozess der Strukturen hier nochmal zusammengefasst. Die Endkonfiguration der gesamten Formgedächtnisstruktur, das heißt die Gesamtform, in der die Struktur bei einer Aktuierung versteift, wird in Form einer Raumkurve definiert. Es ist von Vorteil, wenn diese Raumkurve als eine 3D-Kreisbogenkurve vorliegt, das heißt sie besteht aus einer tangentialstetigen Verkettung von Kreisbogensegmenten oder wird mit einer Approximationsmethode an eine solche Kreisbogenkurve angenähert. Ausgehend von dieser Kurve wird zunächst eine Grundstruktur erstellt, wobei die grundlegenden geometrischen Eigenschaften der Formgedächtnisstruktur berechnet werden. Dies geschieht durch die Anordnung von Zylindern entlang dieser Bogenkurve, bei welcher jeder Zylinder seinen vorangehenden und nachfolgenden Nachbarzylinder nur an einem Punkt berührt. Die resultierenden Zylinder entsprechen den Elementen zwischen den Festkörpergelenken der monolithischen Struktur. Die Höhe jedes Zwischenelements, der maximale Beugungswinkel jedes Festkörpergelenks, der Verdrehungswinkel zwischen den Biegeebenen der aufeinanderfolgenden Elemente sowie der



Abb. 9: Verschiedene Funktionsmuster der Formgedächtnisstrukturen: a) Struktur bildet das Lehrstuhlakronym „MiMed“, b) Erstes Beispiel für ein *Pick-and-Place*-System, c) Formspezifischer Greifer für eine 0,5l PET-Flasche, d) Formspezifischer Greifer für ein Cocktailglas (*Soft Robotics Journal*, Vol. 6, Issue 2, April 2019).

Zylinderradius der einzelnen Elemente beschreiben vollständig die Grundkonstruktion der Struktur (die strukturspezifische Nomenklatur folgt im Detail in Kapitel 5.2). Darauf basierend kann ein Oberflächenmodell des endgültigen Mechanismus mit bestimmten Kontaktstrukturen zwischen den Elementen erstellt werden. Es können für den Querschnitt beliebige Außen- und Innenkonturen gewählt werden, so dass die Seilzüge aber auch Sensoren, Kabel oder Werkzeuge durch die Struktur geführt werden können. Der Entwurfsprozess dieser Strukturen erfolgt mit Hilfe der SG-Library in MATLAB. Verschiedene Funktionsmuster wurden mittels additiver Fertigung durch selektives Lasersintern von PA2200 mit einer EOS Formiga P100 Maschine hergestellt. (Krieger, Schiele *et al.* 2019; Krieger 2021)

3. Kritik am Stand der Technik

Bei Betrachtung des Stands der Technik und des Stands der Forschung der Kontinuumsrobotik, der nachgiebigen Mechanismen und dem automatisierten Entwurf dieser Bereiche, ergeben sich verschiedene Defizite. Diese lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Eingeschränkte Zugänglichkeit von Robotersystemen: Die in der Industrie verwendeten Roboterarme und Greifsysteme sind sehr teuer. Die hohen Anschaffungs- und Betriebskosten von robotischen Systemen schränken die Zugänglichkeit für Anwender z.B. in kleinen/mittelständischen Unternehmen oder im Handwerk stark ein. Neben dem hohen Preis, sind die Systeme komplex in ihrer Bedienung und die Interaktion zwischen Mensch und Roboter birgt Gefahren für den Menschen und die Maschine (Walker 2013; Corke 2017). Es wird daher geschultes Personal für den Einsatz benötigt, was bedeutet, dass neben den Sachkosten ein hoher Personalaufwand mit entsprechenden Kosten betrieben werden muss. Betrachtet man den Bereich der Kontinuumsroboter, sind hier bisher nur wenige Systeme überhaupt auf dem Markt erhältlich (Burgner-Kahrs *et al.* 2015).

Aufwendiger Konstruktions- und Fertigungsprozess aufgabenspezifischer Systeme: Fehlende Kenntnisse im Bereich des Mechanismenentwurfs und aufwendige Konstruktionsprozesse führen zu einer großen Hürde bei dem Entwurf von Mechanismen und aufgabenspezifischen Robotern. Üblicherweise werden für bestimmte Bewegungsaufgaben Universalroboter oder Universalgreifsysteme eingesetzt und für die Aufgabe entsprechend programmiert. Diese Systeme sind teuer und können nur Bewegungsaufgaben in ihrem Arbeitsraum erfüllen, welcher z.B. durch Kollisionsvermeidung mit der Umgebung weiter eingeschränkt werden kann. Für bestimmte Aufgaben sind daher aufgabenspezifische Systeme sinnvoll, deren Entwurf sich als aufwendig darstellen kann und eine Automatisierung der Konstruktionsprozesse benötigt. (Desai *et al.* 2018)

Fehlendes Wissen und fehlende Automatisierungsprozesse im Bereich der additiv gefertigten nachgiebigen Mechanismen: Fehlendes Knowhow im Bereich der nachgiebigen Mechanismen und montagefreien Mechanismen bremst die Benutzung und Weiterentwicklung solcher Systeme. Die Auslegung nachgiebiger Mechanismen und fertigungsspezifische Parameter in der additiven Fertigung sind nicht ausreichend untersucht (Cuellar *et al.* 2018). Des Weiteren mangelt es an Software, um die Konstruktion additiv gefertigter nachgiebiger Systeme zu automatisieren (Rus & Tolley 2015; Kiener *et al.* 2021).

Die Formgedächtnisstrukturen haben in Teilen schon gezeigt, dass sie einen Ansatz für aufgabenspezifische, schnell anpassbare und schnell herstellbare Robotersysteme sein können. Jedoch weisen die Formgedächtnisstrukturen, deren codebasierter Entwurfsprozess und deren Herstellungsprozess noch verschiedene Nachteile auf. Bei dem bisherigen Entwicklungsstand der Strukturen sind noch folgende Defizite gegeben:

Einschränkungen im automatisierten Konstruktionsprozess der Formgedächtnisstrukturen: Bisher sind nur Einposen-Formgedächtnisstrukturen möglich, das heißt der Entwurf basiert auf der Vorgabe der Gesamtform der Struktur und sie können nur in eine Endeffektorendpose ausgelenkt werden. Um Aufgaben eines Roboters zu übernehmen, wie z.B. eine *Pick-and-Place* Aufgabe, müssen jedoch mindestens zwei verschiedene Endeffektorposen angefahren werden. Bei solchen Anwendungen, die mehrere Endeffektorposen verlangen, ist bisher keine automatisierte Konstruktion der Strukturen möglich. Auch eine Beeinflussung der Bewegungsabläufe der Strukturen ist im bisherigen Entwurfsprozess nicht vorgesehen, diese ergeben sich aus der Konstruktion und können nicht verändert werden. (Krieger, Schiele *et al.* 2019)

Auslegung der Strukturen auf die Herstellung im SLS-Verfahren: Die bisherigen Arbeiten beschränken sich auf die Herstellung der Strukturen im SLS-Druckverfahren. Dementsprechend ist der Entwurfsprozess auf dieses Herstellungsverfahren ausgelegt. SLS Drucker sind jedoch im Vergleich mit den weit verbreiteten Desktop 3D-Druckern teurer und aufwändiger in der Handhabung (Wohlers *et al.* 2020).

4. Eigener Ansatz

4.1 Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Software zur automatisierten Konstruktion von aufgabenspezifischen schlangenähnlichen unteraktuierten Roboterstrukturen, die in bestimmten Konfigurationen versteift werden können, um vordefinierte Endeffektorposen zu erreichen, und mittels verschiedener additiver Fertigungsverfahren kostengünstig hergestellt werden können.

Aufbauend auf den Vorarbeiten zu den Einposen-Formgedächtnisstrukturen (s. Kapitel 2.5.3), sollen die dort vorgestellten konzeptionellen Ideen für Formgedächtnisstrukturen, die in mehreren vordefinierten Stellungen versteift werden können, in einem automatisierten Konstruktionsprozess umgesetzt werden. Unter Vorgabe von definierten Endeffektorzielposen und verschiedenen Konstruktionsparametern soll automatisch ein Oberflächenmodell einer Formgedächtnisstruktur mit mehreren Zielposen erstellt werden. Diese robotischen Strukturen werden im Folgenden „Mehrposen-Formgedächtnisstrukturen“ genannt. Damit diese Strukturen Aufgaben eines Roboters übernehmen können, muss der automatisierte Konstruktionsprozess erweitert werden, sodass 1) mehrere beliebige Endeffektorposen mit einer einzigen Struktur erreicht werden können, 2) die Gesamtform nicht durch Raumkurven vorgegeben werden muss, sondern auch automatisiert erstellt wird und 3) die Bahnkurven des Endeffektors beeinflusst werden können. Im Hinblick auf die Herstellung der Strukturen, soll der Entwurf der Strukturen so angepasst werden, dass sie nicht nur im SLS-Verfahren, sondern auch in dem kostengünstigen FDM-Verfahren hergestellt werden können.

Die in Kapitel 2.5.3 vorgestellten Einposen-Formgedächtnisstrukturen sind konstruktionsbedingt darauf beschränkt, in eine einzige Gesamtform ausgelenkt und versteift zu werden und wurden für Anwendungen entwickelt, in denen die endgültige Form der Struktur und nicht die Pose des Endeffektors das primäre Konstruktionsziel ist. In dieser Arbeit ist der Anspruch an diese Strukturen, gewisse einfache Aufgaben eines robotischen Systems übernehmen zu können, also die Bewegung zwischen zwei oder mehr Konfigurationen mit zwei oder mehr vorgegebenen Endeffektorposen. Daher werden die Entwurfsalgorithmen der Strukturen so erweitert, dass es auch möglich ist Mehrposen-Formgedächtnisstrukturen automatisiert zu erstellen. Die Konstruktion von Strukturen, die sich nicht nur auf eine vorgegebene Gesamtform der Struktur beschränken, sondern mehrere Endeffektorposen als Vorgabe haben, führt über die folgenden zwei Schritte: Zum einen muss eine geeignete Kinematik gefunden werden, die die vorgegebenen Randbedingungen erfüllt, und zum anderen

müssen die auf dieser Kinematik basierenden Strukturen konstruiert und für den Herstellungsprozess ausgelegt werden. Diese Probleme sollen adressiert werden und in einem neuen Prozess soll es möglich sein, solche Mehrposen-Formgedächtnisstrukturen zu erstellen. Die Funktionalität der Strukturen soll mit dem Entwurf von verschiedenen Funktionsmuster für unterschiedliche Anwendungen getestet werden.

4.2 Erwartete Vorteile

Mit der Umsetzung der in der Aufgabenstellung definierten Vorhaben werden die folgenden Vorteile erwartet:

Möglichkeit eines kostengünstigen Ersatzes für teure Robotersysteme: Die in dieser Arbeit entwickelten Strukturen können durch den automatisierten Konstruktionsprozess, die additive Fertigung der Strukturen, die geringe Anzahl an Aktoren und die einfache Montage eine kostengünstige Alternative zu teuren Roboter- oder Greifersystemen sein. Um tatsächlich robotische Aufgaben erfüllen zu können, soll es mit der Erweiterung des Entwurfsprozesses möglich sein, Mehrposen-Formgedächtnisstrukturen herstellen zu können. Es soll nicht mehr die Vorgabe der Gesamtform der Struktur nötig sein, sondern ein automatisierter Entwurf von Strukturen, die mehrere Endeffektorposen einnehmen können, möglich werden.

Erschließung neuer Einsatzgebiete für robotische Systeme: Die Verbreitung von 3D-Druckern nicht nur in der Industrie, sondern auch im Hobby- und Heimbereich und die Tatsache, dass die Strukturen mit verschiedenen Druckverfahren hergestellt werden können, erschließt viele neue Anwendungsgebiete für die Automatisierung von Bewegungsaufgaben. Mit der Software zur automatisierten Konstruktion sollen dabei vielen verschiedenen Anwendergruppen die Möglichkeit zur Erstellung aufgabenspezifischer Strukturen gegeben werden.

Schneller Konstruktions- und Herstellungsprozess für individuelle Mechanismen: Die Strukturen sollen in kurzer Zeit die Umsetzung der Idee einer individuellen Aufgabe zu einem fertigen robotischen System erlauben. Der Benutzer gibt bestimmte Parameter und die Endeffektorposen der Struktur vor und MATLAB erzeugt in einem automatisierten Konstruktionsprozess die STL-Dateien der Strukturen. Die Herstellung soll in einem additiven Fertigungsverfahren erfolgen und auch in kostengünstigeren Druckverfahren wie dem FDM-Druck herstellbar sein.

Strukturspezifische Vorteile der Formgedächtnisstrukturen für verschiedene Anwendungsgebiete: Die Formfreiheit der Strukturen ist prädestiniert für den Entwurf von

formspezifischen Greifern und Manipulatoren. Die Bewegungsfreiheit der flexiblen Strukturen erlaubt das Einführen in kleine Öffnungen und das Versteifen in bestimmten Posen zur Kraftübertragung, wie es z.B. in der minimalinvasiven Chirurgie erforderlich ist.

4.3 Einordnung und Abgrenzung

Die Formgedächtnisstrukturen haben Eigenschaften von Kontinuumsrobotern und nachgiebigen Mechanismen und eine Einordnung dieser Strukturen in den Stand der Technik ist nicht ganz trivial. Ein Mechanismus im technischen Sinne ist laut Duden eine „Kopplung von Bauelementen [...], die so konstruiert ist, dass jede Bewegung eines Elements eine Bewegung anderer Elemente bewirkt.“ (Dudenredaktion n.d.). Diese Kopplung geschieht über die kinematischen und kinetischen Zusammenhänge zwischen diesen Elementen. Mechanische Getriebe sind also nach dieser Definition Mechanismen. Im Gegensatz dazu definierte der „Vater der Robotik“ Joseph Engelberger einen Roboter folgendermaßen: *„An automated machine that does just one thing is not a robot. It is simply automation. A robot should have the capability of handling a range of jobs in factory.“*⁴. Viele robotische Systeme und deren Manipulatoren (der Teil des robotischen Systems, der für die physikalische Interaktion mit Objekten in der Umgebung fungiert) haben Mechanismen zur Umsetzung der Bewegung integriert. Besonders bei Endeffektoren und kleinen Systemen wird nicht jedes einzelne Glied des Roboters mit einem eigenen Aktor angetrieben, sondern es wird über eine kinematische Kopplung oder eine Kraftkopplung bewegt. Da die Grenzen zwischen Roboter und Mechanismen oft nicht eindeutig sind, wird bei Systemen, die sich in diesem Feld zwischen den Fachgebieten bewegen, auch von roboterähnlichen Systemen gesprochen (Mügilitz 1991).

Die Einposen-Formgedächtnisstrukturen, wie sie in den Vorarbeiten zu dieser Arbeit umgesetzt wurden, können daher als kraftgekoppelte, nachgiebige und kontaktunterstützte Mechanismen kategorisiert werden und sind nach den eben genannten Definitionen keine Roboter. Im Zuge dieser Arbeit werden nun Strukturen entworfen die zwei oder mehr Posen einnehmen können. Das heißt je nach Auslegung sind die Strukturen in der Lage unterschiedliche Aufgaben zu erfüllen und können dementsprechend auch als unteraktuierte, hyperredundante und extrinsisch steife Kontinuumsroboter gesehen werden. Das ist besonders der Fall, wenn die automatisierte Konstruktion der Formgedächtnisstrukturen als eine Art der „Programmierung eines Roboters“ für eine Aufgabe gesehen wird. Wie im Laufe der Arbeit ersichtlich wird, werden auch für den aufgabenspezifischen Entwurf der Strukturen Prinzipien aus der Roboterkinematik eingesetzt.

⁴Eine automatisierte Maschine, die nur eine Sache tut, ist kein Roboter. Sie ist einfach Automatisierung. Ein Roboter sollte in der Lage sein, eine Reihe von Aufgaben in der Fabrik zu erledigen. (Übersetzung des Autors)

5. Konzept und Systementwurf

5.1 Grundlegendes Funktionsprinzip

Die grundlegende Idee der Formgedächtnisstrukturen ist der automatisierte Entwurf von seilzuggesteuerten seriellen Festkörpergelenkketten für bestimmte Aufgaben. Dabei sind die Strukturen so ausgelegt, dass sie mit möglichst wenig Aktuierungsfreiheitsgraden in bestimmten Stellungen versteift werden können. Die Strukturen sollen soweit möglich monolithisch, also in einem Stück, gefertigt werden. Die mechanische Umsetzung lässt sich auf verschiedene Arten realisieren, jedoch basieren alle Konzepte immer auf einer seriellen Kette aus steifen Zwischenelementen und Festkörpergelenken, die über Seilzüge ausgelenkt werden. Wie in Abb. 10 dargestellt bestimmt die Position des Seilzugs relativ zur Position des Gelenks die Kraftangriffspunkte des Seilzugs an dem Element. Das in jedem Festkörpergelenk resultierende Moment führt zu einer Auslenkung der Gelenke. Durch Anschläge zwischen den Elementen wird der maximale Winkel der Auslenkung der einzelnen Gelenke begrenzt. Werden mehrere solcher Festkörpergelenkketten in einer zuvor berechneten Orientierung hintereinander gehängt, kann der resultierende Mechanismus in eine oder mehrere definierte dreidimensionale Gesamtformen ausgelenkt und versteift werden. Die Anschläge zwischen den Elementen definieren die Form der Struktur, in der sie bei vollständiger Auslenkung aller Gelenke versteift werden kann.

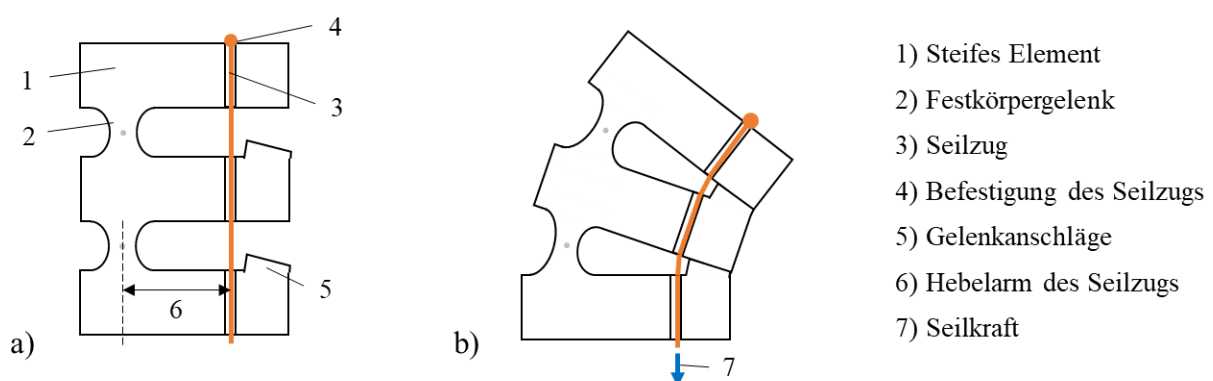


Abb. 10: Funktionsprinzip der seilzugaktuierten Festkörpergelenkstrukturen (vereinfacht in 2D): a) Die serielle Kinematik besteht aus Zwischenelementen (1) und Festkörpergelenken (2). Durch die Struktur führt ein Seilzug (3), der fest mit dem letzten Element der Struktur verbunden ist (4). Der maximale Auslenkwinkel wird durch Anschläge (5) zwischen den Elementen begrenzt. b) Wird eine Seilkraft (7) aufgebracht wird die Struktur in eine definierte Stellung (im Folgenden als „Anschlagstellung“ bezeichnet) ausgelenkt und versteift.

5.2 Parameter und Nomenklatur zur Beschreibung der Strukturen

Der grundlegende Aufbau der Strukturen kann mit einigen wenigen Parametern beschrieben werden. Für ein besseres Verständnis werden diese in diesem Kapitel eingeführt. Alle hier gezeigten Formgedächtnisstrukturen werden auf Raumkurven aufgebaut, die aus tangential verbundenen Kreissegmenten bestehen. Grundsätzlich können auch komplexere Raumkurven als Formgeber der Strukturen verwendet werden, jedoch haben Raumkurven aus Kreissegmenten durch die stückweise konstante Krümmung den Vorteil einer einfacheren mathematischen Beschreibung als Raumkurven mit beliebiger Form.

Im Folgenden referenziert der Begriff „Element“ immer ein einzelnes steifes Zwischenelement der Struktur. Dieses Element entsteht auf Basis der im Folgenden beschriebenen Parameter eines Zylinders. Als „Segment“ wird ein einzelnes Kreissegment bezeichnet bzw. der Teil der Struktur, der auf einem einzelnen Kreissegment aufbaut. Die Strukturen besteht also aus einer seriellen Kette von Segmenten, welche wiederum aus einer seriellen Verknüpfung von Elementen und Festkörpergelenken bestehen. Die „neutrale Faser“ bezeichnet den Teil der Struktur, der bei der Auslenkung in seiner Länge unverändert bleibt. Diese verläuft durch die Drehzentren der Festkörpergelenke. Wenn die Struktur ausgelenkt wird nimmt sie eine bestimmte Form ein, diese wird hier als „Gesamtform“ beschrieben. Ist die Struktur vollständig ausgelenkt und versteift, das heißt alle Gelenke haben ihre Anschläge erreicht, wird von der „versteiften Gesamtform“ oder „Anschlagsstellung“ gesprochen. Wird von der „Endeffektorpose“ geredet ist die Position und Orientierung des Koordinatensystems an der Spitze der Struktur gemeint. Die Endeffektorpose in der Anschlagsstellung der Struktur wird als „Endeffektorendpose“ bezeichnet.

Eine Struktur basiert also auf einer Raumkurve mit n_s Kreissegmenten und wird mit dem Index $j \in [1, n_s]$ beschrieben. In Abb. 11.a ist beispielhaft eine Raumkurve mit zwei Kreissegmenten abgebildet. Diese Kreissegmente werden jeweils durch den Radius r_s , die Bogenlänge l_s und den relativen Verdrehwinkel φ_s vollständig beschrieben. Alternativ zur Bogenlänge kann auch der Aufspannwinkel $\theta_s = l_s / r_s$ zur Beschreibung verwendet werden.

Aus der aus Kreissegmenten aufgebauten Raumkurve wird die Grundstruktur der Formgedächtnisstrukturen berechnet. Die hier vorgestellten Strukturen bestehen aus einer alternierenden Kette von n_c festen Zwischenelementen und $n_c - 1$ Festkörpergelenken, welche im Folgenden mit dem Index $i \in [1, n_c]$ referenziert werden. Für die Ermittlung der Grundstruktur werden Zylinder an die Raumkurve gelegt, welche ihre beiden angrenzenden Nachbarn jeweils nur an einem Punkt auf der Kante ihrer Grundflächen berühren. Es gibt

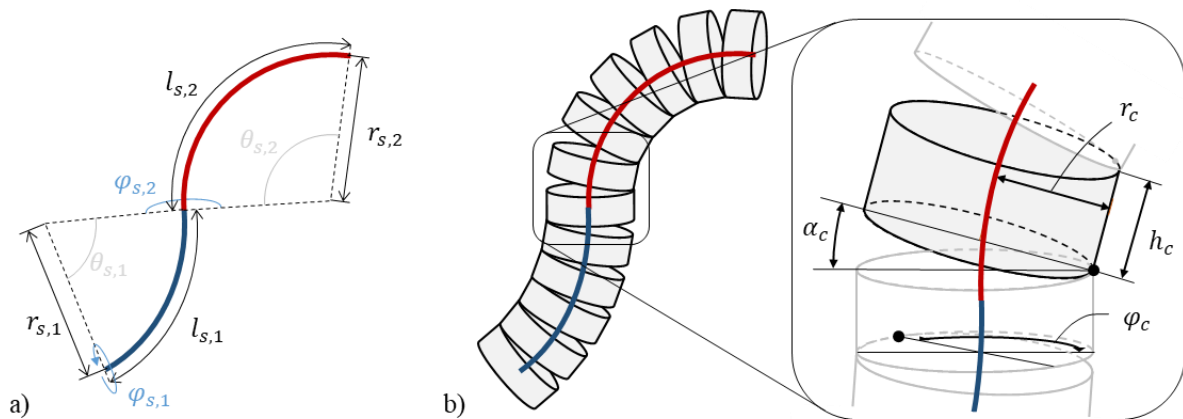


Abb. 11: Grundlegende Parameter zur Beschreibung der Formgedächtnisstrukturen: a) Raumkurve aus Kreissegmenten, b) darauf aufbauende Grundstruktur aus Zylindern mit den Parametern zur Beschreibung der Grundstruktur.

verschiedenen Vorgehensweisen diese Zylinder an eine Raumkurve zu fitten, da aber nur Kreissegmente eingesetzt werden, vereinfacht sich die Berechnung und die Zylinderkette kann bei einer vorgegebenen Mindesthöhe der Elemente über einfache geometrische Zusammenhänge bestimmt werden. Verschiedene Möglichkeiten, um die Zylinder an die Raumkurve zu fitten, werden ausführlicher in Krieger (2021) beschrieben.

Die Parameter eines Zylinders in der Kette setzen sich folgendermaßen zusammen: Der Zylinderradius r_c , die Höhe des Zylinders h_c , der Auslenkwinkel α_c und der Verdrehwinkel φ_c . Der Radius r_c ist für alle Zylinder in der Grundstruktur gleich und ist ein Eingabeparameter zur Erstellung der Grundstruktur. Die Werte für h_c , α_c und φ_c ergeben sich aus der Berechnung der Grundstruktur. Mit α_c wird der Winkel zwischen der Grundfläche des betrachteten und der Grundfläche des vorherigen Zylinders beschrieben, was der maximalen Auslenkung des Festkörpergelenks zwischen diesen Elementen entspricht. Mit φ_c wird der Winkel zwischen den Kontaktpunkten des Zylinders i mit Zylinder $i - 1$ und des Zylinders $i - 1$ mit Zylinder $i - 2$ beschrieben. Für alle Zylinder innerhalb eines Kreissegments gilt zunächst $\varphi_c = 0$, nur im ersten Element des Zylinders entspricht φ_c dem Verdrehwinkel φ_s des zu Grunde liegenden Kreissegments. Jeder Zylinder repräsentiert in der realen Umsetzung der Struktur ein Zwischenelement, das mit Festkörpergelenken mit seinen Nachbarn verbunden ist. Die Parameter zur Beschreibung der Zylinder der Grundstruktur sind in Abb. 11.b dargestellt.

Die Beschreibung der Strukturparameter erfolgt in Vektoren, um die Verarbeitung in MATLAB zu vereinfachen. Für die n_s Segmente sind die Parameter folgendermaßen definiert:

$$\mathbf{r}_s = \begin{bmatrix} r_{s,1} \\ \vdots \\ r_{s,j} \\ \vdots \\ r_{s,m} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\theta}_s = \begin{bmatrix} \theta_{s,1} \\ \vdots \\ \theta_{s,j} \\ \vdots \\ \theta_{s,m} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\varphi}_s = \begin{bmatrix} \varphi_{s,1} \\ \vdots \\ \varphi_{s,j} \\ \vdots \\ \varphi_{s,m} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Analog dazu werden die Parameter der n_c Elemente und der dazugehörigen Festkörpergelenke neben dem skalaren Wert r_c wie folgt zusammengefasst:

$$\mathbf{h}_c = \begin{bmatrix} h_{c,1} \\ \vdots \\ h_{c,i} \\ \vdots \\ h_{c,n_c} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\alpha}_c = \begin{bmatrix} \alpha_{c,1} \\ \vdots \\ \alpha_{c,i} \\ \vdots \\ \alpha_{c,n_c} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\varphi}_c = \begin{bmatrix} \varphi_{c,1} \\ \vdots \\ \varphi_{c,i} \\ \vdots \\ \varphi_{c,n_c} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Um Strukturen zu realisieren, die mehrere Endeffektorendposen und damit auch mehrere Anschlagsstellungen erreichen können, müssen sich bestimmte Parameter der Struktur bzw. Parameter der Raumkurve ändern. Welche Parameter geändert werden und wie die Berechnung dieser Parametersets erfolgt, wird in den folgenden Kapiteln beschrieben. Für eine eindeutige Nomenklatur werden diese folgendermaßen bezeichnet: Werden z.B. bei einer Raumkurve die Werte von $\boldsymbol{\varphi}_s$ geändert, um eine weitere Anschlagsstellung zu erreichen, werden die Werte, welche diese zweite Anschlagsstellung beschreiben, mit $\boldsymbol{\varphi}_s'$ bezeichnet. Eine Struktur mit zwei Endeffektorendposen wird in diesem Beispiel durch \mathbf{r}_s , $\boldsymbol{\theta}_s$, $\boldsymbol{\varphi}_s$ und $\boldsymbol{\varphi}_s'$ beschrieben. Eine dritte Anschlagsstellung wird dann mit $\boldsymbol{\varphi}_s''$ bezeichnet, eine Vierte mit $\boldsymbol{\varphi}_s'''$ usw.

Aufbauend auf den beschriebenen Parameter der Kreissegmente und der Zylinderelemente werden die Formgedächtnisstrukturen konstruiert. Dazu werden hier weitere elementspezifische Parameter eingeführt. In Abb. 12 sind die Elementparameter an einem Beispielelement visualisiert. Der Abstand der Seilzugführung zu der Mittelachse des Zylinders wird mit r_w bezeichnet und der Durchmesser der Seilzugführung mit d_w . Die Variable r_c beschreibt den Radius der Zylinder der Grundstruktur, jedoch muss der tatsächliche Querschnitt der Elemente kein Kreis sein. Wie in Abb. 12 gezeigt, kann die Außenkontur auch andere Formen haben und es können Innenkonturen realisiert werden. Dieser Querschnitt der Strukturen wird mit einer 2D Punktliste (in der SG-Library als CPL) beschrieben und hier als \mathbf{P}_c bezeichnet. Der Abstand des Festkörpergelenks r_f wird zu der Mittelachse des Zylinders gemessen. Die Biegeebene des Festkörpergelenks, das Eintrittsloch des Seilzugs und die Mittelachse des Zylinders liegen dabei in einer Ebene. Bei Festkörpergelenken mit mehr als einem Bewegungsfreiheitsgrad liegt zumindest die angesteuerte Biegeebene in dieser Ebene.

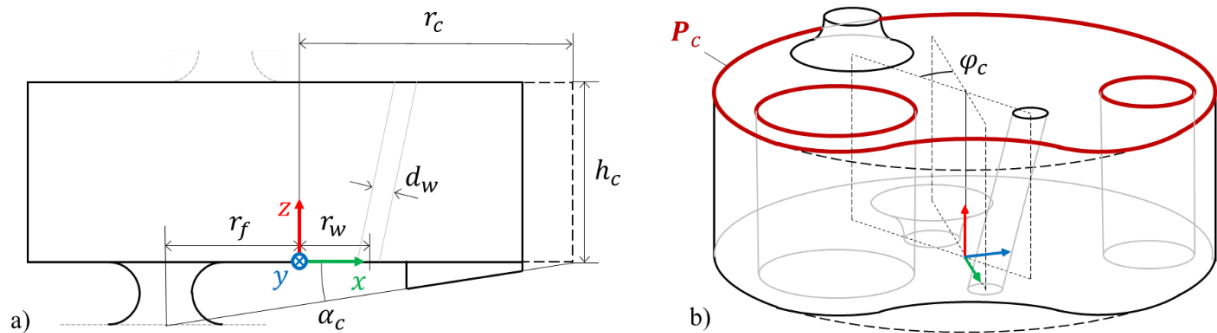


Abb. 12: Grundlegende Parameter zur Beschreibung eines Elements einer Struktur in der a) Schnittansicht und in der b) isometrischen Ansicht (angelehnt an Krieger, Schiele *et al.* 2019 und Krieger 2021).

5.3 Lösungsstruktur

Im Zuge dieser Arbeit wurden verschiedene Konzepte für den Entwurf der Mehrposen-Formgedächtnisstrukturen entwickelt und getestet. Dieses Kapitel beschreibt die verschiedenen mechanischen Konzepte der Strukturen, deren Eigenschaften und die verschiedenen Vor- und Nachteile der Konzepte. Es werden zunächst die drei verschiedenen Konzepte des Aufbaus und der mechanischen Funktionsweise der Mehrposen-Formgedächtnisstrukturen beschrieben. Es folgt die Beschreibung der verwendeten Festkörpergelenke, der Kontaktstrukturen zwischen den Elementen und der Seilzugführungen.

5.3.1 Mechanische Konzepte/Typen der Mehrposen-Formgedächtnisstrukturen

Für den mechanischen Aufbau der Formgedächtnisstrukturen wurden verschiedene Konzepte untersucht. Es werden hier drei verschiedene Typen der Strukturen beschrieben, die erfolgreich gedruckt, aufgebaut und getestet worden sind. Sie unterscheiden sich in der Anzahl der einnehmbaren Endeffektorendposen, der Funktionsweise für das Erreichen dieser Posen, der Ansteuerung und in der Art wie bei der Suche nach einer passenden Struktur vorgegangen wird. Eine Voraussetzung während der Entwicklung der Konzepte war, dass die Strukturen mindestens in zwei beliebig wählbare Anschlagstellungen versteift werden können. Alle Typen eignen sich daher für das Design von Strukturen, die mindestens zwei Endeffektorendposen einnehmen können.

Typ 1 – Strukturen mit mehreren Seilzügen

Das erste mechanische Konzept besteht aus einer Formgedächtnisstruktur, in deren neutralen Faser Festkörpergelenke mit allen Rotationsfreiheitsgrade sitzen. Die Festkörpergelenke haben

dieselben Freiheitsgrade wie Kugelgelenke, daher werden sie als kugelgelenkartige Festkörpergelenke bezeichnet. Die Seilzüge werden auf definierten Pfaden durch die Struktur geführt, welche die verschiedenen Anschlagstellungen bestimmen. Die Lage des Lochs, durch welches der Seilzug in einem Element geführt wird, bestimmt den Kraftangriffspunkt des Seilzugs und damit die Biegeebene zwischen den Elementen. Die Höhe der Elemente, die Auslenkwinkel der Festkörpergelenke und die Anordnung dieser Seilzuglöcher entlang der Struktur bestimmt die gewünschte Anschlagstellung der Struktur. Durch mehrere Seilzugführungen mit unterschiedlichem Abstand zur neutralen Faser, können diese Strukturen in mehrere Konfigurationen ausgelenkt werden. Diese Strukturen benötigen daher pro vorgegebener Endeffektorendpose einen Seilzug. Strukturen, die auf diesem mechanischen Konzept aufgebaut sind, werden im Folgenden als Typ 1 Strukturen bezeichnet. In Abb. 13 ist der Aufbau und die Funktionsweise dieser Art von Festkörpergelenkstrukturen grafisch dargestellt.

In Abb. 14 ist ein einzelnes Element einer solchen Struktur in der Durchsicht und der Draufsicht dargestellt. Einer der beiden Seilzüge verläuft gerade durch das Element, das heißt für die eine Auslenkung der Struktur gibt es an diesem Element keinen Verdrehwinkel ($\varphi_c = 0$). Der andere Seilzug muss die Verdrehung φ_c' des Elements gegenüber dem vorherigen Element abbilden und wird auf dem Radius r_w' durch das Element geführt. Hier wird ersichtlich, dass die Höhe des Elements und der Radius des Seilzugs den Verdrehwinkel begrenzen. Bei der automatisierten Konstruktion der Strukturen muss sichergestellt werden, dass die Seilzugführungen nicht kollidieren. Die Herausforderungen, die sich mit den Seilzugführungen

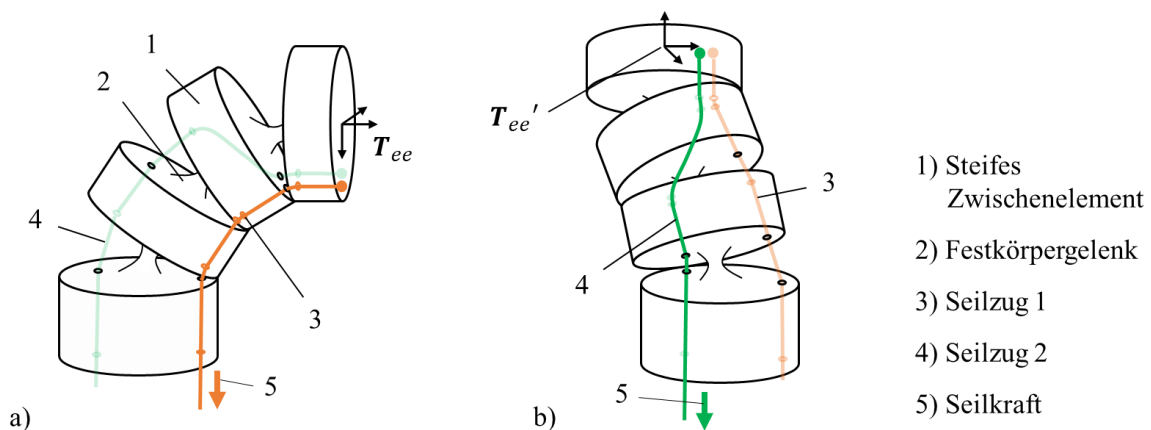


Abb. 13: Eine Typ 1 Formgedächtnisstruktur mit zwei Seilzügen und den beiden resultierenden Konfigurationen a) und b). Die Struktur besteht aus Zwischenelementen (1) und kugelgelenkartigen Festkörpergelenken (2). Die Aktuierung eines Seilzugs (3) bzw. (4) führt zur Auslenkung in die jeweilige Konfiguration (angelehnt an Schiele, Phalen, *et al.* 2021).

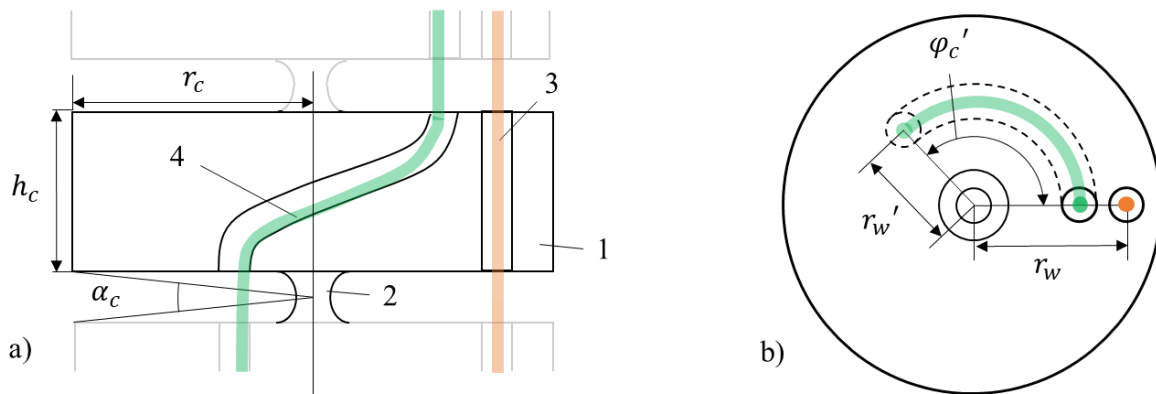


Abb. 14: a) Durchsicht eines Elements (1) einer Typ 1 Formgedächtnisstruktur mit Festkörpergelenk (2) und zwei Seilzügen (3) und (4). b) Draufsicht desselben Elements (angelehnt an Schiele, Phalen, et al. 2021).

ergeben werden, ausführlicher in Kapitel 5.3.4 behandelt. Die hier eingesetzten Festkörpergelenke benötigen Bewegungsfreiheitsgrade in mindestens zwei Rotationsachsen damit sich das Gelenk in mehr als einer Biegeebene bewegen kann. Ein geeignetes Festkörpergelenk für diesen Strukturtyp ist ein rotationssymmetrisches Kreiskerbgelenk wie in Kapitel 5.3.2 beschrieben.

Typ 2 – Antagonistische Strukturen mit zwei Seilzügen

Das zweite mechanische Konzept besteht aus einer Struktur, in dessen neutraler Faser drehgelenksartige Festkörpergelenke sitzen und auf beiden Seiten der Gelenke jeweils ein Seilzug verläuft. Um eine bestimmte Endeffektorendpose im Raum einzunehmen, werden mehrere Segmente mit verdrehten Biegeebenen hintereinander gesetzt. Die einzelnen Segmente lassen sich, bedingt durch den einen Freiheitsgrad der Drehgelenke, nur in einer Ebene bewegen. Sie können aber in zwei Richtungen gedreht werden, indem das Gelenk aus der Nulllage in die positive oder in die negative Drehrichtung bewegt wird. Dazu wird auf beiden Seiten des Gelenks jeweils ein Seilzug durch die Struktur geführt, welche achsensymmetrisch zur Mittelachse der Zylinder durch die Struktur verlaufen. Die maximalen Drehwinkel in beide Drehrichtungen werden durch die Anschläge der Elemente auf der jeweiligen Seite bestimmt.

Bleiben die Anschläge auf den beiden Seiten der Gelenke gleich, bildet die zweite Anschlagstellung der Struktur eine achsensymmetrische Form der ersten Anschlagstellung. Eine zweite davon abweichende Pose kann nun erreicht werden, in dem die Gelenkansschläge auf der Seite des zweiten Seilzugs verändert werden. Damit ergeben sich bei gleicher Segmentlänge neue Segmentradien bzw. Segmentaufspannwinkel im ausgelenkten Zustand der

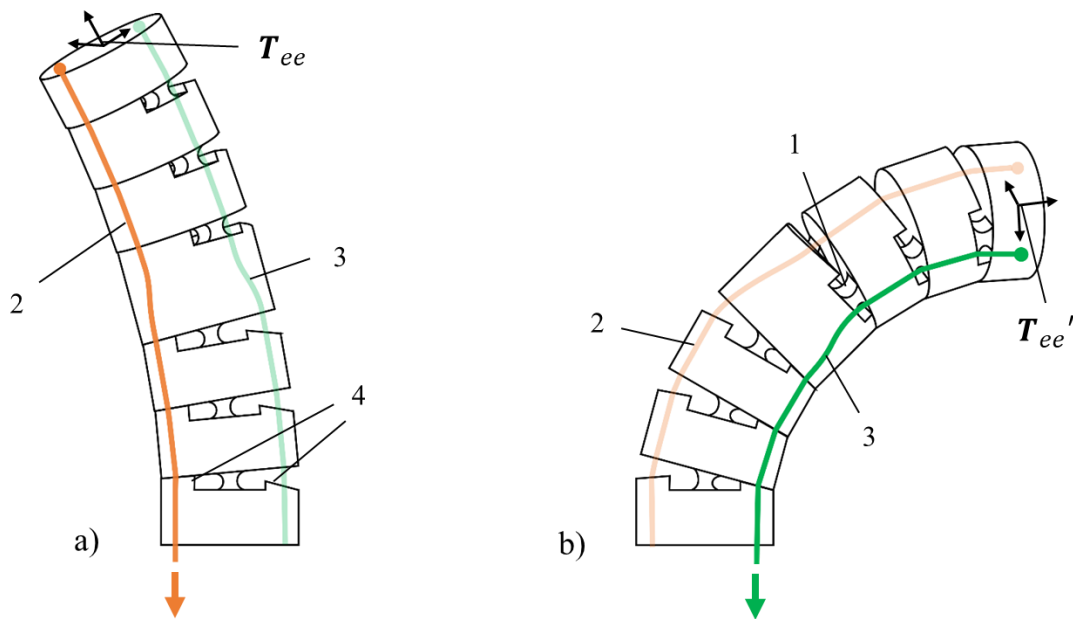


Abb. 15: Funktionsprinzip einer antagonistischen Struktur (Typ 2 Formgedächtnisstruktur) mit drehgelenksartigen Festkörpergelenken (1) in den beiden Anschlagstellungen (a) und (b). Mit zwei symmetrisch verlaufenden Seilzügen (2) bzw. (3) und unterschiedlich hohen Anschlägen auf beiden Seiten (4) werden die beiden Konfigurationen erreicht.

Struktur. In der mathematischen Beschreibung der Kreissegmente der Raumkurve wird das durch einen zusätzlichen Parametervektor \mathbf{r}_s' oder $\boldsymbol{\theta}_s'$ beschrieben. In Abb. 15 ist der Aufbau und die Funktionsweise dieser Art von Festkörpergelenkstrukturen grafisch dargestellt.

Werden die Strukturen im geraden Zustand gedruckt, kann jedes Segment j mit dem Winkel $\theta_{s,j}$ in die eine Richtung und dementsprechend mit dem negativen Winkel $\theta_{s,j}'$ in die zweite Richtung gebogen werden. Durch unterschiedlich hohe Gelenkansschläge auf beiden Seiten können sich die Beträge der beiden Winkel unterscheiden. In Abb. 16.a und Abb. 16.b ist ein Beispiel eines Segments mit zwei unterschiedlich hohen Anschlägen dargestellt. Die Eigenschaft dieser Winkel $\theta_{s,j}$ und $\theta_{s,j}'$, unterschiedliche Vorzeichen zu haben, ist nicht immer von Vorteil, z.B. bei zwei nah beieinander liegenden Endeffektorendposen. Um den Lösungsraum zu vergrößern und damit die Lösungsfindung zu vereinfachen, kann die Struktur auch in einem gekrümmten Zustand gedruckt werden, wie in Abb. 16.c gezeigt. Damit können zwei Segmentwinkel mit gleichem Vorzeichen oder wie in Abb. 16.d sogar gerade Segmentkonfigurationen erreicht werden. Dies ist nur für Anwendungen sinnvoll, die eine vorgekrümmte Struktur in der unausgelenkten Konfiguration zulassen.

Zusätzlich können analog zu Typ 1 Strukturen die Winkel φ zwischen den Segmenten geändert werden, um eine zweite Endeffektorendpose zu erreichen. Hier gilt allerdings die zusätzliche Bedingung:

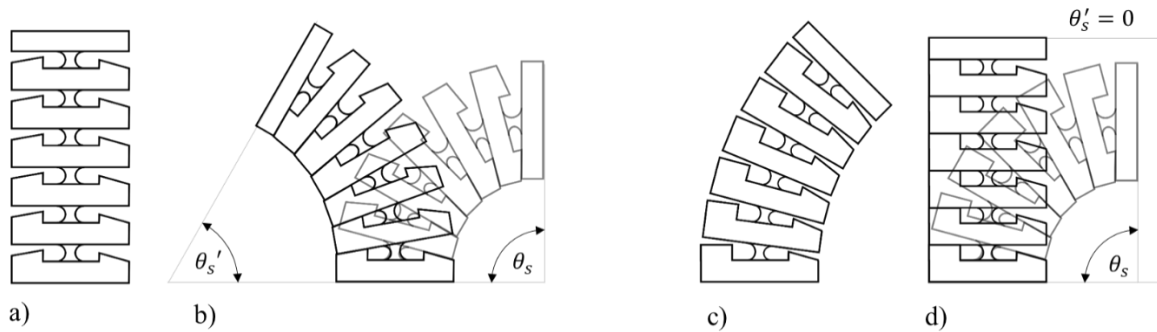


Abb. 16: a) Unausgelenkter Modus eines Segments und b) die ausgelenkten Modi mit zwei unterschiedlichen Segmentwinkel durch verschiedene Gelenkanschlüsse. c) Segment mit gekrümmtem unausgelenktem Modus und d) einer gekrümmten und einer geraden Konfiguration im ausgelenkten Modus.

$$\varphi_{s,j} = \varphi'_{s,j} + \pi/2 \quad (5.3)$$

da durch die Drehgelenke die Biegeebenen der Segmente immer um einen Winkel von 180° verdreht sein müssen. Strukturen, die auf diesem mechanischen Konzept aufgebaut sind, werden im Folgenden als Typ 2 Strukturen bezeichnet.

Typ 3 – Konzentrische Strukturen

Die Motivation die Strukturen so aufzubauen, dass mehrere Endeffektorendposen erreicht werden können, ohne dass für jede neue Konfiguration weitere Seilzüge oder Aktoren hinzugefügt werden müssen, führt zu einem weiteren mechanischen Konzept. Bei diesen Strukturen sind mindestens zwei Formgedächtnisstrukturen konzentrisch ineinander verschachtelt und können axial zueinander verdreht werden.

Die beiden einzelnen Strukturen sind ähnlich wie die Einposen-Formgedächtnisstrukturen aufgebaut. Die Strukturen haben einen Seilzug, der durch die Mittelachsen der Elemente verläuft und durch die innerste Struktur geführt wird. Wird an ihm gezogen, führt das zu einer Auslenkung der gesamten Struktur. Wie Typ 2 Strukturen haben diese Art der Formgedächtnisstrukturen Festkörpergelenke mit einem Freiheitsgrad äquivalent zu einem Drehgelenk. Eine Auslenkung eines einzelnen Gelenks erfolgt nur, wenn die Drehachsen der Gelenke der inneren und der äußeren Struktur an dieser Stelle der Struktur parallel liegen und somit die Biegeebenen von innerem und äußerem Gelenk übereinstimmen. Wenn die Biegeebenen zweier Strukturen nicht übereinstimmen, wird der Mechanismus an dieser Stelle nicht ausgelenkt. Anders erklärt, entspricht das Verhalten des Mechanismus einem logischen UND-Gatter für die Biegung an jedem Gelenk. Da eine relative Drehung zwischen der inneren und der äußeren Struktur möglich ist, können sie so gestaltet werden, dass bestimmte Segmente

der Struktur bei einer bestimmten relativen Verdrehung parallele Drehachsen der Gelenke aufweisen. Dies ermöglicht die Kodierung von Mechanismen, bei der einige Segmente der Gesamtstruktur gebogen (Drehachsen parallel) und andere gerade (Drehachsen nicht parallel) sind. Auf diese Weise kann die Struktur verschiedene Konfigurationen einnehmen, obwohl nur ein Seilzug betätigt wird. In Abb. 17 ist der Aufbau und die Funktionsweise der konzentrischen Festkörpergelenkstrukturen grafisch dargestellt.

Diese Strukturen können als eine diskretisierte alternative Umsetzung der Concentric Tube Robots (Dupont *et al.* 2010) betrachtet werden, wobei hier die Bewegungsfreiheit einer stark vereinfachten Aktuierung und Steuerung weicht. Bei dieser Art der Formgedächtnisstrukturen werden unabhängig von der Anzahl der Endeffektorendposen nur zwei Aktuatoren benötigt. Ein Aktuator betätigt den Seilzug und ein Zweiter führt eine relative Drehung der inneren Struktur zur äußeren Struktur aus. Die Anzahl der möglichen Endeffektorendposen hängt von der Anzahl der Kombinationen von blockierenden und nicht blockierenden Segmenten ab. Auch wenn die beiden verschachtelten Strukturen beweglich zueinander sein müssen, ist es möglich die Strukturen als montagefreie Mechanismen in einem Teil herzustellen. Im

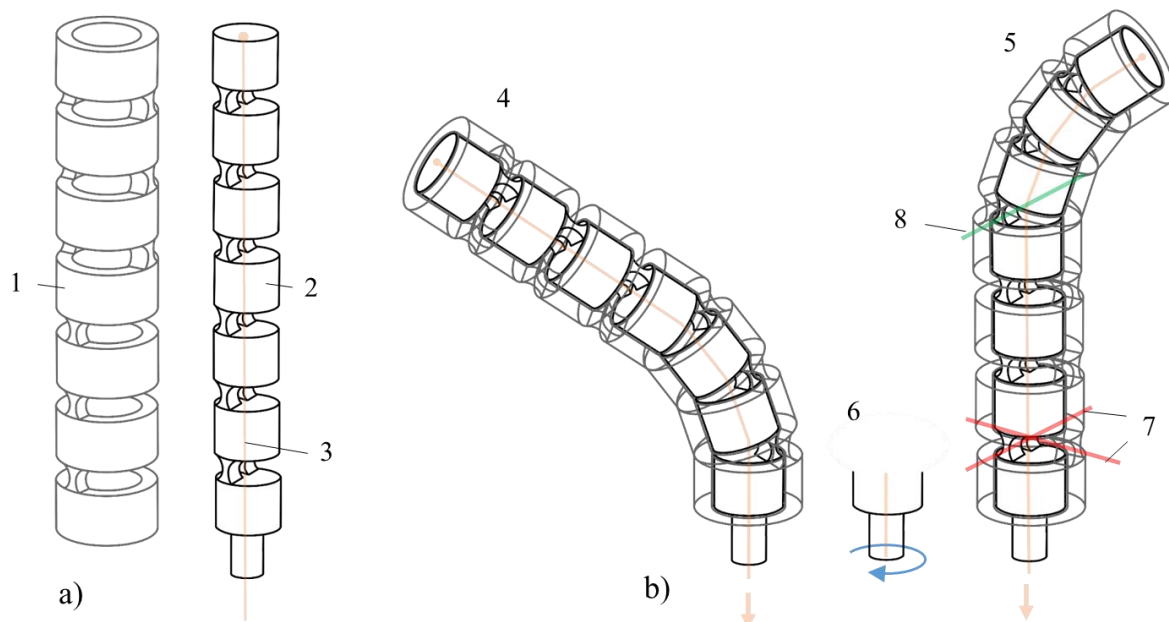


Abb. 17: a) Eine konzentrische Struktur (Typ 3 Formgedächtnisstruktur) besteht aus einer äußeren (1) und einer inneren Struktur (2) mit einem zentralen Seilzug (3). b) Um zwischen den Konfigurationen (4) und (5) zu wechseln, wird die innere Struktur im nicht ausgelenkten Zustand relativ zur äußeren verdreht (6), bis die Gelenke in einer bestimmten Ausrichtung stehen: blockierend bzw. nicht parallele Drehachsen (7) oder beweglich bzw. parallele Drehachsen (8) (angelehnt an Schiele *et al.* 2021).

SLS-Verfahren können die Teile in einem Stück, ohne den Einsatz von Stützstrukturen gefertigt werden. Strukturen, die auf diesem mechanischen Konzept aufgebaut sind, werden im Folgenden als Typ 3 Strukturen bezeichnet.

Vergleich der Konzepte

Die verschiedenen mechanischen Konzepte haben unterschiedliche Eigenschaften im Hinblick auf die Anzahl der einnehmbaren Endeffektorendposen, die Herstellbarkeit in verschiedenen additiven Fertigungsverfahren, die Nachbearbeitung, die Montage und die Aktuierung der Strukturen. Diese Eigenschaften bringen verschiedene Vor- und Nachteile mit sich, welche hier zusammengefasst werden.

Die einnehmbaren Endeffektorendposen sind bei Typ 2 durch den mechanischen Aufbau auf zwei begrenzt, während Typ 1 und Typ 3 theoretisch eine beliebige Anzahl an Endeffektorendposen zulässt. In der Praxis ist die Anzahl der Posen auch bei diesen zwei Typen begrenzt. Bei Typ 1 Strukturen beansprucht jeder Seilzug einen gewissen Platz, dementsprechend begrenzt der Querschnitt der Strukturen die Anzahl der Seilzugführungen. Das spielt insbesondere eine Rolle, wenn die Seilzüge auf festgelegten Radien durch die Struktur geführt werden (s. dazu auch Kapitel 5.3.4). Die maximale Anzahl der Posen bei Strukturen von Typ 3 kommt daher, dass der Verdrehwinkel der beiden Strukturen zwischen den Zuständen „blockieren“ und „nicht blockieren“ nicht beliebig klein gewählt werden kann. In der Theorie reicht zwar eine beliebig kleine relative Verdrehung der Gelenkachsen der beiden Strukturen, um ein Blockieren zu erreichen. In der Praxis muss die Verdrehung aber größer als einen Mindestwinkel sein, da sich sonst durch das Spiel zwischen den Strukturen, auch bei „blockierten“ Gelenken zumindest eine kleine Auslenkung feststellen lässt. Durch diese Einschränkung wird die Anzahl der möglichen Posen wieder reduziert. Optimalerweise wird der Winkel so groß wie möglich gewählt, also bei zwei Posen ein relativer Winkel der Drehachsen der Gelenke von 90° .

Bei bestimmten Anwendungen ist die Beweglichkeit im nicht aktuierten Zustand eine nützliche Eigenschaft der Formgedächtnisstrukturen. Werden die Strukturen als Führungssysteme eingesetzt, um in schwer zugänglichen Bereichen Manipulationen durchzuführen, wie z.B. in der minimalinvasiven Chirurgie, ist diese Flexibilität für das Einführen der Strukturen erforderlich. Die Strukturen von Typ 1 haben durch die kugelgelenksartigen Festkörpergelenke eine hohe Anzahl an Bewegungsfreiheitsgraden und sind dementsprechend beweglich. Strukturen von Typ 2 und Typ 3 sind im Vergleich dazu durch die drehgelenksartigen Festkörpergelenke in ihrer passiven Bewegungsfreiheit stärker eingeschränkt.

Die drei Strukturtypen können alle im SLS-Verfahren hergestellt werden, jedoch eignen sich nur Typ 2 und Typ 3 für die Herstellung mit einem FDM-Drucker. Dies ist hauptsächlich auf die Art der Festkörpergelenke zurückzuführen. Drehgelenksartige Festkörpergelenke sind im FDM-Verfahren einfacher herzustellen als Gelenke mit einer höheren Anzahl an Rotationsfreiheitsgraden. Auch der Aufwand der Nachbearbeitung und Montage der Strukturen hängt stark von dem eingesetzten additiven Fertigungsverfahren ab. Im SLS-Verfahren ist die Restpulverentfernung der aufwändigste Nachbearbeitungsschritt, insbesondere die Reinigung der Seilzugführungen kann hier ein Problem darstellen. Bei Strukturen von Typ 1 und 2 ist das Einführen der Seilzüge aufwendiger als bei Typ 3, da die Seilzugführungen nicht gerade durch die Struktur laufen. Besonders bei kleinem Elementhöhen h_c und einem großen Abstand des Seilzugs zur Mittelachse r_w kommt es zu großen Krümmungen der Seilzugführung, was neben dem erschwerten Einführen der Seilzüge zu großen Reibungseffekten führt. Abhängig von r_w und h_c darf der Verdrehwinkel φ_c eines Elements daher bestimmte Werte nicht überschreiten. Das Problem der Seilzugführungen wird genauer in Kapitel 5.3.4 dargelegt. Werden Typ 3 Strukturen als montagefreie Mechanismen gefertigt, ist auch hier die Pulverentfernung der arbeitsintensivste Schritt. Werden die Strukturen im FDM-Verfahren hergestellt ist keine Nachbearbeitung nötig, da die Strukturen so aufgebaut sind, dass auf Stützstrukturen verzichtet werden kann. Eine ausführliche Beschreibung zu der Herstellung der Strukturen mit den verschiedenen additiven Fertigungsverfahren erfolgt in Kapitel 10.

Die Aktuierung der Strukturen erfolgt über das Aufwickeln der Seilzüge durch einen Motor. Strukturen von Typ 1 benötigen für jeden Seilzug einen Aktuator. Die Anzahl der Motoren steigt somit mit der Anzahl der Endeffektorendposen der Struktur. Es können gegebenenfalls die beiden Drehrichtungen eines Motors für das Aufwickeln zweier Seilzüge verwendet werden, dementsprechend ist auch eine Realisierung mit halb so viele Aktuatoren wie Seilzüge möglich. Analog dazu kann die Auslenkung der Strukturen von Typ 2 über einen einzigen Motor erfolgen. Der Vorteil der konzentrischen Strukturen (Typ 3) ist, dass auch bei mehr als zwei Endeffektorendposen immer nur zwei Aktuatoren gebraucht werden. Ein Aktuator lenkt die Struktur über den Seilzug aus und ein zweiter Aktuator verdreht die innere Struktur im unausgelenkten Zustand in die jeweilige relative Position.

5.3.2 Festkörpergelenke

Die Wahl der eingesetzten Festkörpergelenke hängt von dem mechanischen Typ der Formgedächtnisstruktur ab. Für Typ 2 und Typ 3 Strukturen können drehgelenksartige Festkörpergelenke eingesetzt werden. Dabei sind Kreiskerbgelenke mit einem Kerbradius als halbe Gelenkhöhe durch ihren unveränderlichen Rotationsmittelpunkt von Vorteil, wie in Abb. 18.a dargestellt (s. auch Kapitel 2.5.2). Die Torsionssteifigkeit in der z-Achse der Gelenke wird erhöht, indem zwei entlang der Drehachse versetzte Gelenke verwendet werden. Die Eigenschaft eines annähernd unveränderlichen Rotationsmittelpunkts haben auch rotationssymmetrische Kreiskerbgelenke, wie in Abb. 18.b dargestellt. Diese können durch die zusätzlichen Rotationsfreiheitsgrade um alle Raumachsen gedreht werden. Wird der Querschnitt dieser Gelenke betrachtet (Abb. 18.c), besteht dieser aus zwei halbkreisförmigen Kerben, das heißt hier beschreiben d_f und h_f das Gelenk eindeutig. Diese Gelenktypen wurden bereits für den Einsatz in SLS-gefertigten Festkörpergelenkstrukturen in Roppenecker (2017), Krieger, Schiele *et al.* (2019) und Krieger (2021) beschrieben.

Die mechanischen Eigenschaften von additiv gefertigten Teilen können sich stark anisotrop verhalten. Bei Verfahren, die mit thermoplastischen Kunststoffen arbeiten wie das FDM oder das SLS-Verfahren, kommt es zwischen den einzelnen Druckschichten zu Schwachstellen im Material, da hier das aufgeschmolzene Material mit einer bereits kälteren Schicht verbunden wird. Ein Versagen der Teile unter Last tritt daher meist zwischen diesen Schichten auf. Soweit möglich sollten im SLS-Verfahren hergestellte Festkörpergelenke so gedruckt werden, dass die Gelenke mit ihrer Drehachse senkrecht zur Druckebene liegen. Damit werden die höchsten Festigkeiten der Gelenke erreicht (Krieger *et al.* 2017). Da die Drehachsen der Gelenke innerhalb einer Formgedächtnisstruktur jedoch unterschiedliche Orientierungen haben, ist das

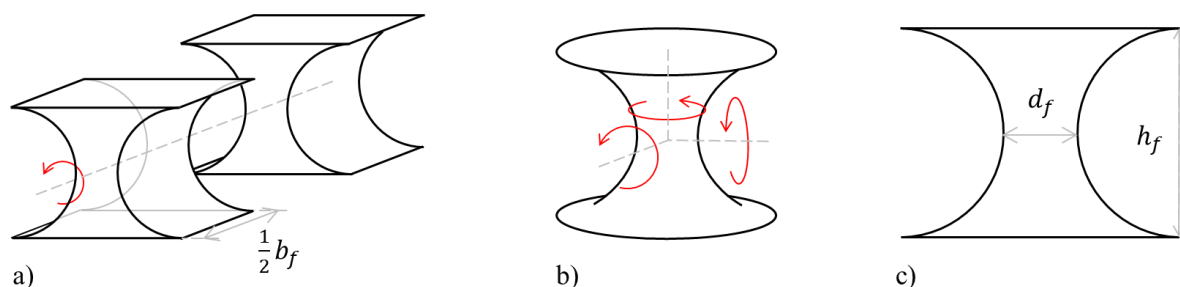


Abb. 18: a) Drehgelenkartiges Kreiskerbgelenk mit einem Kerbradius als halbe Gelenkhöhe und b) analog dazu ein kugelgelenkartiges Kreiskerbgelenk. Die roten Pfeile stellen die Rotationsfreiheitsgrade dar. c) Seitenansicht der beiden Gelenktypen mit den Parametern d_f (Dicke an der dünnsten Stelle) und h_f (Gelenkhöhe) (angelehnt an Krieger, Schiele *et al.* 2019 und Krieger 2021).

im Normalfall nicht bei allen Gelenken möglich. Es sollte aber auf jeden Fall vermieden werden, die Gelenke so zu drucken, dass eine Druckschicht parallel zu dem dünnsten Querschnitt des Gelenks liegt, da die Gelenke hier am anfälligsten für Ermüdungsbrüche sind.

Abgesehen vom mechanischen Typ der Formgedächtnisstruktur hängt die Auswahl geeigneter Festkörpergelenke stark von dem eingesetzten additiven Fertigungsverfahren ab. Die beschriebenen Kerbgelenke sind in anderen additiven Fertigungsverfahren als dem SLS-Verfahren nur bedingt oder gar nicht herstellbar. Während im SLS-Verfahren durch die hohe Auflösung und die hohe Bruchfestigkeit eine Vielzahl an verschiedenen Gelenkstrukturen realisierbar sind, führen preiswertere Drucktechnologien wie der FDM-Druck zu größeren Einschränkungen in der Designfreiheit der Festkörpergelenke. Um im FDM-Druckverfahren additiv fertigmögliche Festkörpergelenke herstellen zu können und damit die Formgedächtnisstrukturen auch in diesen Verfahren fertigen zu können, wurde ein drehgelenkartiges Festkörpergelenk bzw. ein nachgiebiger Mechanismus entwickelt, der auch im FDM-Verfahren hergestellt werden kann. Eine genauere Beschreibung dieses Gelenktyps erfolgt in Kapitel 10.2.

5.3.3 Kontaktstrukturen

Eine Formgedächtnisstruktur erreicht die vorgegebene Anschlagstellung, sobald alle Elemente vollständig ausgelenkt sind, was bedeutet, dass jedes Element Kontakt mit seinen beiden Nachbarelementen hat. In den vorherigen Arbeiten konnte bereits gezeigt werden, dass die Art der Kontaktstrukturen zwischen den einzelnen Elementen eine große Auswirkung auf die Genauigkeit der Endeffektorendposen der Strukturen hat (Krieger, Schiele *et al.* 2019), da sich kleine Winkelfehler bei den Anschlagpositionen der Gelenke stark auf den Positionsfehler des Endeffektors auswirken können. Hier wurden bereits drei verschiedene Arten von Kontaktstrukturen implementiert und getestet. Mit einer vorhandenen Kontaktstruktur wie in Abb. 20.b und Abb. 20.c konnte die Genauigkeit der erreichten Endeffektorendpose signifikant erhöht werden.

Diese Kontaktstrukturen waren auf Einposen-Formgedächtnisstrukturen ausgelegt und daher nur bedingt für Mehrposen-Strukturen geeignet. Für Typ 2 und Typ 3 Strukturen können diese Kontaktgeometrien weiterverwendet werden, da hier nach wie vor drehgelenkartige Festkörpergelenke eingesetzt werden. Die Kontaktgeometrie muss so nur in beide Auslenkrichtungen integriert werden (s. Abb. 19). Die Anschläge auf beiden Seiten bestimmen die Auslenkwinkel α_i und α_i' der Elemente und damit die maximale Auslenkung der Gelenke

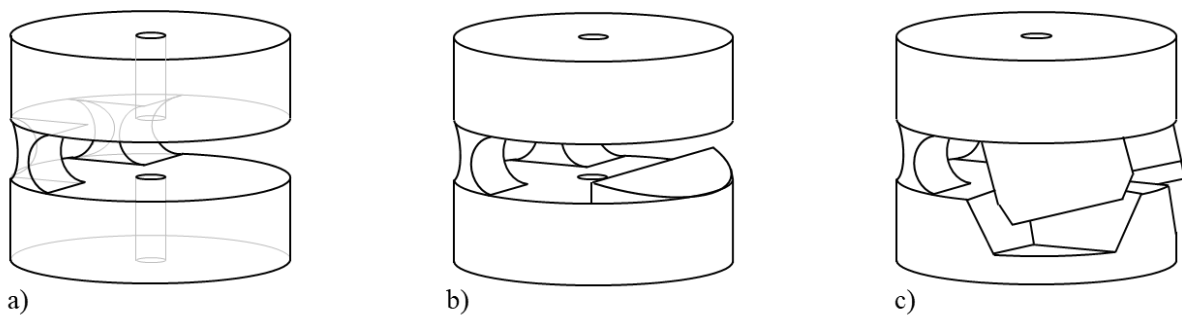


Abb. 20: Kontaktstrukturen für die Einposen-Formgedächtnisstrukturen. Es wurden bisher die abgebildeten Optionen implementiert und getestet: a) keine Kontaktstruktur, b) flächige Kontaktstruktur, c) Verzahnungsstruktur (angelehnt an Krieger, Schiele *et al.* 2019).

in die beiden Auslenkrichtungen. Durch unterschiedlich hohe Anschläge können (wie schon bei den Typ 2 Strukturen beschrieben) unterschiedliche Werte für α_i und α_i' erreicht werden.

Für Typ 1 Strukturen werden andere Kontaktgeometrien benötigt, da sich bei ihnen die Drehachsen der Gelenke in den jeweiligen Konfigurationen unterscheiden. Daher wurden im Zuge dieser Arbeit weitere Kontaktstrukturen implementiert und getestet. In einem ersten Schritt wurde die flächige Kontaktstruktur aus Abb. 19.b für Strukturen mit mehreren beliebigen Biegeebenen erweitert, wie in Abb. 21.a dargestellt. Im Gegensatz zu Abb. 19.b berühren sich die Elemente hier im ausgelenkten Zustand auf einer Linie und nicht auf einer Fläche. Durch den Rotationsfreiheitsgrad um die z-Achse können sich die kugelgelenkartigen Festkörpergelenke bei dem Auslenken der Strukturen um diese Achse verdrehen. Die Seilzüge lassen zwar nur kleine Verdrehungen um die z-Achse zu, allerdings können selbst kleine Winkelfehler zu großen Fehlern am Endeffektor führen. Um dieser Fehlerquelle entgegenzuwirken, wurde eine weitere Kontaktstruktur mit einer sinusförmigen Verzahnungsstruktur entworfen. Diese soll die ungewollte Torsion um die z-Achse minimieren

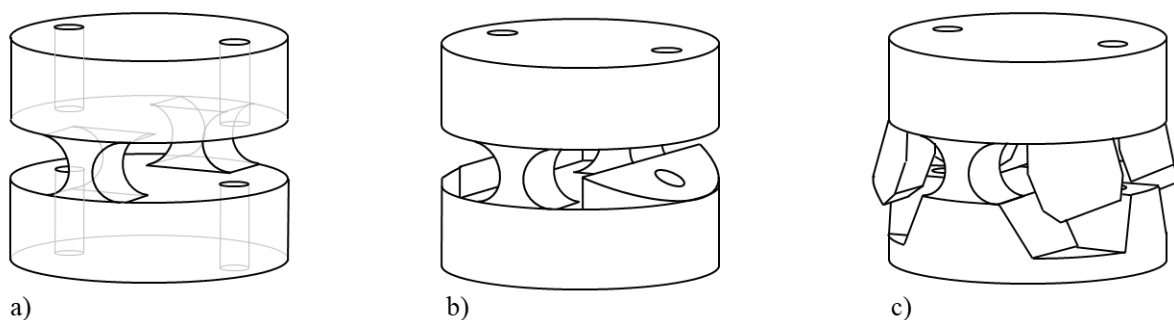


Abb. 19: Kontaktstrukturen für die Mehrposen-Formgedächtnisstrukturen von Typ 2 und Typ 3 (s. Kapitel 5.3.1): Die bisherigen Anschlagstypen können übernommen werden, indem die Anschlaggeometrie auf der zweiten Seite ergänzt wird.

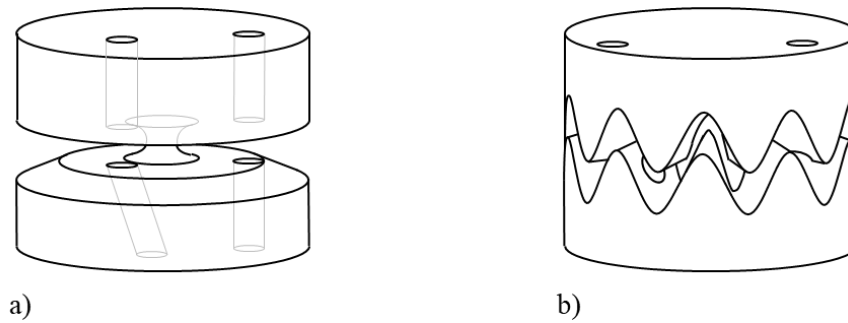


Abb. 21: Kontaktstrukturen für Typ 1 Formgedächtnisstrukturen mit zwei oder mehr unterschiedlichen Biegeebenen: a) abgewinkelte Kontaktfläche, b) abgewinkelte Kontaktfläche mit Verzahnungsstruktur. Die benachbarten Elemente berühren sich bei a) und b) im ausgelenkten Zustand auf einer Linie.

und so zu einer höheren Genauigkeit der Strukturen führen. In Abb. 21.b ist ein Beispiel für eine solche Kontaktstruktur abgebildet.

Alle der vorgestellten Kontaktgeometrien können nun entweder in den Bereich zwischen die Elemente gesetzt oder mit in den Körper der Elemente integriert werden. Am Beispiel der neuen Kontaktstruktur wird das in Abb. 22.a und Abb. 22.b veranschaulicht. Werden die Kontaktstrukturen zwischen die Elemente gesetzt, verringert sich durch die zusätzlichen Strukturen der minimale Abstand zwischen den Elementen. Der Abstand zwischen den Elementen steht in direktem Zusammenhang zu dem Auslenkwinkel und ist oftmals schon an der Grenze der minimalen Spaltbreite des additiven Fertigungsverfahrens. Das bedeutet, wenn die Kontaktgeometrien zwischen die Elemente gesetzt werden, müssen diese bei der minimalen Spaltbreite mit einberechnet werden und vergrößern damit den realisierbaren minimalen Auslenkwinkel. Damit wird der bereits eingeschränkte Konfigurationsraum der Strukturen weiter verkleinert. Besonders bei kleinen Strukturen mit einem Elementabstand von unter

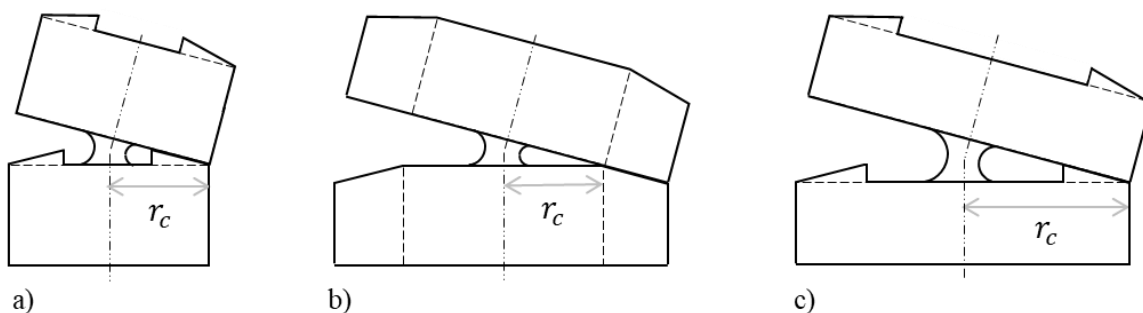


Abb. 22: Verschiedene Möglichkeiten der Realisierung der Kontaktgeometrie durch a) Hinzufügen eines Anschlags zwischen den Elementen, b) Vergrößern des Strukturquerschnitts und Integration in den Körper des Elements und c) Vergrößern des Zylinderradius r_c .

einem Millimeter kann das zu Problemen führen, da dann der (durch das additive Fertigungsverfahren vorgegebene) Mindestabstand zweier Elemente zueinander unterschritten werden kann, oder im Fall von pulverbasierten Druckverfahren die Restpulverentfernung zwischen den Elementen zu einem Problem wird. Um dem entgegenzuwirken, kann die Kontaktgeometrie mit in das Element integriert werden. Damit wird ein Teil des Elements abgeschnitten, anstatt eine Kontaktstruktur zwischen den Elementen einzufügen. Im Falle der neuen Kontaktgeometrie in Abb. 21 wird dabei der obere Teil eines Elements mit dem Auslenkwinkel abgeschrägt, um den Kontaktbereich der beiden benachbarten Elemente zu vergrößern. Allerdings bedeutet das auch, dass bei einem gegebenen Zylinderradius r_c (also dem Zylinderradius, mit dem die Zylinder an die Raumkurve gefittet werden) der Querschnitt P_c der finalen Struktur vergrößert werden muss (s. Abb. 22.b). Außerdem muss überprüft werden, ob die Elemente bei gegebenem Auslenkwinkel hoch genug sind, um eine Kollision mit dem übernächsten Element zu vermeiden. Alternativ kann der Radius r_c bei der Berechnung der Grundstruktur vergrößert werden, was den Abstand zwischen den Elementen vergrößert und die Elementhöhe verkleinert. Welche dieser Möglichkeiten umgesetzt wird, hängt implizit von der Wahl von r_c und des Querschnitts P_c der Strukturen ab.

5.3.4 Seilzugführungen

Bei der Erstellung von Strukturen mit nur einer Endeffektorendpose ist die Führung des Seilzugs in den meisten Fällen trivial. Die Seilzugführung wird einfach in das Zentrum der Struktur gelegt und die Festkörpergelenke definieren mit ihren Positionen die Drehachsen an jedem Element (s. Abb. 23.a). Bei Strukturen mit mehreren Endeffektorendposen ist dies nur bei Typ 3 Strukturen möglich. Auch hier wird der Seilzug in die Mittelachse der Struktur gelegt und die relative Ausrichtung der beiden äußeren Festkörpergelenkstrukturen definieren die

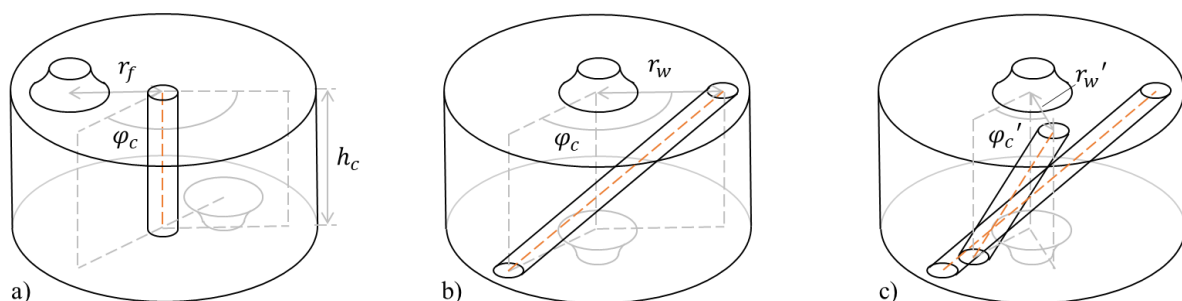


Abb. 23: Seilzugführungen durch ein Element: a) Bei einem Seilzug im Zentrum des Elements spielt der Verdrehwinkel φ keine Rolle. b) Seilzugführung außerhalb des Zentrums mit gerader Verbindung von Eintritts- und Austrittspunkt. c) Kollision zweier Seilzugführungen mit gerader Verbindung von Eintritts- und Austrittspunkt.

Auslenkung. Liegt jedoch ein Seilzug wie in Abb. 23.b außerhalb der Mittelachse, sind Eintrittspunkt des Seilzugs an der Unterseite des Elements und Austrittspunkt an der Oberseite des Elements um den Winkel φ_c verdreht. Typ 1 und Typ 2 Strukturen setzen voraus, dass es mindestens zwei Seilzüge außerhalb der Mittelachse gibt, daher muss sichergestellt werden, dass diese Seilzugführungen im automatisierten Konstruktionsprozess nicht kollidieren. Um dies zu vermeiden, wird in einem ersten Schritt festgelegt, dass sich die Abstände der unterschiedlichen Seilzüge (r_w , r_w' , usw.) zur Mittelachse unterscheiden. Je größer der Abstand des Seilzugs zur Mittelachse, desto kleiner ist die benötigte Seilkraft, um das Festkörpergelenk auszulenken, daher wird r_w so groß wie möglich gewählt. Der Abstand zweier Seilzüge muss mindestens den Lochdurchmesser d_w plus einen Mindestabstand $d_{th,min}$ betragen. Der Wert $d_{th,min}$ ergibt sich aus der minimalen Wandstärke des Druckverfahrens. Also gilt für r_w' mit unterschiedlichen Seilzuglochdurchmessern:

$$r_w' \leq r_w - \left(\frac{1}{2}d_w + \frac{1}{2}d_w' + d_{th,min}\right) \quad (5.4)$$

In dem Beispiel in Abb. 23.b und Abb. 23.c ist die Verbindung von Ein- und Austrittspunkt des Seils mit einer geraden Führung realisiert. In Abb. 23.c kollidieren die Führungen trotz unterschiedlicher Ein- und Austrittspunkte. Soll heißen, auch die Form der Verbindung der Ein- und Austrittspunkte des Seils muss so gewählt werden, dass Kollisionen ausgeschlossen werden können. Eine einfache Lösung hierfür ist die einzelnen Seilzüge nur auf bestimmten Radien durch die Struktur laufen zu lassen. So wird gewährleistet, dass die Seilzugführungen in vorgegebenen Bereichen verlaufen und es keine Kollisionen zum einen der Seilzüge untereinander und zum anderen zwischen Seilzug und anderen innenliegenden Strukturen wie Führungskanälen für Werkzeuge oder Kabel gibt. In Abb. 24.a ist ein Element mit einer solchen

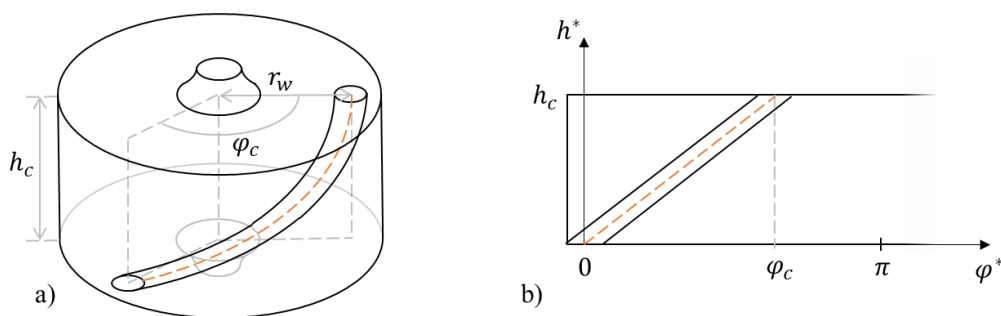


Abb. 24: Seilzugführung durch ein Element: a) Hier wird die Seilzugführung auf dem Radius r_w durch die Struktur geführt. b) „Ausgerollte“ Ansicht Seilzugführung: Die Steigung der Führung ist konstant.

Struktur abgebildet. In Abb. 24.b ist die Steigung dieser Führung visualisiert, indem das Element auf Höhe des Radius r_w (also auf Höhe der Seilzugführung) abgerollt wird.

Die Variablen h^* und φ^* werden hier verwendet, um die Seilzugführung innerhalb eines Elements als Funktion zu beschreiben (während h_c und φ_c die tatsächlichen Werte von Höhe und Verdrehwinkel des Elements beschreiben). Die Höhe h^* in Abhängigkeit von Winkel φ^* berechnet sich dabei mit:

$$h^* = \frac{h_c}{\varphi_c} \varphi^* \quad (5.5)$$

Besonders bei großen Verdrehwinkeln φ_c ergeben sich Unstetigkeiten („Knicke“) oder große Krümmungen in den Seilzugführungen. Diese führen zu einer hohen Reibung zwischen Seilzug und Struktur und somit zu sehr hohen Seilkräften. Zum einen ist so die vollständige Auslenkung der Strukturen nicht mehr möglich, da die Seilzüge reißen oder die Strukturen auf Grund der hohen Kräfte Schaden nehmen, zum anderen lassen sich die Seilzüge unter Umständen erst gar nicht in die Struktur einführen. Um starke Knicke in den Seilzügen zu vermeiden und das Einführen des Seilzugs bei der Montage zu vereinfachen, wurde eine weitere Anpassung der Seilzugführungen vorgenommen. Dabei taucht der Seilzug am Ein- und Austrittspunkt senkrecht zur Oberfläche in das Element ein. In Abb. 25.a und Abb. 25.b ist diese Art der Seilzugführung visualisiert. Die Führung folgt dabei einer trigonometrischen Funktion und wird mathematisch wie folgt beschrieben:

$$h^*(\varphi^*) = \frac{h_c}{\pi} \cdot \cos^{-1} \left(1 - \frac{2 \cdot \varphi^*}{\varphi_c} \right) \quad \text{bzw.} \quad \varphi^*(h^*) = \frac{\varphi_c}{2} \cdot \left(1 - \cos \left(\frac{\pi}{h_c} h^* \right) \right) \quad (5.6)$$

Aufbauend auf diese Art der Seilzugführung soll nun ein Zusammenhang ermittelt werden, mit dem der maximale Verdrehwinkel $\varphi_{c,max}$ eines Elements bei einem bestimmten Radius r_w und

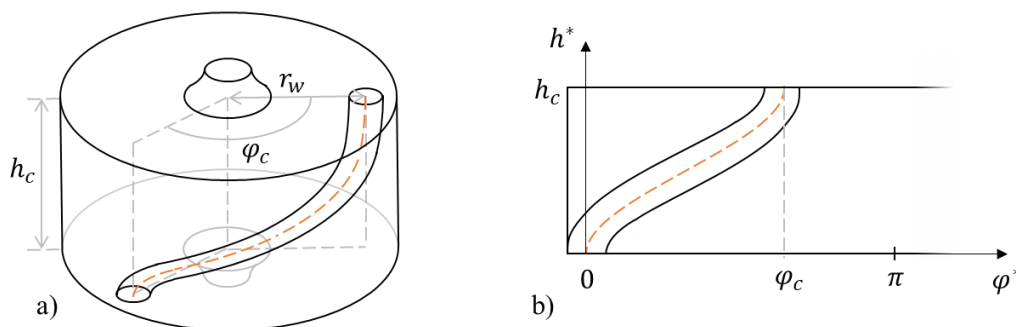


Abb. 25: Seilzugführung durch ein Element: a) Auch hier läuft die Führung auf dem Radius r_w durch die Struktur. b) Wird die Höhe der Kurve über den Verdrehwinkel geplottet, folgt diese nun jedoch dem Zusammenhang aus Formel (5.6).

einer bestimmten Elementhöhe h_c ermittelt werden kann. Dieser Zusammenhang ist für die Auslegung der Strukturen wichtig, da er bei der Berechnung der Strukturen im Zuge der Rückwärtskinematik benötigt wird: Der maximale Verdrehwinkel $\varphi_{c,max}$ begrenzt dabei die Gelenkwinkel der Gelenke der Ersatzkinematik (für mehr Details siehe Kapitel 6.2), daher sollte eine möglichst große Verdrehung φ_c innerhalb eines Elements möglich sein.

Wie schon aus den bisherigen Erläuterungen in diesem Kapitel ersichtlich, werden die Grenzen des Verdrehwinkels φ_c durch die Höhe des Zwischenelement h_c und den Abstand des Seilzugs zum Zentrum r_w beeinflusst. Um einen maximalen Verdrehwinkel für ein Element berechnen zu können, wird die minimale Steigung, die der Seilzug innerhalb des Elements haben darf, als Referenz bestimmt. Zur Vereinfachung wird nun nicht mit der tatsächlichen Seilzugführung wie in Formel (5.5), sondern mit einer linearen Vergleichssteigung, also wie in Formel (5.6) gerechnet. Diese Vergleichssteigung $s_{w,min}$ ergibt sich damit mit:

$$s_{w,min} = \frac{h_c}{\varphi_{c,max} r_w} \quad (5.7)$$

Abhängig von dem verwendeten 3D-Druckverfahren, dem verwendeten Material und dem verwendeten Seilzug muss nun ein Wert für $s_{w,min}$ experimentell bestimmt werden. Bei einer bekannten Elementhöhe h_c und einem bekannten Abstand des Seilzugs zum Zentrum des Elements r_w kann damit der maximale Verdrehwinkel $\varphi_{c,max}$ für ein Element bestimmt werden, indem Formel (5.7) nach $\varphi_{c,max}$ aufgelöst wird.

Als weiterer Parameter muss der Durchmesser d_w und die Startposition \mathbf{p}_w der Seilzugführungen festgelegt werden. Der Durchmesser d_w muss groß genug ausgelegt werden, sodass die Seilzüge leicht in die Struktur eingeführt werden können. Gleichzeitig büßt man durch zu große Seilzuglöcher zum einen Genauigkeit ein, da die zentrierende Eigenschaft der Seilzüge abnimmt, zum anderen nimmt der Platz innerhalb der Struktur für andere Führungsstrukturen ab. Ähnlich wie bei der minimalen Steigung der Seilzugführung muss für die Kombination aus Strukturwerkstoff, verwendetem Seilzug und dem verwendeten 3D-Druckverfahren eine geeignete minimale Lochgröße experimentell ermittelt werden. Mit \mathbf{p}_w kann alternativ zu r_w die Startposition der Seilzugführungen im Strukturquerschnitt \mathbf{P}_c bestimmt werden. Neben dem Radius auf dem die Seilzüge verlaufen ($\|\mathbf{p}_w\| = r_w$), bestimmt \mathbf{p}_w die Startposition der Seilzugführungen an der Unterseite des ersten Elements.

5.4 Lösungsprozess

In diesem Kapitel wird der Prozess der Erstellung der Mehrposen-Formgedächtnisstrukturen zusammengefasst. In Abb. 26 ist dieser Erstellungsprozess mit dem Fokus auf die einzelnen Schritte der Konstruktionsprozesse in einem Diagramm dargestellt. Zunächst wird die Aufgabe der Struktur in Form von mehreren Endeffektorendposen definiert. Es folgt die Eingabe verschiedener Parameter und Randbedingungen bezüglich des Druckverfahrens (s. Kapitel 10), des mechanischen Typs (s. Kapitel 5.3.1), der Festkörpergelenke (s. Kapitel 5.3.2), der Art der Kontaktstrukturen (s. Kapitel 5.3.3), des Querschnitts der Zwischenelemente und der Seilzugführungen (s. Kapitel 5.3.4).

Nach der Definition dieser Parameter folgt der automatisierte Teil des Konstruktionsprozesses. Zunächst wird mit Hilfe einer Ersatzkinematik nach Lösungen für die vorgegebenen Endeffektorendposen gesucht (s. Kapitel 6.2). Ist eine solche Lösung gefunden, kann die Grundstruktur und darauf aufbauend das Oberflächenmodell der Struktur erstellt werden. Es folgt eine Simulation der Bewegung (s. Kapitel 8.1) und gegebenenfalls die Anpassung des Bewegungsverhaltens der Struktur durch die Modifikation der Endeffektorbahnkurve (s. Kapitel 8.2). Ist dieser automatisierte Teil der Konstruktion abgeschlossen, folgt die manuelle Überprüfung, ob das Modell der Struktur die gestellten Anforderungen erfüllt. Ist dies nicht der Fall, müssen die Eingabeparameter angepasst werden und der automatisierte Konstruktionsprozess wird wiederholt, bis eine zufriedenstellende Lösung gefunden ist. Je nach Anwendung können anschließend Anbindungselemente und Adapter für die Integration der Struktur in die Peripherie hinzugefügt werden.

Das finale Oberflächenmodell der erstellten Struktur kann nun in Form einer STL-Datei exportiert und in dem ausgewählten additiven Fertigungsverfahren hergestellt werden (s. Kapitel 10). Nach dem Druck der Struktur folgen die verschiedenen Nachbearbeitungsschritte, die das ausgewählte additive Fertigungsverfahren mit sich bringt, wie die Entfernung von Stützstrukturen oder die Restpulverentfernung. Zuletzt werden in einem Montageschritt die benötigten Seilzüge eingefädelt und gegebenenfalls, bei einem Druck der Struktur in mehreren Teilen, die Teile der Struktur verschraubt oder verklebt.

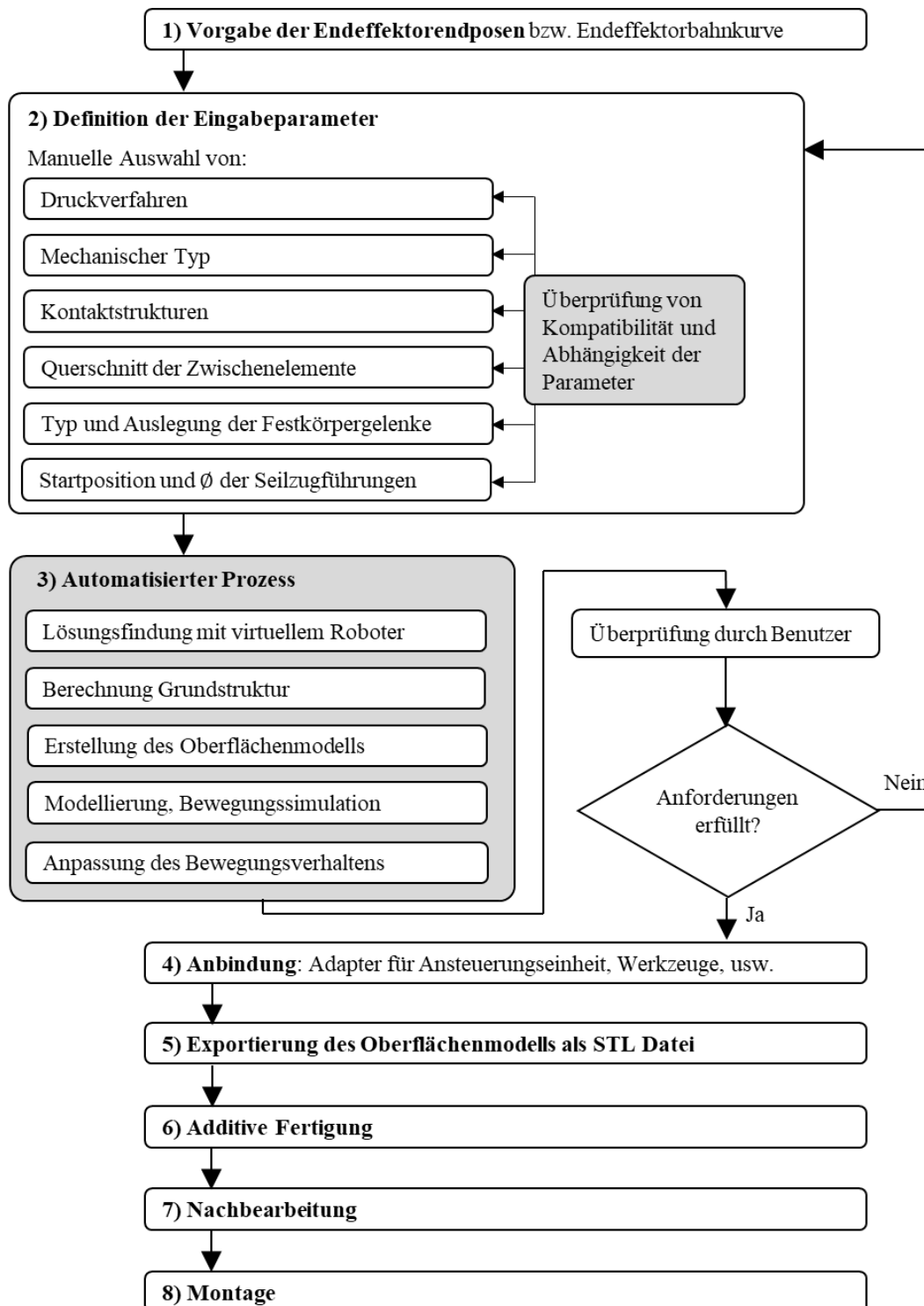


Abb. 26: Lösungsprozesse der Konstruktion und der Herstellung der Mehrposen-Formgedächtnisstrukturen. Die grau hinterlegten Bereiche sind dabei Teil des automatisierten Prozesses.

6. Beschreibung der Kinematik der Strukturen

In diesem Kapitel wird die Kinematik der hier vorgestellten Festkörpergelenkstrukturen im Detail vorgestellt. Es wird dabei zunächst auf die Beschreibung der direkten Kinematik eingegangen, welche auf Elementebene oder Segmentebene erfolgen kann und für beide Fälle im Folgenden dargelegt ist. Um geeignete Strukturen für die vorgegebenen Endeffektorendposen zu finden, wird ein Modellierungskonzept der Strukturen mit Hilfe einer Ersatzkinematik vorgestellt. Anschließend werden zwei verschiedene Strategien für die Lösungsfindung geeigneter Strukturparameter für die vorgegebenen Zielposen beschrieben.

6.1 Beschreibung der direkten Kinematik

Mit der direkten Kinematik wird die Pose des Endeffektors aus den gegebenen Gelenkwinkeln eines Roboters oder eines Mechanismus bestimmt (vgl. Kapitel 2.1.2). Die Beschreibung der direkten Kinematik der Strukturen erfolgt hier über eine Verkettung von lokalen Koordinatensystemen, welche an den Segmenten und an den Elementen angebracht werden. Ob die Modellierung über die Kreissegmente oder über die einzelnen Elemente erfolgt, hängt davon ab, für welchen Zweck die Modellierung herangezogen wird. Die Reibung des Seilzugs und unterschiedliche Gelenksteifigkeiten der Festkörpergelenke sorgen dafür, dass die Strukturen in den Zuständen zwischen den versteiften Anschlagstellungen keine Kreissegmente (also Kurven mit segmentweisen konstanten Krümmungen) darstellen. Das bedeutet für eine Modellbildung der Bewegung der Strukturen, dass die Gelenke einzeln modelliert werden müssen und nicht mehrere Gelenke zu einem Kreissegment zusammengefasst werden können. Die Struktur kann also während der Bewegung nicht als Verkettung aus Kreissegmenten beschrieben werden. Um diese Bewegung der Struktur zwischen den voll ausgelenkten Modi modellieren zu können, bietet sich das *Pseudo-Rigid-Body*-Modell (s. Kapitel 2.2) an, das heißt die Festkörpergelenke werden als konventionelle Gelenke mit einem festen Rotationsmittelpunkt und einer Rückstellfeder betrachtet. Im Gegensatz dazu kann die Struktur in den Anschlagstellungen segmentweise betrachtet werden mit dem *Piecewise-Constant-Curvature*-Modell (s. Kapitel 2.1.3) beschrieben werden. Das ist zulässig, da die versteifte Struktur in den Anschlagstellungen immer eine Kette aus Kreissegmenten abbildet. Diese Beschreibung wird für die Lösungsfindung der Anschlagstellungen der Struktur für die vorgegebenen Endeffektorendposen herangezogen, da hier mit der Vereinfachung der Struktur auf wenige Kreissegmente die Berechnung der Vorwärts- und Rückwärtskinematik sehr schnell durchgeführt werden kann. Diese zwei

Möglichkeiten der Beschreibung der direkten Kinematik, die Verkettung der Elemente und die Verkettung der Segmente, sind in den folgenden zwei Unterkapiteln aufgeführt.

6.1.1 Verkettung der Elemente – *Pseudo-Rigid-Body-Modell*

Die kinematische Beschreibung der Strukturen erfolgt über homogene Transformationsmatrizen. Während der Erstellung des Modells einer Struktur wird jedes Element i in den Drehzentren der Festkörpergelenke mit je einem Koordinatensystem versehen. Die Bezeichnung erfolgt wie in Abb. 27 dargestellt mit einem Basis- oder *base*-Koordinatensystem B und einem Folge- oder *follower*-Koordinatensystem F . Element $i = 0$ ist das erste, mit der Umgebung fest verbundene Element, während Element $i = n_c$ das letzte Element mit dem Endeffektor beschreibt. Die Koordinatensysteme werden entsprechend im i -ten Element mit B_i und F_i bezeichnet. Das Koordinatensystem B_0 beschreibt den Anschluss des Festkörpergelenkmechanismus an die Umgebung und ee die Pose des Endeffektors des Systems.

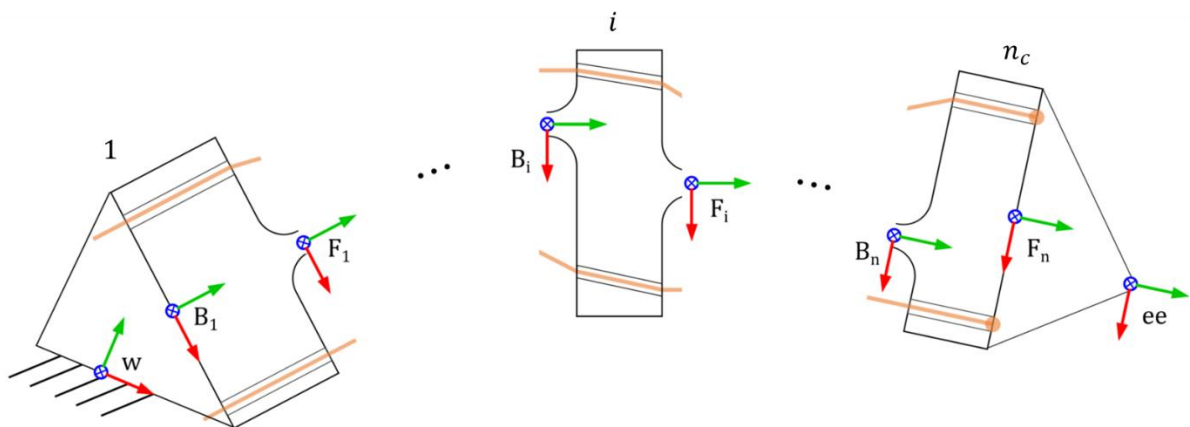


Abb. 27: Vereinfachte Darstellung der Elemente 1, i und n_c einer Struktur in 2D. Es sind jeweils die Basis- und Folgekoordinatensysteme zur Berechnung der Vorwärtskinematik auf Elementebene eingezeichnet.

Die relative geometrische Lage der Koordinatensysteme innerhalb eines Elements i wird über die homogene Transformationsmatrix ${}^{B_i}T_{F_i}$, bestehend aus der Rotationsmatrix ${}^{B_i}R_{F_i}$ und dem Translationsvektor ${}^{B_i}t_{F_i}$, beschrieben. Die Transformationsmatrix ${}^{B_i}T_{F_i}$ beschreibt den unbeweglichen Teil eines Elements i , das heißt diese Transformation ist konstant:

$${}^{B_i}T_{F_i} = \begin{bmatrix} {}^{B_i}R_{F_i} & {}^{B_i}t_{F_i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Das Basiskoordinatensystem B_i des Elements i und das Folge-Koordinatensystem F_{i-1} des Elements $i-1$ haben den gleichen Ursprung und liegen im Drehzentrum des unteren Festkörpergelenks von Element i . Es gibt zwischen Folge- und Basis-Koordinatensystem zweier benachbarter Elemente daher keinen translatorischen Offset. Die Transformationsmatrix ${}^{F_{i-1}}\mathbf{T}_{B_i}$ sieht demnach wie folgt aus:

$${}^{F_{i-1}}\mathbf{T}_{B_i} = \begin{bmatrix} {}^{F_{i-1}}\mathbf{R}_{B_i} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \begin{matrix} 0 & 0 & 1 \end{matrix} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Im unausgelenkten Zustand entspricht das Koordinatensystem F_{i-1} von Element $i-1$ dem Koordinatensystem B_i von Element i . Im ausgelenkten Zustand ist F_{i-1} zu B_i um die Winkel γ_x , γ_y und γ_z verdreht. Sie beschreiben die Auslenkung des Festkörpergelenks als Eulerwinkel. Während der Winkel α_c den Betrag des maximalen Auslenkwinkels des Gelenks beschreibt, stehen γ_x , γ_y und γ_z auch für die Auslenkwinkel zwischen den Anschlagstellungen. Für das Gelenk zwischen Element $i-1$ und Element i werden die Winkel in dem Vektor:

$$\mathbf{\Gamma}_i = \begin{bmatrix} \gamma_{x,i} \\ \gamma_{y,i} \\ \gamma_{z,i} \end{bmatrix} = \gamma_i \cdot \mathbf{e} \quad (6.3)$$

zusammengefasst. In Abb. 28 ist der Vektor $\mathbf{\Gamma}_i$ abgebildet, der Vektor \mathbf{e} beschreibt die Richtung der Rotationsachse, während der Betrag γ_i den Rotationswinkel um diese Achse angibt.

Die Rotationsmatrix ${}^{F_{i-1}}\mathbf{R}_{B_i}(\mathbf{\Gamma}_i)$ beschreibt die Auslenkung des Festkörpergelenks zwischen Element $i-1$ und Element i :

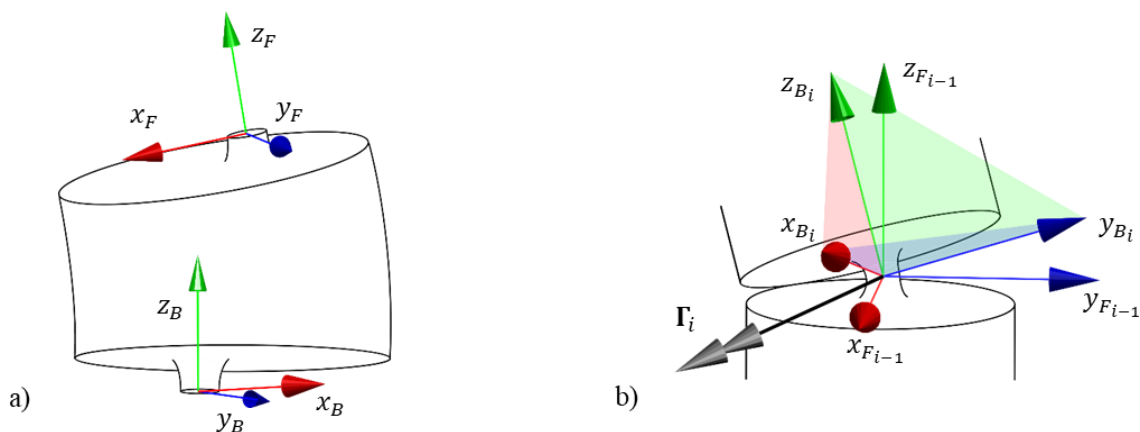


Abb. 28: Lokale Koordinatensysteme an einem Element: a) Element mit Basis- (x_B, y_B, z_B) und Folgekoordinatensystem (x_F, y_F, z_F). b) Das dazugehörige Festkörpergelenk an der Unterseite des Elements i mit dem Folgekoordinatensystem F_{i-1} des vorherigen Elements $i-1$ und dem Basiskoordinatensystem B_i des Elements i .

$${}^{F_{i-1}}\mathbf{R}_{B_i}(\mathbf{\Gamma}_i) = \mathbf{R}_x(\gamma_{x,i}) \cdot \mathbf{R}_y(\gamma_{y,i}) \cdot \mathbf{R}_z(\gamma_{z,i}) \quad (6.4)$$

Je nach Bewegungsfreiheitsgrad des Gelenks fließen die verschiedenen Komponenten von $\mathbf{\Gamma}_i$ ein. Bei einem drehgelenksartigen Festkörpergelenk gibt es bei geeigneter Wahl der Drehachse nur einen skalaren Drehwinkel γ_i . Wird die Drehachse auf eine Koordinatenachse gelegt, z.B. auf die y-Achse, ist $\mathbf{\Gamma}_i = (0 \ \gamma_i \ 0)^T$ und ${}^{F_{i-1}}\mathbf{R}_{B_i}$ wird wie folgt beschrieben:

$${}^{F_{i-1}}\mathbf{R}_{B_i} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_i & 0 & \sin \gamma_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma_i & 0 & \cos \gamma_i \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Für kugelgelenkartige Festkörpergelenke gehen alle drei Winkel γ_x , γ_y und γ_z in die Formel für ${}^{F_{i-1}}\mathbf{R}_{B_i}$ ein und die Rotation kann unter Zuhilfenahme der Rotationsachse \mathbf{e} beschrieben werden. Dabei beschreibt der Einheitsvektor \mathbf{e} die momentane Drehachse des Festkörpergelenks im Koordinatensystem F_{i-1} und γ_i den Betrag des Winkels der Drehung um diese Achse:

$${}^{F_{i-1}}\mathbf{R}_{B_i} = \begin{bmatrix} e_x^2(1 - \cos \gamma_i) + \cos \gamma_i & e_x e_y(1 - \cos \gamma_i) - e_z \sin \gamma_i & e_x e_z(1 - \cos \gamma_i) + e_y \sin \gamma_i \\ e_y e_x(1 - \cos \gamma_i) + e_z \sin \gamma_i & e_y^2(1 - \cos \gamma_i) + \cos \gamma_i & e_y e_z(1 - \cos \gamma_i) - e_x \sin \gamma_i \\ e_z e_x(1 - \cos \gamma_i) - e_y \sin \gamma_i & e_z e_y(1 - \cos \gamma_i) + e_x \sin \gamma_i & e_z^2(1 - \cos \gamma_i) + \cos \gamma_i \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

mit $\gamma_i = \|\mathbf{\Gamma}_i\| = \sqrt{\gamma_x^2 + \gamma_y^2 + \gamma_z^2}$ und $\mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{\Gamma}_i}{\gamma_i}$

Die Berechnung der Vorwärtskinematik erfolgt nun über die Verkettung der Transformationsmatrizen. Es kann bei einer bekannten Auslenkung die Pose des Endeffektors ${}^w\mathbf{T}_{ee}$ im Weltkoordinatensystem berechnet werden:

$$\begin{aligned} {}^w\mathbf{T}_{ee} &= {}^w\mathbf{T}_{B_0} \cdot \prod_{i=0}^{n_s} ({}^{B_i}\mathbf{T}_{F_i} \cdot {}^{F_i}\mathbf{T}_{B_{i+1}}) \cdot {}^{F_n}\mathbf{T}_{ee} \\ &= {}^w\mathbf{T}_{B_0} \cdot {}^{B_0}\mathbf{T}_{F_0} \cdot {}^{F_0}\mathbf{T}_{B_1} \cdot {}^{B_1}\mathbf{T}_{F_1} \cdot {}^{F_1}\mathbf{T}_{B_2} \cdot \dots \cdot {}^{F_{n-1}}\mathbf{T}_{B_n} \cdot {}^{B_n}\mathbf{T}_{F_n} \cdot {}^{F_n}\mathbf{T}_{ee} \end{aligned} \quad (6.7)$$

6.1.2 Verkettung der Segmente – *Piecewise-Constant-Curvature-Modell*

Bei der segmentweisen Beschreibung der Kinematik der Strukturen wird nicht jedes Element, sondern jedes Segment als steifes Glied betrachtet. Wie im vorherigen Kapitel können die Transformationen mit Basis- und Folgekoordinatensystemen beschrieben werden. Die Formeln in diesem Kapitel sind an die Definition des *Piecewise-Constant-Curvature-Modells* von Webster & Jones (2010) angelehnt. Die Transformation von Segmentbasis zu Segmentende

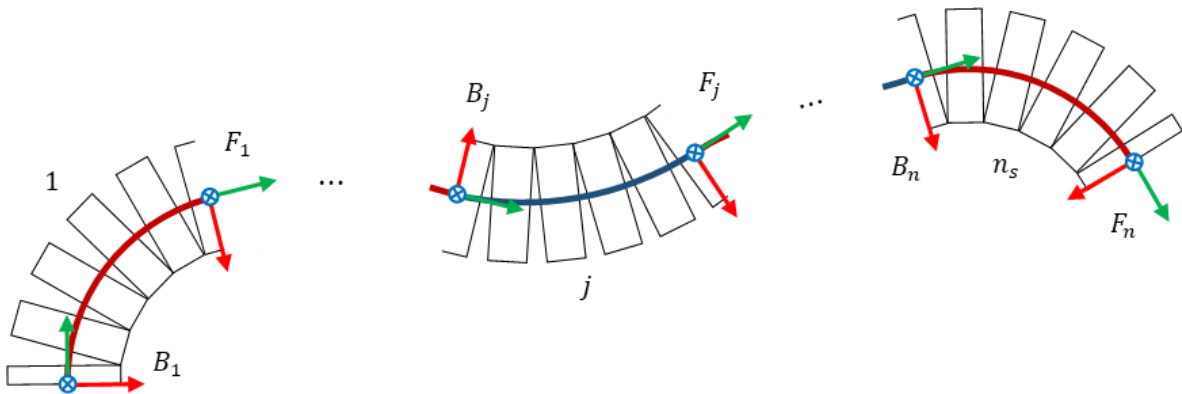


Abb. 29: Vereinfachte Darstellung der Segmente 1, j und n_s einer Struktur in 2D. Es sind jeweils die Basis- und Folgekoordinatensysteme zur Berechnung der Vorwärtskinematik auf Segmentebene eingezeichnet.

lässt sich mit den Rotationsmatrizen $\mathbf{R}_z(\varphi)$ um die z -Achse und $\mathbf{R}_y(\theta)$ um die y -Achse beschreiben. Dabei wird die Transformation von Koordinatensystem F_j zu F_{j-1} wie in Formel (6.8) beschrieben:

$${}^{F_{j-1}}\mathbf{T}_{F_j} = {}^{F_{j-1}}\mathbf{T}_{B_j} \cdot {}^{B_j}\mathbf{T}_{F_j} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_z(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R}_y(\theta) & r(1 - \cos \theta) \\ 0 & 0 \\ r \sin \theta & 1 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Mit einer Verkettung dieser Transformationsmatrizen kann die Vorwärtskinematik der Struktur wie in Formel (6.7) berechnet werden.

Im Zuge dieser Arbeit wurde für die meisten Berechnungen der Kinematik der Segmentkette die Beschreibung mit homogenen Transformationsmatrizen herangezogen. Geht es jedoch darum die Berechnung der Vorwärtskinematik möglichst effizient durchzuführen, ist diese Beschreibung nicht immer die beste Wahl. Während des Optimierungsverfahrens, das eingesetzt wird, um für definierte Endeffektorendposen eine geeignete Formgedächtnisstruktur zu finden (s. Kapitel 6.2.3), hat sich die Berechnung der Vorwärtskinematik über die Verkettung von homogenen Transformationsmatrizen als zu langsam herausgestellt. Eine Alternative stellt die Beschreibung der Transformation mit Exponentialkoordinaten dar (*Product-of-Exponentials-Methode*). Damit wird mit der Verkettung der Koordinatensysteme zwar wie in Formel (6.7), aber ohne die explizite Berechnung der einzelnen Koordinatensysteme der Segmente durchgeführt.

6.2 Strategien zur Berechnung von Strukturen mit mehreren Endeffektorendposen

6.2.1 Modellierung über eine Ersatzkinematik

Die direkte Kinematik der Formgedächtnisstrukturen, also die Berechnung der Endeffektorpose aus einer bekannten Auslenkung der Gelenke, wurde im vorherigen Kapitel beschrieben. Um aus vorgegebenen Posen des Endeffektors die Parameter einer Struktur zu bestimmen, muss nun diese Berechnung umgekehrt werden. Das Vorgehen ist bei diesen robotischen Strukturen etwas anders als bei klassischen Gelenkrobotern. Üblicherweise hat ein Roboter eine unveränderliche Kinematik und die inverse Kinematik wird im Einsatz sehr oft berechnet. Im Gegensatz dazu muss in dieser Arbeit die Konfiguration der Kinematik während der Konstruktion und nicht während des Einsatzes der Strukturen bestimmt werden, da die Bewegung und die Endeffektorendpose einer Struktur allein durch ihren geometrischen Aufbau bestimmt werden.

Um die umfangreiche Literatur und Software von seriellen Roboterkinematiken auf die Formgedächtnisstrukturen anwenden zu können, werden die Strukturen mit einer seriellen Ersatzkinematik modelliert, mit deren Hilfe aus der Zielpose des Endeffektors eine Anschlagstellung bestimmt werden kann. Wie zuvor schon in Kapitel 5.2 und 6.1.2 beschrieben, können die Formgedächtnisstrukturen als eine Verkettung von Kreissegmenten mit dem *Piecewise-Constant-Curvature*-Modell beschrieben werden, wobei jedes Kreissegment für ein ausgelenktes Segment der Struktur steht. Diese Modellierung von Kontinuumsrobotern, als Roboter mit stückweise konstanter Krümmung, ist ein übliches Vorgehen aufgrund der Vereinfachungen, die sich durch diese Beschreibung der kinematischen Modellierung ergeben. Da die Formgedächtnisstrukturen im ausgelenkten Zustand eine Kette von Kreissegmenten bilden, ist die Voraussetzung für die Annahme eines *Piecewise-Constant-Curvature*-Modells für die Anschlagstellungen der Strukturen (also in ihren vollständig ausgelenkten Zuständen) gegeben. Ein Kreissegment entspricht dabei einem Roboterglied und kann, wie schon in der Nomenklatur der Strukturen definiert, durch den Radius des Segments r_s , den Aufspannwinkel θ_s und den Verdrehwinkel φ_s zwischen zwei Segmenten beschrieben werden.

Die im Folgenden beschriebene Ersatzkinematik ist eine solche Kette von Kreissegmenten, allerdings mit anderen Bewegungsfreiheitsgraden als die der Festkörpergelenkstruktur (s. Abb. 30.a). Es werden Ersatzgelenke eingeführt, wobei ein Ersatzgelenk die Änderung eines Kreissegmentparameters bei der Konstruktion modelliert und nicht die Bewegung der realen Struktur. Das können z.B. die relativen Verdrehungen φ_s' der Biegeebenen an jedem Festkörpergelenk je nach Anschlagsstellung sein, wie hier in Abb. 30.b gezeigt. Diese Ersatzgelenke entsprechen nicht den tatsächlichen Festkörpergelenken der Struktur, sondern bestimmen die Bewegungsfreiheitsgrade der Ersatzkinematik. Diese Ersatzkinematik wird eingeführt, um auf die Lösungssuche für eine Formgedächtnisstruktur für die vorgegebenen Endeffektorendposen zu gehen. Es wird versucht, Werte für die Ersatzgelenke zu bestimmen, um die vorgegebene Endeffektorendpose zu erreichen. Die Ersatzkinematik wird nicht nach den realen Auslenkwinkeln der sich bewegenden Festkörpergelenke gelöst, sondern nach den Parametern r_s' , θ_s' oder φ_s' der Kreissegmente der Kinematik. Sie repräsentiert also die reale physische Struktur, hat aber andere Bewegungsfreiheitsgrade als diese. Wird ein Aufbau der Ersatzkinematik gefunden, der alle vorgegebenen Endeffektorendposen erreichen kann, ist auch eine Formgedächtnisstruktur realisierbar.

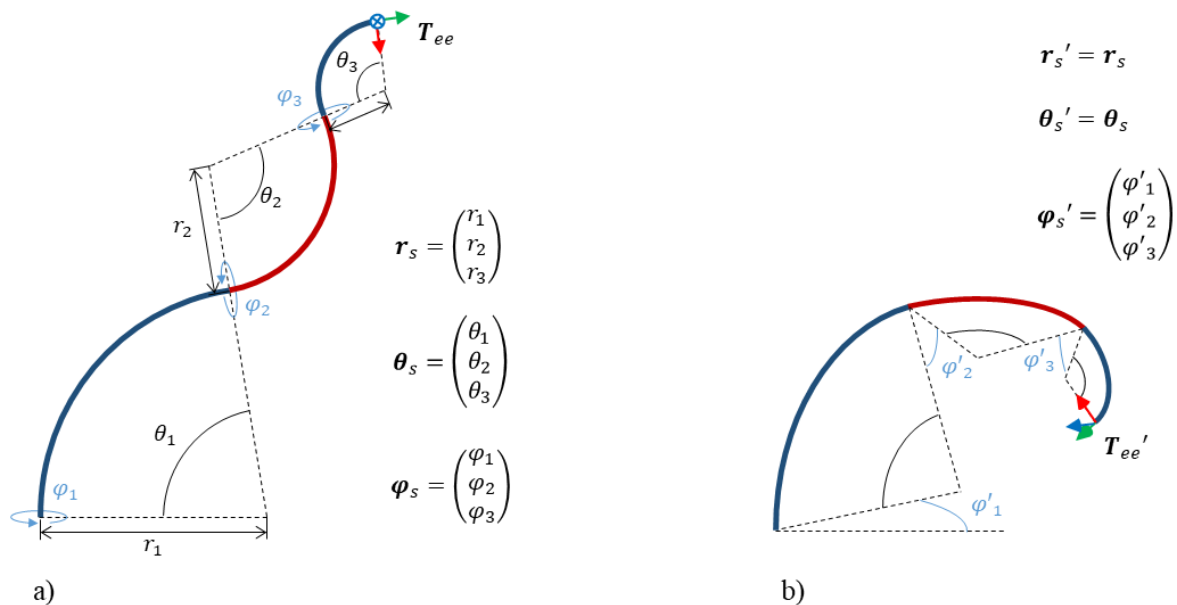


Abb. 30: Ersatzkinematik zur Repräsentation einer Formgedächtnisstruktur: a) Die Ersatzkinematik besteht aus einer Verkettung von Kreissegmenten. Die Parameter r_s , θ_s und φ_s beschreiben den Aufbau und die aktuelle Konfiguration der Ersatzkinematik. b) Eine Änderung der Konfiguration kann z.B. durch ein anderes Set an Verdrehwinkeln φ_s' erfolgen.

Die realen Formgedächtnisstrukturen haben bestimmte Einschränkungen, in deren Rahmen der Entwurf möglich ist, so ist z.B. der maximale Auslenkungswinkel der Festkörpergelenke zu beachten, die minimalen Spaltmaße durch den 3D-Drucker oder die Verdrehwinkel der Elemente durch die Höhe des Elements und der Position der Seilzugführung. Dementsprechend unterliegen die Kreissegmentparameter der Ersatzkinematik gewissen Randbedingungen, in deren Rahmen sie geändert werden können. Diese Begrenzungen hängen von den Eingabeparametern, dem mechanischen Aufbau, der Dimension der Struktur und dem Druckverfahren ab. Nur wenn die Ersatzkinematik unter Berücksichtigung ihrer Bewegungseinschränkungen durch die Randbedingungen der Kreissegmentparameter eine Endeffektorpose erreichen kann, ist die physische Realisierung der Formgedächtnisstruktur basierend auf den Kreissegmenten der Kinematik möglich. Um der Verkleinerung des Lösungsraums durch diese Randbedingungen entgegenzuwirken, besteht die Möglichkeit die Bewegungsfreiheitsgrade der Ersatzkinematik zu erhöhen, indem jedes Festkörpergelenk als eigenes Kreissegment betrachtet wird. Das macht alle folgenden Berechnungen zur Suche nach einem Gelenkwinkelset für die gegebene Endeffektorpose aufwendiger, vergrößert aber die Chance, eine Formgedächtnisstruktur für diese Pose zu finden. Andersherum ist es natürlich auch möglich die Berechnung zu vereinfachen und die Rechenzeit zu verkleinern, indem aufeinanderfolgende Segmente zu einem Segment zusammengefasst werden.

Mit der beschriebenen Ersatzkinematik kann die Bestimmung eines Sets an Gelenkwinkeln für die Ersatzgelenke erfolgen, das heißt die Berechnung der Parameter für eine Struktur, welche die gegebenen Endeffektorendposen erreichen kann. Wie in Abb. 30 gezeigt, kann für die gegebene Ersatzkinematik mit \mathbf{r}_s , $\boldsymbol{\theta}_s$ und $\boldsymbol{\varphi}_s$ ein neues Set an Verdrehwinkeln $\boldsymbol{\varphi}_s'$ gefunden werden, um die neue Endeffektorendpose \mathbf{T}_{ee}' zu erreichen. Das entspricht bei Typ 1 Strukturen den Verdrehwinkeln für eine zweite Seilzugführung. Für diese Berechnungen gibt es verschiedene Vorgehensweisen. Da analytische Lösungen nur schwer zu bestimmen sind, besonders bei einer beliebigen Kinematik des Ersatzmodells, wird hier auf numerische Solver zurückgegriffen. Die Suche nach den Gelenkwinkeln erfolgt während des Konstruktionsprozesses, um die Strukturen für die vordefinierten Endeffektorendposen auslegen zu können. Da dies während der Entwurfsphase der Strukturen geschieht, ist die Lösung des Problems nicht zeitkritisch, ein Unterschied zu dem Problem der inversen Kinematik in typischen Roboteranwendungen. Wird während der Konstruktion einmal eine Lösung für mehrere Endeffektorendposen gefunden, kann diese Lösung in den Aufbau der Struktur fest „einprogrammiert“ werden. In den nächsten Kapiteln wird genauer auf die Art und Weise der Suche nach Gelenkwinkeln für die gegebenen Zielposen eingegangen.

6.2.2 Berechnung weiterer Konfigurationen basierend auf bestehender Struktur

In einem ersten Schritt wird eine Strategie verwendet, die nur auf Typ 1 und Typ 2 Strukturen anwendbar ist und bei der der geometrische Aufbau der Struktur für eine erste Endeffektorendpose und damit auch für eine die erste Anschlagsstellung bereits vorgegeben sein muss (wie in den zuvor beschriebenen Einposen-Formgedächtnisstrukturen in den Vorarbeiten zu dieser Arbeit). Das heißt, es existiert bereits eine Struktur nach der Vorgabe der ersten Anschlagsstellung bzw. der ersten Endeffektorendpose mit einer bestimmten Anzahl an Gelenken und den beschreibenden Parametern r_c , h_c , α_c , und φ_c (bzw. den Kreissegmentparametern r_s , θ_s oder φ_s). Basierend auf der Beschreibung der Struktur mit einer Ersatzkinematik folgt die Bestimmung der Anschlagsstellungen für weitere Endeffektorposen. Um mit dieser bestehenden Struktur eine weitere Endeffektorendpose zu erreichen, muss ein neues Set an Winkeln für die Ersatzgelenke bestimmt werden, was bedeutet, dass eine Reihe neuer Werte für bestimmte Kreissegmentparameter gefunden werden muss.

Wie schon in Abb. 30 gezeigt, kann das für Typ 1 Strukturen die Bestimmung der Winkel φ_c' oder φ_s' zwischen den Biegeebenen benachbarter Elemente oder Segmente sein. Hier soll noch einmal betont werden, dass die berechneten Winkel der Ersatzkinematik nicht die tatsächlichen Beugewinkel der Festkörpergelenke beschreiben, sondern die Drehung eines Ersatzgelenks, das die Änderung der Winkel der Segmentbiegeebenen einer gegebenen Struktur zwischen den beiden gebogenen Konfigurationen beschreibt. Bei Typ 1 Strukturen entspricht das den Winkeln, welche den Verlauf des zweiten Seilzugs bestimmen. Dieser zweite Seilzug bestimmt dann die zweite Anschlagsstellung und die zugehörige Endeffektorendpose der Struktur. Das Vorgehen kann ebenso für Typ 2 Strukturen verwendet werden, allerdings wird jetzt nicht nach φ_s' , sondern nach einer Kombination aus θ_s' und φ_s' gelöst, mit der zusätzlichen Bedingung für φ_s' aus Formel (5.3). Durch die gegebenen Nachteile dieser Strategie wurde dies jedoch nicht implementiert und für Typ 2 Strukturen direkt auf den allgemeineren Ansatz in dem nachfolgenden Kapitel zurückgegriffen.

Die Suche nach geeigneten Gelenkstellungen der Ersatzkinematik kann mit der Robotics Systems Toolbox in MATLAB gelöst werden. Dafür wird versucht, mit einem in der Toolbox bereits implementierten Optimierungsalgorithmus, eine Lösung für die Winkel der Ersatzkinematik zu finden, sodass die Positions- und Orientierungsfehler des Endeffektors der Ersatzkinematik zu der vorgegebenen Endeffektorendpose minimiert werden. Da diese numerischen Methoden von der Startkonfiguration der Gelenke der Ersatzkinematik abhängen, wird ausgehend von zufälligen Startkonfigurationen iterativ nach einer Zielkonfiguration mit ausreichend kleinen Positions- und Orientierungsfehlern des Endeffektor-Koordinatensystems

\mathbf{T}_{ee}' zur Zielpose gesucht. Existiert eine solche Lösung nicht, wird eine Näherung geliefert. Es können dabei Gewichtungen für die Fehler der sechs Raumbfreiheitsgrade von \mathbf{T}_{ee}' angegeben werden:

$$\mathbf{w} = [w_{r,x} \quad w_{r,y} \quad w_{r,z} \quad w_{t,x} \quad w_{t,y} \quad w_{t,z}] \quad (6.9)$$

Dabei bezieht sich w_r auf die rotatorischen und w_t auf die translatorischen Freiheitsgrade des Endeffektors. Mit diesen Gewichtungen können bestimmte Freiheitsgrade bei der Lösungsfindung bevorzugt, benachteiligt oder sogar ignoriert werden. Die einzelnen Gewichtungen werden auf Werte zwischen null (Fehler wird ignoriert) und eins gesetzt. Wenn z.B. nur die Position des Endeffektors und die Orientierung der z-Achse des Endeffektors von Relevanz sind, kann ein Gewichtungsvektor von $\mathbf{w} = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$ eingesetzt werden.

Es ist außerdem die Angabe von Gelenkgrenzen nötig, die so gewählt werden müssen, dass sie den geometrischen Beschränkungen der Strukturen gerecht werden. Eine solche Beschränkung ist bei Typ 1 und Typ 2 Strukturen durch die Seilzugführungen gegeben (s. Kapitel 5.3.4). Hier wird die Drehgrenze des Ersatzgelenks an einem Element auf den maximalen Verdrehwinkel $\varphi_{c,max}$ gesetzt. Das heißt, das Ersatzgelenk kann sich nur im folgenden Bereich drehen, um nicht realisierbare Seilzugführungen zu verhindern:

$$\varphi_c \in [-\varphi_{c,max}; \varphi_{c,max}] \quad (6.10)$$

Wird die Struktur mit der Ersatzkinematik wie zuvor beschrieben auf der Segmentebene modelliert, entspricht der maximale Verdrehwinkel $\varphi_{s,max}$ an einem Segment dem Wert von $\varphi_{c,max}$ am ersten Element des Segments. Bei den Strukturen ist es daher von Vorteil, bei der Erstellung des Modells der bereits bestehenden Konfiguration, gerade Segmente zwischen den Kreissegmenten einzufügen. Damit wird die Höhe jedes Elements zwischen den Kreissegmenten vergrößert und der maximale Verdrehwinkel $\varphi_{s,max}$ erhöht. Das erhöht die Chancen mit dieser Ersatzkinematik eine Lösung für weitere Endeffektorendposen zu finden.

In Abb. 31 ist für die erste Pose \mathbf{T}_{ee} bereits eine Struktur vorhanden. Auf der linken Seite sind die Raumkurve und die Grundstruktur (die Annäherung durch die Zylinder) abgebildet. Diese Struktur wurde hier schon mit geraden Segmenten zwischen den drei Kreissegmenten ausgelegt, um Verdrehwinkel von $\pi/2$ möglich zu machen. Es wird nun für die zweite Zielpose \mathbf{T}_{ee}' eine Lösung mit Hilfe der numerischen Solver in der Robotics Systems Toolbox gefunden. Auf der rechten Seite ist die Struktur ausgelenkt in den beiden Konfigurationen abgebildet.

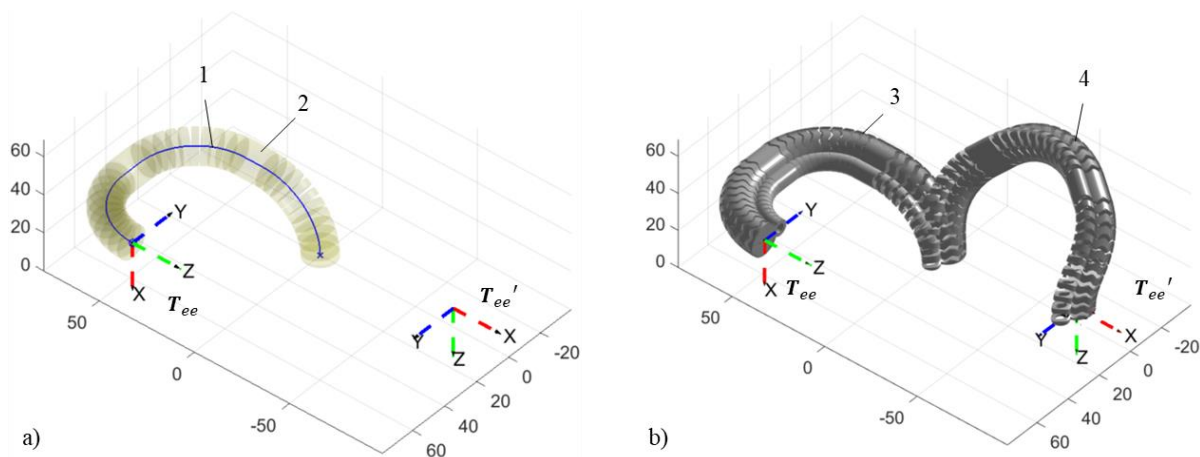


Abb. 31: Berechnung einer weiteren Konfiguration, basierend auf einer bestehenden Formgedächtnisstruktur: a) Zu Grunde liegende Raumkurve einer Struktur (1) und die Annäherung durch Zylinderelemente (2). Die Struktur für das Erreichen der ersten Endeffektorendpose T_{ee} ist damit bereits gegeben. b) Aus der bestehenden Formgedächtnisstruktur mit der ersten bekannten Konfiguration (3) wird die zweite Strukturkonfiguration (4) für die zweite Endeffektorendpose T_{ee}' berechnet.

Der Nachteil, den diese Strategie mit sich bringt, ist, dass für die Berechnung von weiteren Konfigurationen, bereits ein Modell für eine Formgedächtnisstruktur mit einer ersten Anschlagsstellung vorhanden sein muss. Diese Struktur beschränkt den Arbeitsraum und den Konfigurationsraum der Ersatzkinematik und dementsprechend können nur Endeffektorendposen erreicht werden, die in dem Arbeitsraum der Ersatzkinematik liegen. Die Überprüfung, ob eine Endeffektorendpose erreicht werden kann, ist allerdings mit geringem Rechenaufwand verbunden und kann daher für bestimmte Anwendungen, bei denen eine erste Anschlagsstellung der Struktur gegeben ist, zu schnellen Lösungen führen. Besonders bei Endeffektorposen, die nahe an der ersten Lösung liegen, kann die vorgestellte Strategie nützlich sein. Darüber hinaus bildet diese Strategie die Grundlage für die optimierungsbasierten Strategien in dem folgenden Kapitel.

6.2.3 Optimierungsbasierte Methode zur Berechnung weiterer Konfigurationen

Die Bestimmung einer ersten Ersatzkinematik für die Initialisierung wie im vorherigen Ansatz, also die Wahl einer Roboterkinematik, deren Arbeitsraum alle Zielposen des Endeffektors enthält, ist keine triviale Aufgabe. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass eine beliebig komplexe Kinematik existiert, die diese Anforderungen erfüllt. Die Aufgabe ist also eine Ersatzkinematik zu suchen, die alle Zielposen des Endeffektors in seinem Arbeitsraum hat. Wird sie gefunden, kann basierend auf diesem Modell eine Mehrposen-Formgedächtnisstruktur entworfen werden. Für den Entwurf der Strukturen wurde daher ein weiterer

optimierungsbasierter Ansatz entwickelt, der auf einer Zustandsschätzung der geometrischen Parameter der Ersatzkinematik basiert.

Bei der hier verwendeten Ersatzkinematik handelt es sich wie in Kapitel 6.2.1 beschrieben, um eine serielle Kette tangential verknüpfter Bogensegmente und als solche kann der Entwurfszustandsraum dieser Kinematik mit den folgenden Parametern beschrieben werden: die Anzahl der Bogensegmente n_s , die Radien der Bogensegmente r_s , die Winkel θ_s , auf dem sich das Segment entlang dieses Radius erstreckt, und die axialen Drehwinkel φ_s der Basis jedes Segments relativ zu seinem direkten Nachbarn. Die Aufgabe ist nun, diese Parameter so zu bestimmen, dass die resultierende Ersatzkinematik alle Endeffektorposen erreichen kann. Dafür wird die Aufgabe in zwei Schritte unterteilt: Im ersten Schritt werden verschiedene Kinematiken erstellt und im zweiten Schritt wird versucht, mit diesen Roboterkinematiken die vorgegebenen Endeffektorendposen zu erreichen, indem, analog zu dem Vorgehen im vorherigen Kapitel, die Gelenkwinkel der Ersatzgelenke berechnet werden. Wenn z.B. ein Set aus n_s , r_s und θ_s ausgewählt wird, ist die Ersatzkinematik definiert und die Werte von φ_s können durch den Ansatz im vorherigen Kapitel gelöst werden. Im Folgenden wird der Prozess immer mit n_s , r_s und θ_s als gegeben und mit φ_s als gesuchtes Set an Parametern beschrieben. Es könnte grundsätzlich aber auch ein anderes Setting gewählt werden, z.B. mit vorgegebenen φ_s und l_s (Länge eines Kreissegments, s. Kapitel 2.1.3) und den Zielvariablen θ_s . Um in dem ersten Schritt Strukturen zu finden, die alle Endeffektor-Zielposen erreichen können, wurde der im Folgenden beschriebene Prozess verwendet.

Dieser Prozess ist dem Partikelfilter nachempfunden, einem iterativen Algorithmus, der häufig in der Zustandsschätzung verwendet wird (Walker 2013). Die Eingaben für den Prozess sind n_{ee} Endeffektorposen in Form von homogenen Transformationsmatrizen und ein zulässiger Bereich für jeden der Segmentparameter n_s , r_s und θ_s . Der zulässige Bereich definiert die Minimal- und Maximalwerte, in denen die Segmentparameter der Ersatzkinematik ausgewählt werden dürfen:

$$n_s \in [n_{s,min}; n_{s,max}], \quad r_{s,j} \in [r_{s,j,min}; r_{s,j,max}], \quad \theta_{s,j} \in [\theta_{s,j,min}; \theta_{s,j,max}] \quad (6.11)$$

Im ersten Iterationsschritt werden zunächst N Kinematiken generiert, indem für jede Ersatzkinematik Werte für n_s , r_s und θ_s aus einer stetigen Gleichverteilung über ihren zulässigen Bereich ausgewählt werden. Oder anders ausgedrückt, wird aus dem gleichverteilten Entwurfsraum eine Stichprobe mit N Proben entnommen. Wird z.B. die Anzahl der Segmente mit $n_{s,min} = 3$ und $n_{s,max} = 6$ begrenzt, ist die Wahrscheinlichkeit eine Ersatzkinematik mit drei, vier, fünf oder sechs Segmenten zu erhalten, gleich groß. Bei der Erstellung jeder

Ersatzkinematik werden die Werte für $\boldsymbol{\varphi}_s$ nach dem Zufallsprinzip initialisiert (bei Typ 3 Strukturen, bei denen es keine Einschränkungen für $\boldsymbol{\varphi}_s$ gibt) oder beginnen bei null (bei Strukturen von Typ 1 und 2, bei denen $\boldsymbol{\varphi}_s$ begrenzt werden muss). Das Problem, passende Gelenkwinkel der Ersatzgelenke zu finden, wird dann für jede Ersatzkinematik für alle vorgegebenen Endeffektorendposen gelöst, analog zu dem Vorgehen in dem vorherigen Kapitel. Damit ergibt sich bei allen Ersatzkinematiken für jede Endeffektorendpose eine Konfiguration ($\boldsymbol{\varphi}_s', \boldsymbol{\varphi}_s''$, usw.), bei der der Fehler des Endeffektors zur gewünschten Zielpose minimiert wird.

Um die Güte der erstellten Ersatzkinematiken bewerten zu können, wird eine Kostenfunktion definiert. Diese bewertet für eine Ersatzkinematik die Kombination der Positions- und Orientierungsfehler der Endeffektorposen zu den zugehörigen Zielposen. Für eine Ersatzkinematik ergeben sich pro Zielpose ein Positionsfehler $\mathbf{e}_p = [e_{p,x} \ e_{p,y} \ e_{p,z}]^T$ und ein Orientierungsfehler $\mathbf{e}_o = [e_{o,x} \ e_{o,y} \ e_{o,z}]^T$. Die Kosten C_p des Positionsfehlers und die Kosten C_o des Orientierungsfehlers ergeben sich dann für mehrere Zielposen mit:

$$\begin{aligned} C_p &= \|\mathbf{e}_p\| + \|\mathbf{e}_p'\| + \|\mathbf{e}_p''\| + \dots \\ C_o &= \|\mathbf{e}_o\| + \|\mathbf{e}_o'\| + \|\mathbf{e}_o''\| + \dots \end{aligned} \quad (6.12)$$

Es können weitere „Kosten“ für die Bewertung der Strukturen definiert werden. Ein weiterer Kostenfaktor wird für die Länge der Ersatzkinematik berechnet, damit lange Ersatzkinematiken (und damit lange Formgedächtnisstrukturen) schlechter als kurze Ersatzkinematiken bewertet werden. Die Länge einer Ersatzkinematik berechnet sich aus dem Skalarprodukt der Segmentradien \mathbf{r}_s und den Aufspannwinkeln $\boldsymbol{\theta}_s$. Die Kosten für die Länge der Struktur ergeben sich also mit:

$$C_l = \mathbf{r}_s \cdot \boldsymbol{\theta}_s \quad (6.13)$$

Um die einzelnen Summanden der Kostenfunktion abstimmen zu können, werden sie mit den Faktoren k_p , k_o und k_l multipliziert. Damit kann eine Gewichtung der einzelnen Punkte vorgenommen werden. Es ergibt sich also die folgende Kostenfunktion:

$$C = k_p \cdot C_p + k_o \cdot C_o + k_l \cdot C_l \quad (6.14)$$

Für jede der N erstellten Ersatzkinematiken wird diese Kostenfunktion berechnet und die Kinematiken nach diesen Kosten sortiert. Diese Kostenfunktion lässt sich mit beliebigen

weiteren Kostenpunkten erweitern, es ist z.B. denkbar, Kollisionen mit Umgebungsstrukturen oder sich selbst zu erfassen und in den Entwurfsprozess einfließen zu lassen.

In den folgenden Iterationen wird der Satz von N Ersatzkinematiken jedes Mal neu zusammengestellt. Bei jeder Iteration werden diese neuen Ersatzkinematiken aus drei Gruppen zusammengesetzt. Die erste Gruppe besteht aus den Ersatzkinematiken der letzten Iteration mit den geringsten Kosten. Diese werden ohne Änderungen der Kreissegmentparameter übernommen. Die zweite Gruppe wird durch ein Resampling-Verfahren aus der Menge der bereits evaluierten Ersatzkinematiken der vorherigen Iteration ausgewählt. Dabei werden wieder die Kinematiken aus dem vorherigen Satz mit den geringsten Kosten ausgewählt, jedoch werden die Zustandsvariablen n_s , r_s und θ_s dieser Strukturen nun mit einer künstlichen Unsicherheit belegt, ähnlich dem Konzept der Mutation in genetischen Algorithmen (Momani *et al.* 2016; Nearchou 1998). Dies wird dadurch erreicht, dass die neuen Zustandsvariablen einer Normalverteilung mit dem Mittelwert des vorherigen Zustandswertes entnommen werden. Die zugehörigen Standardabweichungen s_{n_s} , s_{r_s} und s_{θ_s} sind dabei einstellbare Parameter des Optimierungsmodells. Das dritte Set der neuen Ersatzkinematiken wird nach dem gleichen Vorgehen wie die Erstellung der Ersatzkinematiken in der ersten Iteration umgesetzt, das heißt, die Kreissegmentparameter werden aus Gleichverteilungen zufällig gezogen. Der Anteil der Strukturen in jeder dieser drei Gruppen wird über die Koeffizienten k_{keep} , k_{mut} , und k_{new} mit Werten zwischen null und eins bestimmt. In der ersten Iteration ist $k_{keep} = k_{mut} = 0$ und $k_{new} = 1$. Es gilt:

$$k_{keep} + k_{mut} + k_{new} = 1 \quad (6.15)$$

Bei jedem Iterationsschritt nehmen so die Kosten der durchschnittlichen Ersatzkinematik ab. Bei ausreichend hoher Gewichtung der Fehler der Endeffektorposen in der Kostenfunktion können Strukturen erzeugt werden, die alle Zielkonfigurationen erreichen und gleichzeitig die anderen in der Kostenfunktion enthaltenen Parameter minimieren. Es werden zwei Abbruchbedingungen formuliert. Die erste Abbruchbedingung ist, wenn eine Ersatzkinematik gefunden wird, deren Kosten C kleiner als ein definierter Grenzwert C_{lim} sind. Die zweite Abbruchbedingung ist die Überschreitung einer maximalen Anzahl an Iterationen. Die Struktur des Algorithmus ist in Abb. 32 schematisch abgebildet.

Auch hier hängt die Lösungsfindung von den geometrischen Beschränkungen der Struktur ab. Wie im vorherigen Kapitel bereits beschrieben, ergeben kleine Elementhöhen bei Typ 1 und Typ 2 Strukturen kleine maximale Verdrehwinkel φ_{max} , was zu keinen oder schlechten Lösungen des Problems führt. Im Laufe der Lösungsfindung von Strukturen für verschiedene Endeffektorendposen hat sich herausgestellt, dass es für die Lösungsfindung von Vorteil sein

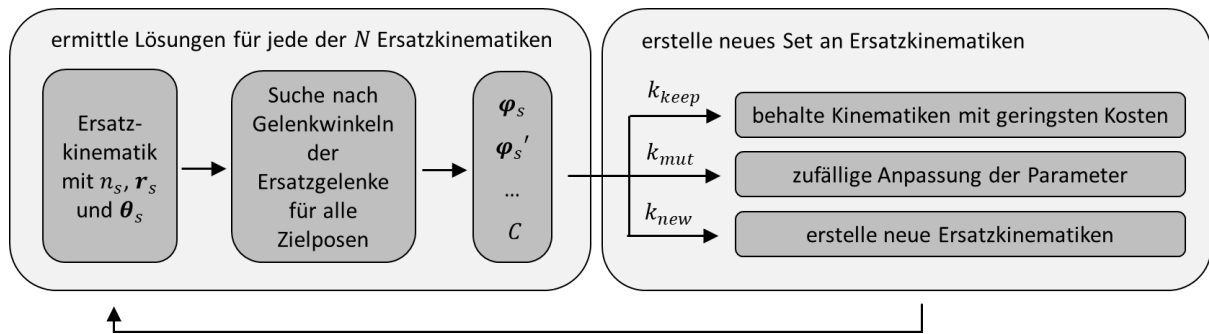


Abb. 32: Optimierungsprozess zur Suche nach einer geeigneten Ersatzkinematik, welche alle Endeffektorendposen erreichen kann

kann, wenn steife Kreissegmente in die Struktur eingefügt werden. Das bedeutet für die Ersatzkinematik, dass sich die Kreissegmente in beiden Endeffektorendposen der Struktur nicht verändern. Oder in den Kreissegmentparametern ausgedrückt, gilt für dieses steife Segment $r_{s,j} = r_{s,j}'$, $\varphi_{s,j} = \varphi_{s,j}'$ und $\theta_{s,j} = \theta_{s,j}'$. Der Vorteil dieses Optimierungsprozesses ist nun, dass das Einbauen von geraden Segmenten (wie in Kapitel 6.2.2 vorgeschlagen) oder steifen Segmenten in die Ersatzkinematiken, einfach mit in den Prozess integriert werden kann.

7. Realisierung am Beispiel erster Funktionsmuster

Um die Funktionalität der implementierten Software zur automatisierten Konstruktion und die Funktionalität der erstellten Strukturen zu validieren, wurden verschiedene Strukturen mit unterschiedlichen Endeffektorzielposen entworfen. Für diese Zielposen wurde mit Hilfe der verschiedenen Vorgehensweisen aus Kapitel 6.2 jeweils eine Ersatzkinematik gefunden, die diese Endeffektorendposen erreichen kann. Auf Basis der gefundenen Ersatzkinematiken wurden die Strukturen automatisiert entworfen und im SLS-Verfahren gedruckt. In Abb. 33 sind drei verschiedene Funktionsmuster dargestellt. Es ist jeweils das in MATLAB berechnete und erstellte Modell und die finale gedruckte Struktur dargestellt, um einen qualitativen Vergleich von Modell und Realität zu erhalten. Bei allen drei Strukturen wurden die Position des Endeffektors und die Ausrichtung der Z-Achse des Endeffektors als Entwurfsziel vorgegeben

Das erste Funktionsmuster (Abb. 33.I) ist eine Struktur mit dem mechanischen Konzept von Typ 1. Das heißt die Struktur wird durch zwei Seilzüge in die jeweilige Anschlagstellung ausgelenkt. Bei dieser Struktur war die erste Anschlagstellung bereits vorgegeben und die zweite Pose wurde wie in Kapitel 6.2.2 beschrieben entworfen.

Funktionsmuster II ist ebenfalls eine Typ 1 Struktur, hier wurde jedoch das optimierungsbasierte Vorgehen aus Kapitel 6.2.3 angewendet, um eine Struktur zu finden, die beide Endeffektorendposen erreicht. In diesem Fall wurde eine Struktur gefunden, die in beiden Anschlagstellungen eine Art Spirale darstellt. Dies ist vor allem auf die Beschränkungen der Verdrehwinkel zwischen den Kreissegmenten zurückzuführen. Diese führen dazu, dass die Kreissegmente während des Optimierungsprozesses immer nur in einem kleinen Winkelbereich zueinander verdreht werden. Hier wird aber auch ein Problem des optimierungsbasierten Vorgehens deutlich, da auch Lösungen erzeugt werden, welche zwar den Vorgaben der Endeffektorendposen genügen, aber eine nicht optimale Anschlagstellung einnehmen. In diesem Fall wäre vermutlich eine deutlich kürzere Struktur möglich, welche weniger Raum einnimmt.

Funktionsmuster III ist eine Typ 3 Struktur, welche auch mit dem optimierungsbasierten Ansatz aus Kapitel 6.2.3 erstellt wurde und aus zwei konzentrischen Strukturen besteht. Hier verläuft ein Seilzug in der Mitte der Struktur und die beiden Anschlagstellungen werden je nach relativer Verdrehung der konzentrischen Strukturen erreicht.

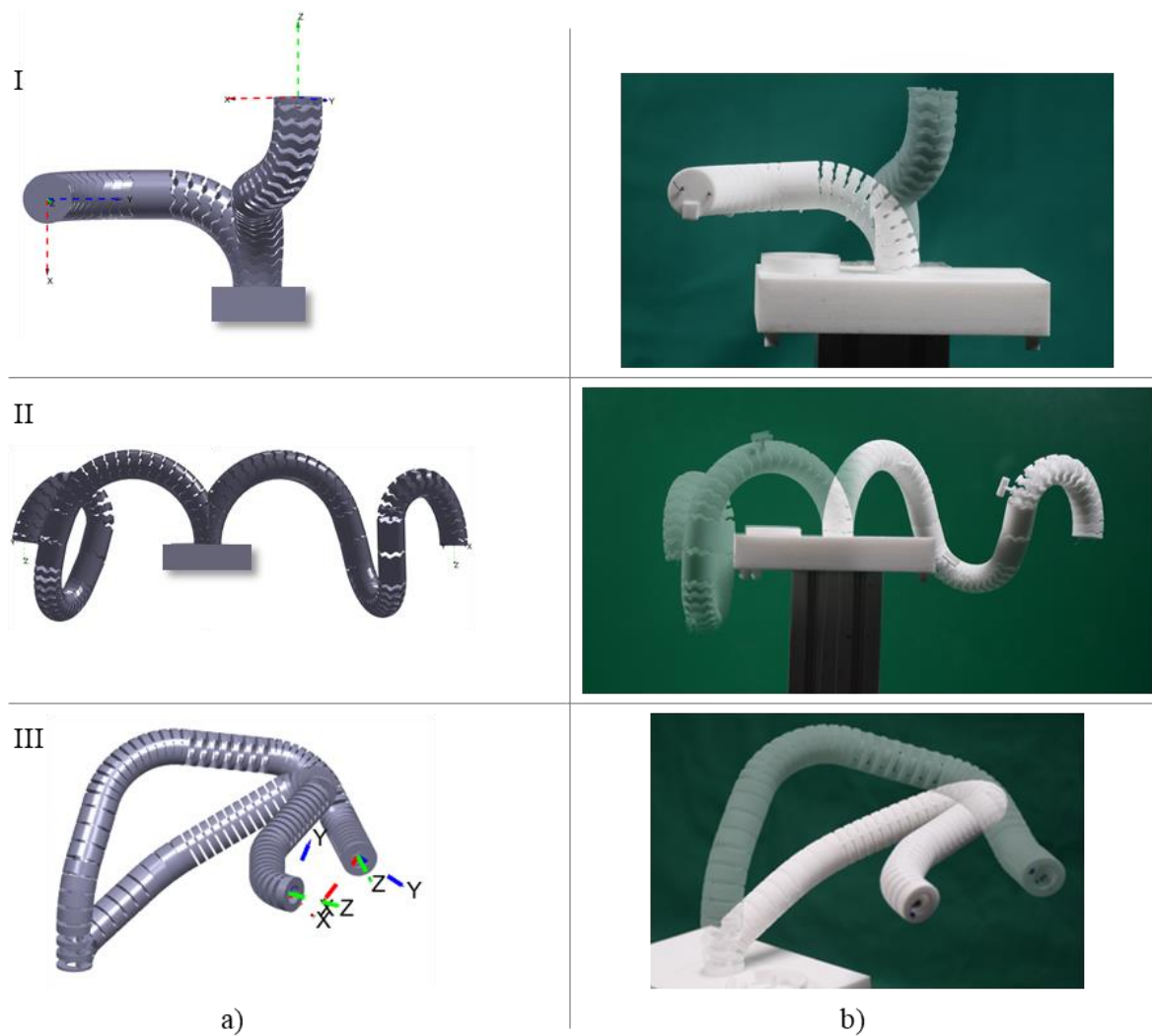


Abb. 33: a) MATLAB-Modelle und b) reale Strukturen von drei verschiedenen Funktionsmustern der Formgedächtnisstrukturen mit zwei Endeffektorzielposen. Das Bild der zweiten Anschlagstellung wurde jeweils transparent über das Bild der ersten Anschlagstellung gelegt. Die Längen der Strukturen sind wie folgt: 114 mm (I), 331 mm (II) und 239 mm (III). Die Strukturdurchmesser: 16 mm (I) bzw. (II), 14,8 mm (III). (angelehnt an Schiele *et al.* 2021)

8. Modellierung des Bewegungsverhaltens

Um Aussagen über die Bewegung der Strukturen treffen zu können und um Strukturen für bestimmte Bewegungsaufgaben erstellen zu können, wird eine Modellierung des Bewegungsverhaltens benötigt. Es wird dazu ein quasistatisches Modell der Strukturen erzeugt. Dieses Modell vernachlässigt alle dynamischen Effekte und betrachtet die Struktur als (quasi)statisches Masse-Feder-System. Im Entwurfsprozess spielt die Rechendauer des Modells eine große Rolle, da zur Erzeugung eines bestimmten Bewegungsverhaltens die Berechnung der Bewegung viele Male ausgeführt werden muss, bis die Anforderungen an die Bewegung erfüllt sind. Das quasistatische Modell ist hier von Vorteil, da es im Gegensatz zu einem Modell, das dynamische Effekte miteinbezieht, weniger rechenintensiv ist.

8.1 Quasistatisches Modell der Strukturen

Wie in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben, bestehen die hier beschriebenen Strukturen aus einer Verkettung von steifen Zwischenelementen und Festkörpergelenken. Zur Modellierung der Strukturen werden die Festkörpergelenke mit dem *Pseudo-Rigid-Body*-Modell beschrieben (s. Kapitel 2.2), das heißt, die relative Position der Rotationsachse eines Gelenks zu den zwei angrenzenden Elementen bleibt während der Auslenkung unverändert und jedes Festkörpergelenk wird als Drehgelenk mit einer zur Auslenkung proportionalen Rückstellkraft beschrieben. Aus den anliegenden Seilkräften, der Gewichtskraft und externen Kräften und Momenten kann nun ein Kräfte- und Momentengleichgewicht aufgestellt, die resultierenden Momente in den Gelenken berechnet und die daraus resultierende Auslenkung der Struktur bestimmt werden. Im Hinblick auf die Implementierung in MATLAB wird die Modellierung so beschrieben, dass sie für beliebige Formgedächtnisstrukturen verwendet werden kann, also für Strukturen mit mehreren Seilzügen an beliebigen Positionen und unterschiedlichen Typen von Festkörpergelenken. Auch wenn in den Darstellungen in den folgenden Abbildungen Festkörpergelenke mit kreisförmigem Querschnitt abgebildet sind, gilt die hier beschriebene Vorgehensweise auch für andersförmige drehgelenk- und kugelgelenkartige Festkörpergelenke. Voraussetzung ist nur, dass sie sich ausreichend genau mit dem *Pseudo-Rigid-Body*-Modell beschreiben lassen können.

Zur Aufstellung der Kräfte- und Momentengleichgewichte wird ein Element wie in Abb. 34.b dargestellt freigeschnitten. Daraus ergeben sich alle Kräfte und Momente, die an Element i angreifen. Das im unteren Gelenk wirkende Moment $M_{f,i}$ berechnet sich aus dem Momentengleichgewicht:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M}_{f,i} &= -\mathbf{M}_{f,i+1} - \mathbf{r}_{f,i} \times \mathbf{F}_{f,i+1} & (a) \\
 &+ \mathbf{r}_{G,i} \times \mathbf{F}_{G,i} & (b) \\
 &+ \mathbf{r}_{G,i} \times \mathbf{F}_{ext,i} + \mathbf{M}_{ext,i} & (c) \\
 &+ \sum_{l=1}^{n_w} (\mathbf{r}_{wlb,i} \times \mathbf{F}_{wl,i} - \mathbf{r}_{wlt,i} \times \mathbf{F}_{wl,i+1}) & (d)
 \end{aligned} \tag{8.1}$$

Der Summand (a) beschreibt die Kräfte und Momente, die aus dem angrenzenden Gelenk auf das Element wirken, (b) die Momente aus der Gewichtskraft und (c) alle Momente durch externe Kräfte und Momente. Dabei muss beachtet werden, dass die am Schwerpunkt S resultierenden externen Kräfte und Momente herangezogen werden. Der Summand (d) beschreibt die Momente, die aus den Seilkräften resultieren. Durch das Aufstellen des Kräftegleichgewichts wird die auf das Gelenkzentrum wirkende Kraft $\mathbf{F}_{J,i}$ bestimmt:

$$\mathbf{F}_{f,i} = -\mathbf{F}_{f,i+1} + \mathbf{F}_{G,i} + \mathbf{F}_{ext,i} + \sum_{l=1}^{n_w} (\mathbf{F}_{wl,i} - \mathbf{F}_{wl,i+1}) \tag{8.2}$$

Während der Auslenkung und je nach Ausrichtung der gesamten Struktur ändert sich die Orientierung des Elements und damit auch die Richtung des Gravitationsvektors. Da die Vektoren im Basis-Koordinatensystem des Elements beschrieben werden, muss der

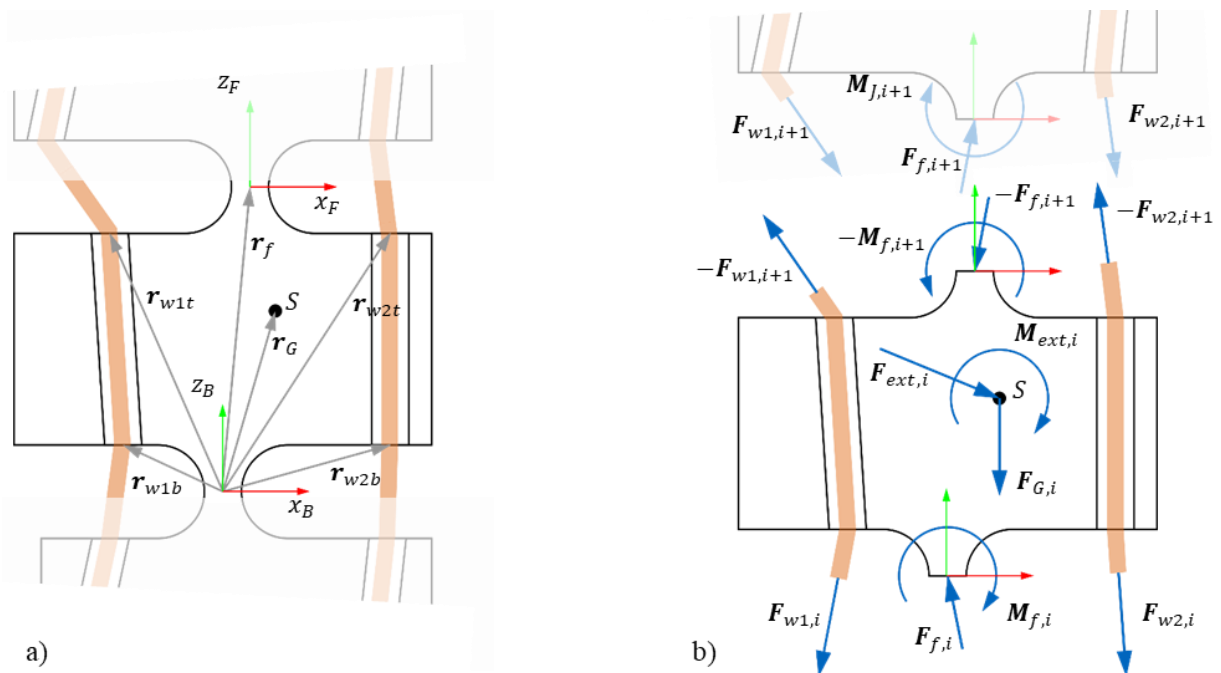


Abb. 34: a) Seitenansicht eines Elements mit den Positionsvektoren aller Kräfte und Momente. b) Freigeschnittenes Element mit allen angreifenden Kräften und Momenten. S bezeichnet den Schwerpunkt des Elements. (Beide Abbildungen vereinfacht als 2D Darstellung.)

Gravitationsvektor in das Basis-Koordinatensystem des Elements umgerechnet werden, um die am Element i wirkende Gewichtskraft $F_{G,i}$ zu berechnen:

$$\mathbf{F}_{G,i} = m_i \cdot {}^{B_i}\mathbf{g} \quad \text{mit} \quad {}^{B_i}\mathbf{g} = {}^{B_i}\mathbf{T}_w \cdot {}^w\mathbf{g} \quad (8.3)$$

Ebenso werden externe Kräfte und Momente ins Element Basis-Koordinatensystem umgerechnet:

$$\mathbf{F}_{ext,i} = {}^{B_i}\mathbf{T}_w {}^w\mathbf{F}_{ext,i} \quad \text{und} \quad \mathbf{M}_{ext,i} = {}^{B_i}\mathbf{T}_w {}^w\mathbf{M}_{ext,i} \quad (8.4)$$

Die Seilreibung hat einen großen Einfluss auf die Kräfte und Momente innerhalb der Struktur. Während der Auslenkung der Struktur wird der Umlenkungswinkel der Seile größer, was zu größeren Normalkräften und damit auch zu größeren Reibungskräften führt. Diese Reibungseffekte führen zu einer Abnahme der Seilkraft über die Elemente, das heißt vom ersten Element an der Basis bis zum letzten Element an der Spitze der Struktur nimmt die Seilkraft ab. Je kleiner die Seilkraft, desto kleiner wird das auf das Gelenk wirkende Moment und desto kleiner wird die Auslenkung. Um eine Voraussage über das Bewegungsverhalten der Strukturen machen zu können, ist es daher notwendig die auftretenden Reibungseffekte zu beschreiben. Bei jeder Umlenkung des Seils innerhalb der Struktur kann die Seilreibung mit Hilfe des Euler-Eytelwein-Modells berechnet werden (Eytelwein 1801). Für die Beträge der Seilkräfte kann mit der Seilreibungsformel von Euler-Eytelwein folgender Zusammenhang aufgestellt werden:

$$\|\mathbf{F}_{w2}\| \leq \|\mathbf{F}_{w1}\| \cdot e^{\mu \cdot \beta} \quad (8.5)$$

Diese Formel gilt für ein Seil, das über eine Rolle mit dem Umschlingungswinkel β läuft und einen Reibungskoeffizienten μ zwischen Seil und Rolle aufweist. Die Seilkräfte während der Auslenkung der Struktur hängen damit nur von μ und β ab (s. Jeong & Cho 2015). In Abb. 35 sind zwei Möglichkeiten, den Seilzug durch die Struktur zu führen, abgebildet (vgl. Kapitel 5.3.4). Wird der Seilzug auf geradem Weg durch ein Element geführt (Abb. 35.a), setzt sich der Umschlingungswinkel aus den Umlenkungswinkel am unteren und oberen Austrittspunkt des Seilzugs zusammen ($\beta = \beta_1 + \beta_2$). Bei der in Kapitel 5.3.4 komplexeren Seilzugführung kommt der Umlenkungswinkel β_3 dazu und es wird $\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3$ angenommen (Abb. 35.b). Es ist zu beachten, dass die Euler-Eytelwein-Formel in der Form $\|\mathbf{F}_{w2}\| = \|\mathbf{F}_{w1}\| \cdot e^{\mu \cdot \beta}$ nur für den Fall der maximalen Haftreibung oder für den Fall der Gleitreibung gültig ist. In dem hier verwendeten quasistatischen Modell wird der Fall der Gleitreibung $\mu = \mu_k$ angenommen, da mit dem Modell die Bewegung der Strukturen abgebildet wird. Eine Alternative zu Euler-Eytelwein ist die direkte Berechnung der

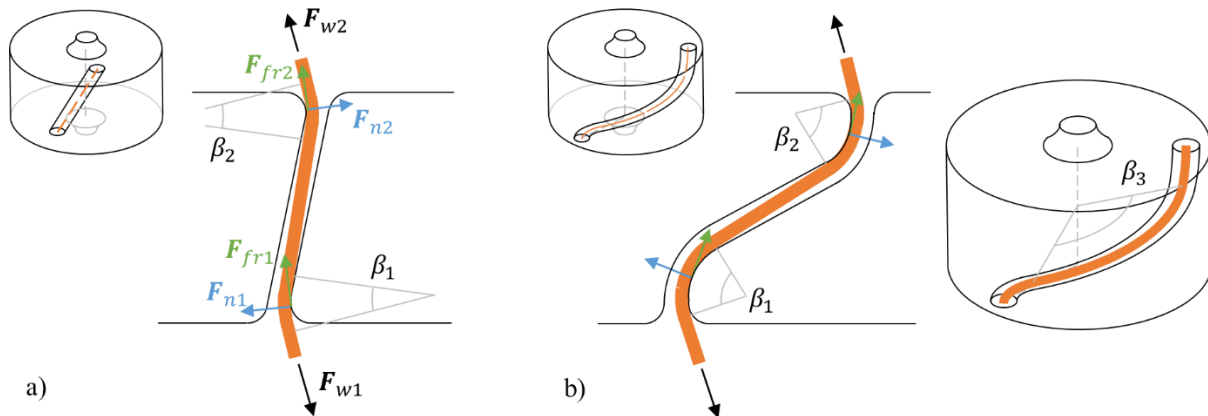


Abb. 35: a) Seilkräfte und die auf das Element wirkenden Normalkräfte und Seilreibungskräfte an einem Element mit gerader Seilzugführung und b) an einem Element mit gebogener Seilzugführung.

Normalkräfte F_n und Reibungskräfte F_{fr} über ein Kräfte- und Momentengleichgewicht, mit deren Hilfe F_{w2} ermittelt werden kann.

Dass die Reibung in dem Modell nicht vernachlässigt werden darf, wird aus Abb. 36 ersichtlich. Hier ist ein einzelnes Segment in einem nicht voll ausgelenkten Zustand abgebildet. In Abb. 36.a wird der Gleitreibungskoeffizient μ_k auf 0 gesetzt, während in Abb. 36.b die Reibung berücksichtigt wird. In Abb. 36.b nimmt die Seilkraft über die Länge der Struktur ab und die Reaktionsmomente in den Gelenken an den basisfernen Elementen sind kleiner als die Reaktionsmomente in den basisnahen Gelenken. Dieser Effekt führt zu einer nicht konstanten Krümmung der Segmente während der Auslenkung der Struktur. An dem ersten basisnahen

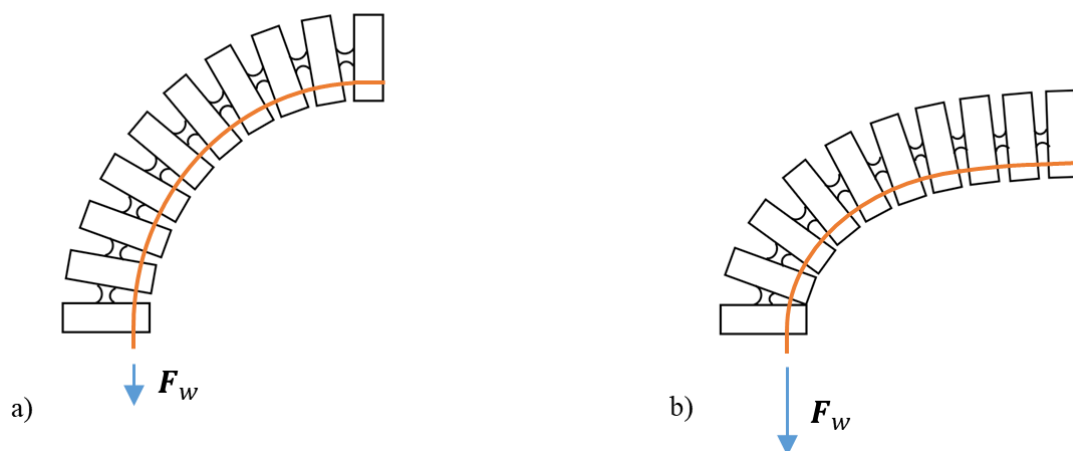


Abb. 36: Auslenkung eines Struktursegments a) bei Vernachlässigung der Seilreibung und b) unter Berücksichtigung der Seilreibung.

Gelenk ist in diesem Beispiel schon die vollständige Auslenkung erreicht, da hier fast die volle Seilkraft des Aktors angreift. Im Gegensatz dazu sind die Gelenke nahe am Endeffektor nur minimal ausgelenkt. Dementsprechend ist eine höhere Zugkraft F_w am Seil nötig, um den Endeffektor in Abb. 36.b in dieselbe Orientierung wie in Abb. 36.a zu bringen, bzw. um die Struktur vollständig auszulenken.

Da die Festkörpergelenke mit einem *Pseudo-Rigid-Body*-Modell beschrieben werden, kann die Rückstellkraft eines Gelenks als proportional zum Auslenkwinkel angenommen werden. An einem Gelenk wirkt damit das Rückstellmoment $\hat{M}_{f,i}$:

$$\hat{M}_{f,i} = \mathbf{C}_{s,i} \cdot \mathbf{\Gamma}_i = \mathbf{C}_{s,i} \cdot \gamma_i \cdot \mathbf{e} \quad (8.6)$$

Das Rückstellmoment ist somit das Produkt aus der Steifigkeitsmatrix \mathbf{C}_s des Gelenks und dem momentanen Auslenkwinkel γ_i mit der Drehachse \mathbf{e} . Für die Steifigkeitsmatrix \mathbf{C}_s der hier eingesetzten Gelenke werden nur die Diagonaleinträge berücksichtigt. Damit ergibt sich:

$$\mathbf{C}_s = \begin{bmatrix} c_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & c_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & c_{zz} \end{bmatrix} \quad (8.7)$$

Damit die Federsteifigkeiten auf Basis von Formel (2.8), also $c = E \cdot I / h_f$, berechnet werden können, müssen die folgenden Vereinfachungen als Annahmen getroffen werden: 1) Die Festkörpergelenke besitzen einen konstanten Querschnitt. 2) Die Gelenke haben homogene Materialeigenschaften. 3) Die Deformation tritt im linear-elastischen Bereich auf. Zur Berechnung der Einträge der Steifigkeitsmatrix werden die Flächenträgheitsmomente der Querschnittsflächen an der dünnsten Stelle der Festkörpergelenke herangezogen. Für die kugelgelenkartigen Kreiskerbgelenke berechnen sich die Drehfedersteifigkeiten nach Einsetzen der Flächenträgheitsmomente für einen kreisförmigen Querschnitt mit:

$$c_{xx} = c_{yy} = \frac{E \cdot I_{yy}}{h_f} = \frac{E \cdot \pi \cdot d_f^4}{h_f \cdot 64} \quad \text{und} \quad c_{zz} = \frac{G \cdot I_{zz}}{h_f} = \frac{G \cdot \pi \cdot d_f^4}{h_f \cdot 32} \quad (8.8)$$

und für die drehgelenksartigen Kreiskerbgelenke mit einem rechteckigen Querschnitt mit:

$$c_{yy} = \frac{E \cdot I_{yy}}{h_f} = \frac{E \cdot b_f \cdot d_f^3}{h_f \cdot 12} \quad (8.9)$$

Im Fall der drehgelenksartigen Kreiskerbgelenke wird immer mit zwei in Drehachse versetzten Drehgelenken gearbeitet, was zu sehr hohen Steifigkeiten c_{xx} und c_{zz} im Vergleich zu c_{yy} führt. Daher wird bei dem Einsatz dieser Gelenke die Verformung um die x- und um die z-Achse vernachlässigt und als unendlich steif angenommen. Für die mit PA2200 lasergesinterten

Gelenke ist das E-Modul nach Breuninger *et al.* (2012) von der Materialstärke abhängig und wird mit den dort ermittelten Werten mit folgendem Zusammenhang extrapoliert:

$$E(d_f) = 1108 \frac{N}{mm^2} + 95,3 \frac{N}{mm^3} \cdot d_f \quad (8.10)$$

Das Schubmodul G berechnet sich mit dem E-Modul und der Querkontraktionszahl ν (hier mit $\nu = 0,4$ für Polyamid):

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (8.11)$$

Da von einem quasistatischen Zustand ausgegangen wird, herrscht zu jedem Zeitpunkt ein Kräfte- und Momentengleichgewicht, bei dem das im Gelenk wirkende Moment durch ein Rückstellmoment ausgeglichen wird. Um den Gleichgewichtszustand zu bestimmen und damit den Auslenkwinkel des i -ten Gelenks bei einer bestimmten Seilkraft und bestimmten externen Kräften und Momenten auszurechnen, müssen Formel (8.1) und (8.6) gleichgesetzt ($\widehat{\mathbf{M}}_{f,i} = \mathbf{M}_{f,i}$) und das Gleichungssystem nach $\mathbf{\Gamma}_i$ gelöst werden:

$$\mathbf{\Gamma}_i = \mathbf{C}_{s,i}^{-1} \cdot \mathbf{M}_{f,i} \quad (8.12)$$

Aufgrund der Nichtlinearität dieses Gleichungssystems lässt sich eine analytische Lösung nicht einfach bestimmen, daher wird hier ein numerischer Solver von MATLAB verwendet.

Die Richtungen und die Beträge der Seilkräfte, die Richtung der Gewichtskraft und die Richtungen der externen Kräfte sind von der Auslenkung der Struktur abhängig. Das heißt, der Vektor $\mathbf{M}_{f,i}$ ist immer von der aktuellen Auslenkung abhängig. Die Berechnung der Kräfte und Momente erfolgt daher iterativ. Beginnend in der unausgelenkten Konfiguration der Struktur oder einem vorherigen Gleichgewichtszustand wird die Struktur in kleinen Schritten ausgelenkt und dabei die Auslenkung $\mathbf{\Gamma}_i[k]$ aus der Auslenkung $\mathbf{\Gamma}_i[k - 1]$ im vorherigen Schritt berechnet:

$$\mathbf{\Gamma}_i[k] = \mathbf{C}_{s,i}^{-1} \cdot \mathbf{M}_{f,i}(\mathbf{\Gamma}_i[k - 1]) \quad (8.13)$$

In jedem Schritt werden die Winkel $\mathbf{\Gamma}_i[k]$ bestimmt, die benötigt werden, um die auftretenden Momente mit den Rückstellmoment des Gelenks auszugleichen und einen Gleichgewichtszustand des Systems zu erreichen. Bei der iterativen Lösung dieses Gleichungssystems neigt das System, sobald es nahe der Lösung angekommen ist, zu einem Aufschwingen. Wenn die berechnete Lösung anfängt, um einen Wert zu oszillieren, wird daher Formel (8.13) im letzten Schritt als Nullstellenproblem definiert, für welches in MATLAB zuverlässig eine Lösung gefunden werden kann.

Wird ein Gelenk des Modells vollständig ausgelenkt, treten die Elemente über ihre Gelenkanschlüsse in Kontakt und die Kraft- und Momentenübertragung zwischen den beiden Elementen erfolgt nun auch über die Kontaktstrukturen. Es ist nun der maximale Auslenkwinkel α_i des i -ten Gelenks erreicht, durch die Kontaktstrukturen ist die relative Position und Orientierung vorgegeben und es gilt $\gamma_i = \alpha_i$. In diesem Fall werden die beiden Elemente als ein einzelner Festkörper angenommen bzw. die Steifigkeit des Gelenks unendlich hoch gesetzt, wie in Abb. 37.b gezeigt.



Abb. 37: a) Zwei Elemente mit vollständig ausgelenktem Festkörpergelenk. b) Für das quasistatische Modell äquivalente Betrachtung der Elemente als ein einzelner Starrkörper.

Die Lösung des Gleichungssystems in Formel (8.12) bzw. (8.13) ergibt also den Gleichgewichtszustand für bestimmte Seilkräfte und bestimmte statische externe Kräfte und Momente. Obwohl das Modell alle dynamischen Belastungen vernachlässigt, lassen sich bei einer ausreichend geringen Geschwindigkeit der Auslenkung gute Vorhersagen über das Bewegungsverhalten der Strukturen treffen. Mit dem hier beschriebenen Vorgehen kann auch die maximale Seilkraft zur Auslenkung der Struktur in die jeweiligen Anschlagstellungen berechnet werden. In einer Anschlagstellung sind die geometrischen Beziehungen innerhalb der Struktur mit den maximalen Auslenkwinkeln α_c gegeben. Erreichen alle Auslenkwinkel γ_i ihren Maximalwert $\alpha_{c,i}$, kann die Seilkraft berechnet werden, die bei den gegebenen Reibungseinflüssen und externen Belastungen benötigt wird.

8.2 Anpassen des Endeffektorpfads

Die bisher beschriebenen Strukturen können mehrere Endeffektorendposen einnehmen, wobei die Bewegung der Strukturen mit den in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Modellierungsansätzen vorhergesagt werden kann. Dabei wird eine Vorhersage über den Pfad des Endeffektors getroffen, der zurückgelegt wird, um von der unbelasteten Konfiguration in eine Endkonfiguration oder von einer Endkonfiguration in eine zweite Endkonfiguration zu kommen. In den Entwurfsprozessen, die bis zu diesem Punkt vorgestellt wurden, ist die

Bewegung der Struktur noch nicht berücksichtigt worden. Im nächsten Schritt soll nun durch Modifikation der Strukturparameter eine Anpassung des Endeffektorpfads an eine vorgegebene Bahnkurve ermöglicht werden. Da die Strukturen in schwer zugänglichen und engen Umgebungen eingesetzt werden sollen, ist eine Modifikation der Bewegung der Strukturen zwischen den Anschlagstellungen z.B. für die Vermeidung von Kollisionen mit der Umgebung wichtig. Um die Endeffektorendposen zu erreichen, ist mit dem bisherigen Vorgehen die Geometrie der Struktur größtenteils vorgegeben. Jedoch kann über die Modifikation bestimmter Strukturparameter der Bewegungsablauf der Struktur geändert werden.

Eine Möglichkeit, die Bewegung der Struktur zu beeinflussen, ist über die Federsteifigkeiten der Festkörpergelenke. Die Federsteifigkeiten der einzelnen Gelenke beeinflussen, welches Gelenk bei welcher Seilkraft wie weit ausgelenkt wird. Eine zweite Möglichkeit die Reihenfolge der Gelenkauslenkung zu beeinflussen, ist über die Abstände der Seilzugführungen und Festkörpergelenke. Werden Seilzugführung und Gelenk näher zusammengelegt, ergeben sich für die durch das Seil auf das Element wirkenden Kräfte kleinere Hebelarme. Bei den hier verwendeten drehgelenksartigen Festkörpergelenkpaaren kann sogar erreicht werden, dass das Gelenk überhaupt nicht aktuiert wird, indem der Seilzug zwischen dem Gelenkpaar geführt wird. Dann kreuzt der Seilzug die Drehachse und die resultierenden Momente im Gelenk werden sehr klein. Dieses Prinzip kommt in den in Kapitel 11.1 vorgestellten Kriechrobotern zum Einsatz. Wird der Abstand des Seilzugs zum Gelenk verändert, funktioniert allerdings die in Kapitel 5.3.4 vorgestellte Kollisionsvermeidung der Seilzugführungen nicht mehr und diese müssen manuell auf Kollisionen überprüft werden. Daher wurde dieses Prinzip für die optimierungsbasierte Beeinflussung des Endeffektorpfads nicht eingesetzt.

Die in diesem Kapitel beschriebene Vorgehensweise basiert auf der Änderung der Gelenksteifigkeiten der Festkörpergelenke. Der Vorteil dieser Art der Beeinflussung der Endeffektorbahnkurve ist, dass die Vorgehensweise des bisherigen Strukturentwurfs beibehalten werden kann und der Endeffektorpfad, einer bereits für bestimmte Endeffektorendposen ausgelegten Struktur, angepasst werden kann. Im Folgenden wird beschrieben, wie diese Anpassung der Federsteifigkeiten erfolgen kann, um die Bahnkurve des Endeffektors einem vorgegebenen Pfad anzunähern. Dafür werden die Gelenkdimensionen an der dünnsten Stelle der Kreiskerbgelenke betrachtet, also die Dicke d_f und die Breite b_f , welche nach Formel (8.8) und (8.9) maßgeblich Einfluss auf die Gelenksteifigkeiten haben. Die Gelenksteifigkeiten hängen bei den bisher verwendeten Kreiskerbgelenken von der Dicke der Gelenke d_f an der dünnsten Stelle ab, welche nicht beliebig verändert werden kann. Die

Maximal- und Minimaldicken werden hier bei den SLS-gefertigten Gelenken folgendermaßen festgelegt:

$$d_f \in [0,5 \text{ mm}; 1,5 \text{ mm}] \quad (8.14)$$

Die Minimaldicke von 0,5 mm wird durch den Laserdurchmesser der SLS-Anlage bestimmt (s. auch Kapitel 10.1), während die Maximaldicke von 1,5 mm einen Erfahrungswert darstellt, der für Auslenkungen der Kreiskerbgelenke bis zu einem Winkel von 20° gut funktioniert. Bei kleineren Auslenkwinkel sind aber durchaus dickere Gelenke möglich. Für die kugelgelenkartigen Kreiskerbgelenke ist damit die Dicke d_f der entscheidende Parameter. Bei drehgelenkartigen Kreiskerbgelenken kann auch mit der Breite b_f Einfluss genommen werden. Hier wird die minimale Breite eines Gelenks auch durch den Laserdurchmesser im SLS-Verfahren begrenzt, da sich b_f aus den beiden versetzten Gelenken zusammensetzt mit $2 \cdot 0,5 \text{ mm}$. Die maximale Breite wird durch den Querschnitt der Struktur \mathbf{P}_c und die Position des Gelenks r_f auf der Struktur begrenzt und ist damit eine Funktion von diesen zwei Parametern:

$$b_f \in [1 \text{ mm}; f(\mathbf{P}_c, r_f)] \quad (8.15)$$

Die Grenzwerte von d_f und b_f können sich je nach Kombination der beiden oder nach Größe der Struktur verschieben. So führt z.B. eine Kombination der minimalen Werte von d_f und b_f zu instabilen und brüchigen Gelenken. Bei kleinen und leichten Strukturen können sehr dünne Gelenke eingesetzt werden, während Gelenke mit den gleichen Maßen bei großen Strukturen schon durch das Eigengewicht versagen würden. Die Grenzen für die Festkörpergelenke dienen daher hier nur als Orientierungshilfe und müssen gegebenenfalls auf die Dimension der Struktur angepasst werden.

Zunächst wird in einem Vorversuch getestet, ob die Veränderungen der Gelenksteifigkeiten im Rahmen der gesetzten Grenzen der Gelenkgeometrien ausreichen, um den Endeffektorpfad merklich zu beeinflussen. Dafür werden acht Formgedächtnisstrukturen mit der gleichen Anschlagstellung aber unterschiedlichen Gelenksteifigkeiten erstellt und im SLS-Verfahren gedruckt. Die Strukturen haben eine Länge von 233 mm und bestehen jeweils aus 40 Elementen und 39 Gelenken, bei denen sich die Gelenkdimensionen (und damit auch die Gelenksteifigkeiten) der einen Hälfte, von den Gelenkdimensionen der zweiten Hälfte unterscheiden. Die Gelenke mit den Nummern 1 bis 22 werden dabei der ersten Hälfte der Struktur zugeordnet, wobei das Gelenk mit der Nummer 1 das Nächstgelegene zur Basis ist. Um einen Eindruck über die möglichen Endeffektorbahnänderungen zu bekommen, werden die Gelenkdimensionen der beiden Hälften der Struktur nun wie in Tabelle 1 geändert.

Tabelle 1 – Gelenkdimensionen der Testkörper:

Nr.	d_f [mm]	b_f [mm]		Bezeichnung
		Gelenk Nr. 1 bis 22	Gelenk Nr. 23 bis 39	
1	0,8	3,0	7,0	08x3070
2	0,8	7,0	3,0	08x7030
3	1,0	2,0	7,0	10x2070
4	1,0	7,0	2,0	10x7020
5	1,2	1,0	4,0	12x1040
6	1,2	4,0	1,0	12x4010
7	1,2	1,0	6,0	12x1060
8	1,2	6,0	1,0	12x6010

Für diese acht Strukturen wird mit der Implementierung des quasistatischen Modells aus Kapitel 8.1 die Bahnkurve des Endeffektors berechnet und in Abb. 38 aus verschiedenen Perspektiven dargestellt. Hier wird ersichtlich, dass die Gelenksteifigkeiten die Endeffektorpfade stark beeinflussen und für die Teststrukturen (mit der Länge von 233 mm) eine Verschiebung des Pfads von über 150 mm realisierbar ist. Das lässt den Schluss zu, dass sinnvolle Änderungen des Endeffektorpfads z.B. zur Kollisionsvermeidung durchaus durch eine Änderung der Gelenksteifigkeiten umsetzbar sind.

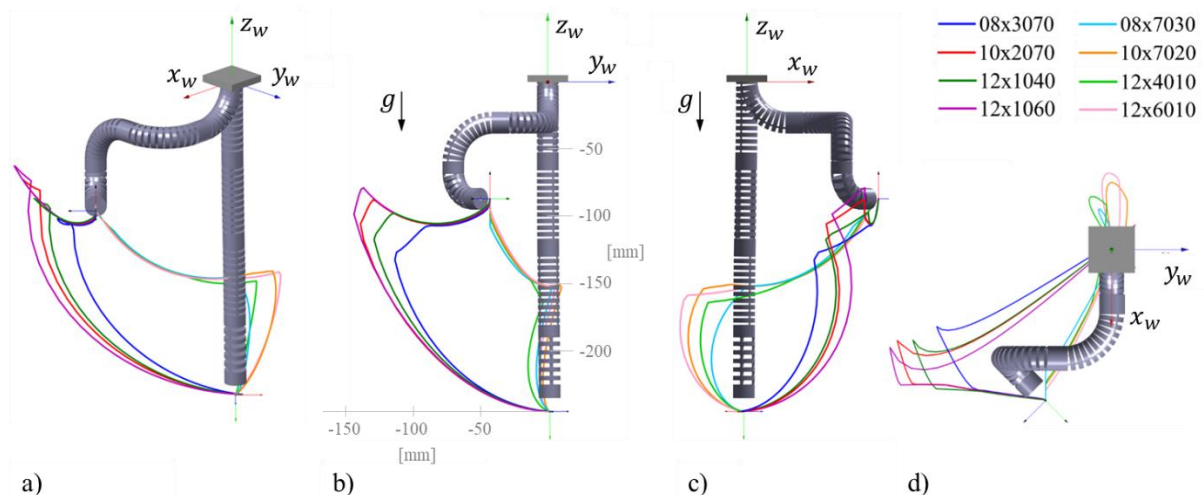


Abb. 38 Endeffektorbahnkurven der acht verschiedenen Testkörper (mit einem MATLAB Modell von einem der Testkörper). Die acht verschiedenen Bahnkurven stammen von Testkörpern mit derselben Anschlagstellung, die sich aber in ihren Gelenkdimensionen unterscheiden. a) Isometrische Ansicht, b) Ansicht zy-Ebene, c) Ansicht zx-Ebene, d) Ansicht xy-Ebene (mit Legende).

Um für eine bestimmte Seilkraft und ein definiertes Set an Gelenksteifigkeiten die Gesamtkonfiguration zu berechnen, wird das quasistatische Modell aus Kapitel 8.1 hergenommen. Es wird nun ein Optimierungsproblem definiert, um den Pfad des Endeffektors an einen vorgegebenen Pfad anzunähern. In diesem Fall wird auf die *Optimization Toolbox* in MATLAB zurückgegriffen. Dabei wird versucht, die Abweichungen der Posen des Endeffektors auf seiner Bahnkurve zu den Posen des Zielpfads zu minimieren, indem die Gelenksteifigkeiten der Struktur angepasst werden. Zur Bewertung einer Lösung wird wieder eine Kostenfunktion definiert, welche sich zum einen aus der Summe der kleinsten Abstände der Punkte des Zielpfads von dem Endeffektorpfad zusammensetzt, zum anderen aus der Abweichung der Orientierung des Endeffektors. Die Optimierungsvariablen sind die Gelenkdimensionen d_f und b_f . Dieses nichtlineare Optimierungsproblem mit Optimierungsvariablen, die innerhalb eines definierten Intervalls liegen, kann z.B. mit dem Solver *fmincon* gelöst werden. In Abb. 39 ist ein einfaches Beispiel für eine Struktur mit angepasstem Endeffektorpfad dargestellt. Die Struktur bewegt sich nur in einer Ebene und bildet in der Anschlagsstellung einen Dreiviertelkreis ab. Es ist der ursprüngliche nicht optimierte Pfad, der Zielpfad und der optimierte Endeffektorpfad nach Anpassung der Gelenksteifigkeiten gezeigt. Abb. 40 zeigt die Auslenkung der nicht optimierten und der optimierten Struktur bei jeweils gleichen Seilkräften.

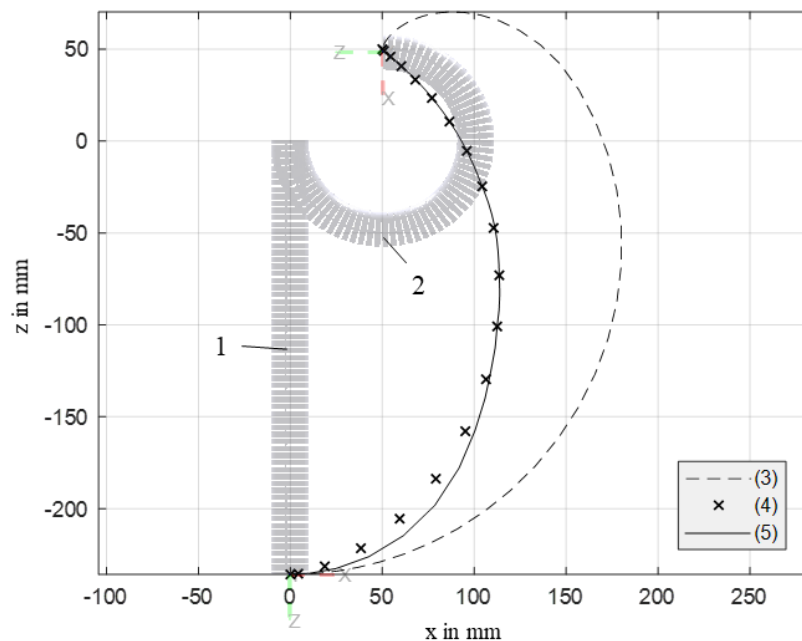


Abb. 39: Modell der Teststruktur in dem unausgelenkten (1) und ausgelenkten Zustand (2). Die Bahnkurve des Endeffektors vor der Optimierung (3). Für die Bahnkurve werden neue Punkte vorgegeben (4). Die Bahnkurve nach der Optimierung der Festkörpergelenksteifigkeiten (5).

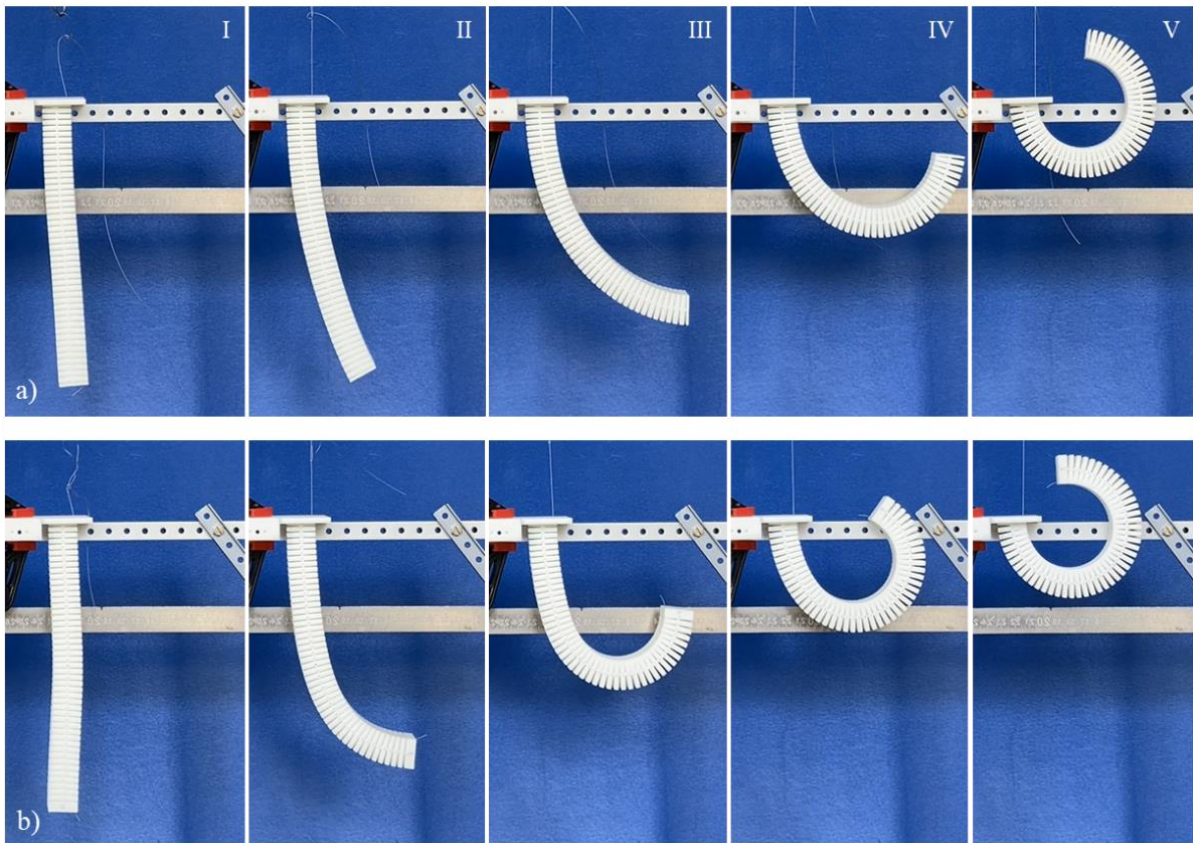


Abb. 40: Reale Auslenkung der Teststrukturen aus Abb. 39: a) in der oberen Bildreihe ist die nichtoptimierte Teststruktur und b) in der unteren Bildreihe die optimierte Teststruktur bei gleicher Erhöhung der Seilkraft von $F_w = 0$ (I) bis $F_w = F_{w,max}$ (V) abgebildet. In b) ist die Änderung des Bewegungsverhaltens durch die geänderten Gelenksteifigkeiten ersichtlich.

9. Implementierung mit der SG-Library

Die in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Konzepte und Vorgehensweisen zur Erstellung und Modellierung der Strukturen wurden aufbauend auf der SG-Library als MATLAB Funktionen implementiert. Dabei erfolgt die Implementierung wie die SG-Library mit einer funktionalen Architektur. Es wird ein Hauptskript erstellt, in dem die grundlegenden Einstellungen zur Erstellung der Strukturen definiert werden und eine Reihe von Funktionen zur Berechnung, Erstellung, Modellierung und Anpassung der Strukturen aufgerufen werden.

Im ersten Schritt werden alle Parameter zur Erstellung der Strukturen definiert. Die Bezeichnung der Variablen erfolgt dabei nach folgendem Muster: Alle Variablen, die sich auf die Zwischenelemente (*connector elements*) oder die Zylinder beziehen, haben ein *ce* vorangesetzt. Alle Variablen, die sich auf die Festkörpergelenke (*flexure joints*) beziehen, haben *fj* im Namen. Variablen mit *wh* beziehen sich auf die Seilzüge bzw. die Seilzugführungen (*wire holes*). Alle strukturspezifischen und herstellungsspezifischen einstellbaren Parameter sind im Detail in Anhang A.1 aufgeführt. Es folgt zunächst eine Überprüfung der Kompatibilität der Eingabeparameter. Da bestimmte Einstellung nicht kombiniert werden können, muss überprüft werden, ob bei der Definition der Parameter durch den Softwarebenutzer ungültige Kombinationen ausgewählt wurden.

Wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, folgt dann der automatisierte Teil des Konstruktionsprozesses, also die Suche nach einer geeigneten Struktur. Wird eine zufriedenstellende Lösung gefunden, wird ein Oberflächenmodell der Formgedächtnisstruktur erstellt und als STL-Datei exportiert. Der Ablauf des Codes und die Generierung der Strukturen entspricht den in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Konzepten und Methoden und dem Ablaufdiagramm in Abb. 26. In Anhang A.2 sind die wichtigsten Funktionen aufgelistet und in Anhang A.3 die Datenstruktur, der in MATLAB erstellten Formgedächtnisstrukturen beschrieben.

Die Konstruktion von 3D-Modellen in der SG-Library erfordert ein anderes Vorgehen als es in herkömmlichen CAD-Programmen üblich ist. Komplexe Körper werden üblicherweise mit Hilfe boolescher Operationen aufgebaut, das heißt ein Körper entsteht durch das Addieren und Subtrahieren von Grundkörpern. Die mit der SG-Library entworfenen Volumenkörper sind B-Rep-Modelle, die nur aus Dreiecken bestehen (s. Kapitel 2.4). Da boolesche Operationen von triangulierten Oberflächenmodellen je nach Anzahl der Dreiecke zeitaufwendig sein können, werden diese hier umgangen und andere Vorgehensweisen für den Aufbau der Körper verwendet. Eine Möglichkeit ist die direkte Modellierung der Oberflächen durch das

Verschieben der Punkte der SG. Für diese Vorgehensweise muss gegebenenfalls bei nicht ebenen Flächen die zu modellierende Fläche neu vernetzt werden, damit die Zielform mit einer entsprechend hohen Auflösung dargestellt werden kann. Eine weitere Möglichkeit ist ein rein additiver Aufbau der Körper. Dabei wird auf die Subtraktion der Grundkörper verzichtet und das Modell nur durch Addition von Grundkörpern aufgebaut. Die Geometrien entstehen dabei nicht über boolesche Operationen, sondern durch das Zusammensetzen aus überlappenden Grundkörpern. Dieses Vorgehen ist eine Vermischung der B-Rep mit einer Art der CSG-Repräsentation. Es entsteht ein Modell aus mehreren sich überlappenden Oberflächenmodellen. Fast alle in den additiven Fertigungsverfahren verwendeten *Slicer* können diese Art der zusammengesetzten Körper handhaben. Exemplarisch wird hier an zwei Beispielen aus dem Konstruktionsprozess der Strukturen gezeigt, wie der Aufbau und die Modifizierung der einzelnen Strukturteile mit diesen Vorgehensweisen erfolgt.

Die Erstellung der Seilzugführungen in Kapitel 5.3.4 wird über die Addition einzelner Grundkörper realisiert. Hier wird das Element schichtweise aufgebaut, um die Seilzugführung mit der Funktion aus Formel (5.6) zu realisieren. Die einzelnen Schichten werden übereinandergestapelt und ergeben so das Element (s. Abb. 41.a). Die Lochgeometrie muss dabei so angepasst werden, dass der Lochdurchmesser nie kleiner als d_w wird. Innerhalb der einzelnen Schichten muss also l_w so angepasst werden, dass d_w konstant bleibt (s. Abb. 41.b).

Ein weiteres anschauliches Beispiel wie die beschriebenen Prinzipien im Konstruktionsprozess angewendet werden, ist die sinusförmige Verzahnung der Elemente aus Kapitel 5.3.3. Als Beispiel wird hier ein nicht kreisförmiger Elementquerschnitt P_c herangezogen. Die Standardtriangulierung dieses Elements ist in Abb. 42.a dargestellt. Im ersten Schritt wird das

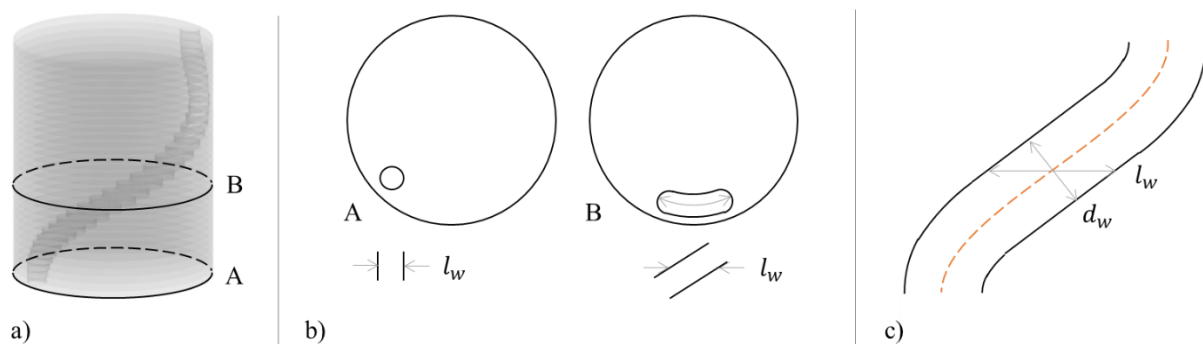


Abb. 41: Additiver Aufbau eines Elements in der SG-Library: a) Aufbau eines Elements mit Seilzugführung aus Kapitel 5.3.4. b) Schnitt A und B aus a): Die Lochgeometrie muss entsprechend der Schicht angepasst werden, c) um einen konstanten Lochdurchmesser d_w über die gesamte Seilzugführung zu erhalten.

Element in zwei Körper aufgeteilt, einen Zylinder im inneren des Elements und der äußeren Geometrie, die diesen Zylinder umschließt. Die Oberfläche dieser äußeren Geometrie wird neu trianguliert: Dabei wird der Teil der Fläche, der modifiziert werden soll, höher aufgelöst (s. Abb. 42.b). Im nächsten Schritt kann nun über die Modifizierung der z-Werte der VL die Kontaktgeometrie erstellt werden. Dabei wird der z-Wert eines Punktes für eine sinusförmige Verzahnung mit folgendem Zusammenhang beschrieben:

$$z_{new} = z + A \cdot \sin(n_{wa} \cdot \delta) + \frac{h_f}{2} - \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \tan \frac{\alpha_c}{2} \quad (9.1)$$

Auf den alten z Wert eines Punktes wird die Sinusfunktion $A \cdot \sin(n_{wa} \cdot \delta)$ aufgeschlagen, wobei A die Amplitude, n_{wa} die Anzahl der Wellen und δ den Winkel des Punktes zur x-Achse beschreibt. Mit dem Term $\frac{h_f}{2} - \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \tan(\alpha_c/2)$ wird die Steigung der Kontaktgeometrie angepasst, wobei sich die Werte von x und y immer auf den aktuellen Punkt beziehen. Formel (9.1) wird dabei auf alle Punkte der VL angewendet, welche im zu modifizierenden Bereich liegen, also auf der oberen Seite des äußeren Teils des Elements. Wendet man das gleiche Vorgehen auf die Unterseite des nächsten Elements an, erhält man so den Auslenkwinkel α_c . Im letzten Schritt werden die äußere Geometrie und der innere Zylinder wieder zu einem Element zusammengesetzt, indem die beiden SGs in einer einzelnen SG gespeichert werden. Das resultierende Element ist in Abb. 42.c dargestellt. Mit diesem Vorgehen können Elementquerschnitte mit beliebigen Außen- und Innenkonturen angepasst werden.

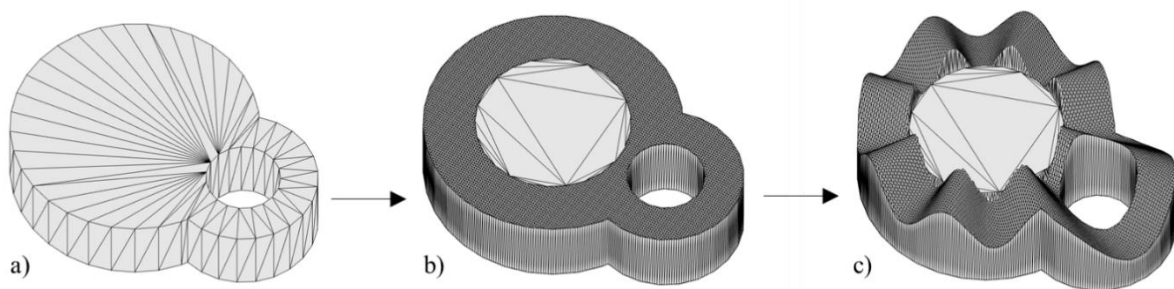


Abb. 42: Erstellung einer Kontaktgeometrie über die Modifizierung der Oberfläche eines Elements.
 a) Auf dem Element mit Standardtriangulierung wird im ersten Schritt b) der zu ändernde Bereich definiert und neu trianguliert, um eine ausreichende Auflösung zu erhalten.
 c) Danach erfolgt die Anpassung der z-Werte der Punkte.

10. Herstellung der Formgedächtnisstrukturen

Die Strukturen sollen in verschiedenen additiven Fertigungsverfahren hergestellt werden können, um sie möglichst vielen Anwendern zur Verfügung zu stellen. Damit ein Anwender aus der Industrie die Formgedächtnisstrukturen in einer teuren Lasersinteranlage fertigen kann, ebenso wie ein Anwender im Heimbereich mit einem günstigen Desktop-Drucker, soll die Herstellung der Strukturen in dem SLS-Verfahren mit PA ebenso wie in dem FDM-Verfahren mit PLA möglich sein. Dazu muss der Entwurf der Strukturen an das gewählte Druckverfahren angepasst werden: Je nach 3D-Druckverfahren sind unterschiedliche Konstruktionsparameter nötig, welche z.B. die minimalen Spaltmaße, die minimalen Wandstärken, Support-Strukturen oder die Auslegung der Festkörpergelenke betreffen. Die wichtigsten Anpassungen werden in diesem Kapitel zusammengefasst und anschließend die eingesetzten Drucker beschrieben. Neben den additiven Fertigungsverfahren wird in diesem Kapitel auf weitere herstellungsspezifische Details eingegangen: Es wird ein Vorgehen zur segmentweisen Herstellung der Strukturen beschrieben und es werden Details zu den verwendeten Seilzügen aufgeführt.

10.1 SLS-Verfahren

Wie bereits im Stand der Technik (s. Kapitel 2.3) beschrieben, hat das SLS-Verfahren im Gegensatz zu kostengünstigeren Druckverfahren, wie z.B. dem FDM-Verfahren, eine Reihe an Vorteilen bezüglich der Auslegung der Teile, der mechanischen Eigenschaften und der geometrischen Auflösung. Besonders hinsichtlich der Herstellbarkeit von Festkörpergelenken ist das SLS-Verfahren von großem Vorteil. Daher wurde der Großteil, der in dieser Arbeit beschriebenen Strukturen, in diesem Druckverfahren hergestellt und der erstellte Code zur automatisierten Konstruktion zunächst für die Produktion der Strukturen im SLS-Verfahren entwickelt.

Die verwendete SLS Anlage EOS Formiga P100 hat eine Auflösung von 0,05 mm in der xy-Ebene und einen Laserdurchmesser von 0,45 mm, welcher die minimale Wandstärke in dieser Ebene begrenzt. Die tatsächliche Maßhaltigkeit des Drucks kann jedoch je nach Ort des Bauteils im Bauraum variieren (Wegner & Witt 2013). Die Schichthöhe bestimmt die Auflösung in z-Richtung und beträgt bei dieser Anlage minimal 0,06 mm. Um die Druckgeschwindigkeit zu erhöhen, wird hier aber mit einer Schichthöhe von 0,1 mm gedruckt. Die Druckgeschwindigkeit beträgt damit etwa eine Stunde pro Zentimeter Druckhöhe. Das verwendete Polymer ist PA2200 auf PA12 Basis mit einer mittleren Korngröße von 58 µm.

Dabei wird neues Pulver mit aus den vorherigen Druckjobs recyceltem Pulver vermischt und in einem Mischverhältnis von 1:1 eingesetzt. Die Kosten für ein Kilogramm Neupulver betragen ca. 62 € (ohne MwSt., Stand Dezember 2022). Der Bauraum der verwendeten SLS-Anlage beträgt laut Datenblatt 200 mm x 250 mm x 330 mm, allerdings beträgt der tatsächlich nutzbare Bauraum, abzüglich der nicht belegbaren Randbereiche, 193 mm x 242 mm x 322 mm.

10.1.1 Auslegung der Strukturen

Da im SLS-Verfahren die Druckhöhe die Kosten des Prozesses bestimmt, werden die Strukturen liegend im Bauraum platziert. Die Länge der Strukturen ist damit auf 242 mm begrenzt. Längere Formgedächtnisstrukturen werden in mehreren Teilen gedruckt und nachträglich zusammengesetzt und verklebt.

Ein Problem des SLS-Verfahrens ist die Entfernung des Restpulvers nach dem Druck der Teile. Dies ist besonders in schwer erreichbaren Hohlräumen, schmalen Spalten und kleinen Löchern problematisch. Die Seilzugführungen in den Formgedächtnisstrukturen haben sich als kritische Geometrien erwiesen. Die oft nicht geradlinig durch die Struktur laufenden langen dünnen Löcher sind schwierig zu säubern und es kann vorkommen, dass die Führungen durch das Pulver so verstopft werden, dass das Entfernen des Pulvers nicht mehr möglich ist. Besonders bei hohen Zwischenelementen mit großen Verdrehungen in den Seilzugführungen (großes h_c , φ_c und r_w) tritt dieses Problem schnell auf. In Kapitel 5.3.4 ist das Vorgehen zur Auslegung der Seilzugführungen beschrieben. Mit Formel (5.7) wird dabei die minimale Steigung der Seilzugführung innerhalb eines Elements bestimmt. Für im SLS-Verfahren hergestellte Strukturen konnte in einem Vorversuch die minimale Steigung von $s_{min,SLS} = 2,2$ bestimmt werden. Verstopfte Seilzugführungen treten jedoch auch bei langen Elementen unabhängig von dem Verdrehwinkel auf. Um dem entgegenzuwirken, wurden bei langen Elementen in einem ersten Schritt in regelmäßigen Abständen radiale Öffnungen zur Entfernung des Restpulvers integriert. Diese werden im Konstruktionsprozess ab einer bestimmten Elementhöhe automatisch integriert. Das Einfädeln der Seilzüge wird jedoch durch diese Löcher eher erschwert, da während des Prozesses des Seileinfädelns, bei jedem Ein- und Austreten des Seilzugs aus der Struktur, das Seil hängen bleiben kann. In einem zweiten Schritt wurde daher bei allen Elementen mit einem Verdrehwinkel $\varphi_c > 0$ die Seilzugführung radial nach außen hin geöffnet. Damit ist zum einen ein besseres Entfernen des Restpulvers möglich und zum anderen wird das Einfädeln des Seilzugs vereinfacht. Bei einer nicht aktuierten Struktur besteht hier die Gefahr, dass die Seilzüge aus der Struktur herausragen und sich in der Peripherie oder in sich selbst verfangen können, allerdings ist die benötigte Seilstrecke zur Auslenkung der Struktur im Normalfall sehr klein und damit auch diese Gefahr gering.

10.1.2 Herstellungsprozess und Nachbearbeitung

Die STL-Dateien der Strukturen müssen zunächst im Bauraum der SLS-Anlage angeordnet werden. Dazu wird das Programm Magics (Version 16.0, Materialise NV, Löwen, Belgien) verwendet. Die neu angeordneten STL-Dateien werden gespeichert und im nächsten Schritt für den Druck in Scheiben geschnitten (dieser Prozess wird auch *slicen* genannt). Dies erfolgt mit dem EOS eigenen Programmen RP-Tools und PSW (EOS, Krailing, Deutschland). Hier wird festgelegt, wie der Laser eine Bauraumschicht verfestigt, um optimale Druckergebnisse zu erhalten. Aus den geslicten Teilen wird ein Druckjob (.job Datei) erstellt und in die Maschine geladen. Nachdem die Maschine vorbereitet und auf 172°C vorgeheizt wurde, kann der Druckjob gestartet werden. Nach dem Druck muss der entstandene Pulverblock zunächst abkühlen, bis eine Kerntemperatur von 60°C unterschritten wurde. Ein früheres Auspacken der Teile sorgt für ein zu schnelles Abkühlen und zu einem starken Verzug und damit starken Abweichungen der Maßhaltigkeit der Teile. Die Teile werden dann in einer Auspackstation aus dem Pulverblock entnommen und das Restpulver händisch entfernt. Mit Hilfe eines Drahts wird das Restpulver in den Löchern der Seilzugführungen entfernt, damit später die weniger steifen Seilzüge eingefädelt werden können. Nach dieser groben Reinigung werden die Teile in einer Abstrahlanlage mit Glaskugeln bestrahlt, um das verbliebene Pulver zu entfernen. Nun können die Seilzüge eingefädelt und am Ende der Struktur verknotet oder mit einer Crimphülse befestigt werden.

10.2 Desktop-Drucker im Niedrigpreissegment

Das Konzept, der in dieser Arbeit beschriebenen Formgedächtnisstrukturen, lebt von der Idee, die Strukturen schnell und günstig für bestimmte Anwendungen erstellen zu können. Der Code zur automatisierten Konstruktion kann einfach zur Verfügung gestellt werden, allerdings ist die Herstellung der Strukturen in einer SLS-Anlage nicht für jedermann verfügbar. Um die Strukturen auch mittels günstigeren und weiter verbreiteten Druckverfahren wie dem FDM-Verfahren herzustellen, sind verschiedene Anpassung der Strukturen an dieses nicht-pulverbasierte Verfahren nötig. Für die Erstellung der Funktionsmuster, welche in diesem Kapitel beschrieben werden, wurde zunächst auf ein CAD-Programm (Fusion 360, Autodesk, San Francisco, USA) zurückgegriffen.

10.2.1 Auslegung der Strukturen

Die Strukturen sollen auch hier aus einem Material hergestellt werden, das heißt die Herstellung soll in einem Standard FDM Desktop-Drucker mit nur einer Düse funktionieren. Im FDM-

Prozess ist die Konstruktionsfreiheit im Vergleich zum SLS-Prozess stärker eingeschränkt, da Überhänge gegebenenfalls mit Stützstrukturen umgesetzt werden müssen. Des Weiteren liefern FDM Desktop-Drucker eine geringere Druckauflösung als eine SLS-Anlage. Auch die mechanischen Eigenschaften der hergestellten Teile sind im Allgemeinen schlechter als bei der Herstellung im SLS-Prozess, vor allem geschuldet durch den Einsatz von Standardthermoplasten wie ABS oder PLA statt technischen Thermoplasten wie PA12.

Das Hauptproblem bei der Erstellung der Formgedächtnisstrukturen sind dabei die Festkörpergelenke. Mit PLA und einem FDM-Drucker sind die bisher verwendeten Kerbgelenke nur schlecht oder gar nicht umsetzbar. Um geeignete Gelenktypen für die Herstellung im FDM-Prozess zu finden, wurden verschiedenen Konzepte für Gelenkstrukturen entworfen und getestet. Die Herstellung von monolithischen Strukturen mit Festkörpergelenken ist dabei das primäre Ziel, es wurden jedoch auch Konzepte mit „normalen“ Gelenken entworfen und untersucht. Eine Auswahl der Konzepte für FDM druckbare Drehgelenke ist in Abb. 43 dargestellt. Es wurden zunächst Gelenkketten ohne Festkörpergelenke entworfen: In Abb. 43.a werden die Elemente einzeln gedruckt und mit eingesetzten Metallstiften als Gelenke realisiert und Abb. 43.b werden die Gelenkstrukturen als Halbkugeln mit entsprechenden halbkugelförmigen Löchern an der Elementunterseite mitgedruckt. Zudem wurden verschiedene nachgiebige Gelenkstrukturen entworfen, bestehend aus Biegebalken (Abb. 43.c) oder gebogenen Blattfedern (Abb. 43.d).

Letztendlich wurde eine Festkörpergelenkstruktur aus gegenläufig abrollenden Bändern (*Rolling Contact Flexure Joints*) für den Einsatz in den Formgedächtnisstrukturen entworfen, angelehnt an Jeanneau *et al.* (2004). Die nachgiebigen Bänder rollen auf den angrenzenden Elementen ab und werden maximal mit der durch die Abrollfläche vorgegebenen Krümmung

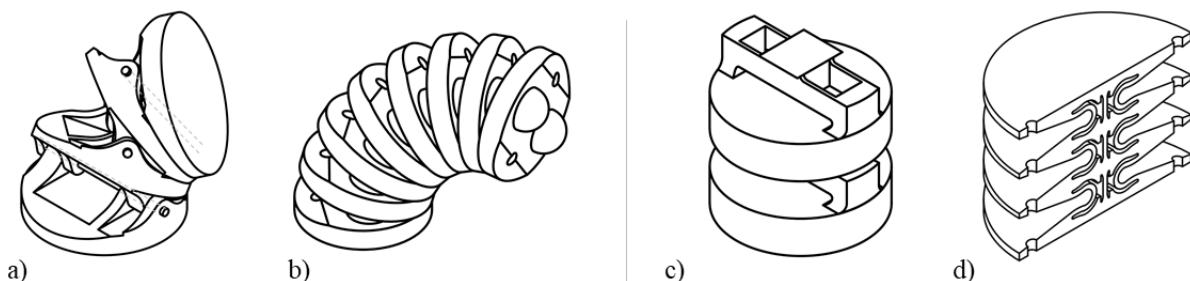


Abb. 43: Erste Konzepte für Gelenkstrukturen der Formgedächtnisstrukturen für den FDM-Druck:
 a) bzw. b) Nicht monolithische zusammensetzbare Gelenkketten mit Drehgelenken.
 c) bzw. d) Monolithische Gelenkketten mit drehgelenkartigen Festkörpergelenken.

verformt. Sie sind so vor Überlastung geschützt und können trotzdem in einem großen Winkelbereich bewegt werden. Die Herstellung dieser Gelenke ist in verschiedenen 3D-Druckverfahren ohne den Einsatz von Stützstrukturen möglich. Mit drei in der Drehachse versetzten Bändern, wobei das mittlere Band gegenläufig zu den äußeren Bändern abrollt, werden alle translatorischen und rotatorischen Bewegungsfreiheitsgrade mit Ausnahme der Abrollbewegung eingeschränkt. Die Form des Gelenks sorgt allerdings, verglichen mit den bisher eingesetzten Kerbgelenken, für ein anderes Bewegungs- und Rückstellverhalten. Die relative Bewegung eines Elements zu seinem Nachbarelement entspricht nicht mehr einer reinen Drehbewegung, sondern einer Abrollbewegung. Dementsprechend müssen die zuvor beschriebenen Modellierungsansätze angepasst werden. In Abb. 44 ist der Aufbau dieses Gelenktyps im Detail aufgezeigt.

Die Gelenke werden bei der additiven Fertigung im Optimalfall so orientiert, dass die Drehachse senkrecht auf den Druckschichten steht. Diese Orientierung sollte so gewählt werden, da die Verbindung zwischen den Druckschichten die schwächste Stelle darstellt. Wenn die Biegung der flexiblen Elemente in der Ebene der Druckschichten geschieht, wird die Verbindung zwischen den Schichten am wenigsten belastet. Da diese Festkörpergelenke nur eine Bewegung in einer Ebene erlauben, können sie nur für Typ 2 und Typ 3 Strukturen eingesetzt werden. Es wurden im Zuge dieser Arbeit nur Typ 2 Strukturen für den FDM-Druck umgesetzt. Eine wichtige Eigenschaft von Typ 2 Strukturen ist, dass die Drehachsen der Gelenke innerhalb eines Kreissegments einer Struktur alle parallel sind. Wird die Struktur in seine Segmente unterteilt und diese einzeln gedruckt und nachträglich zusammengesetzt,

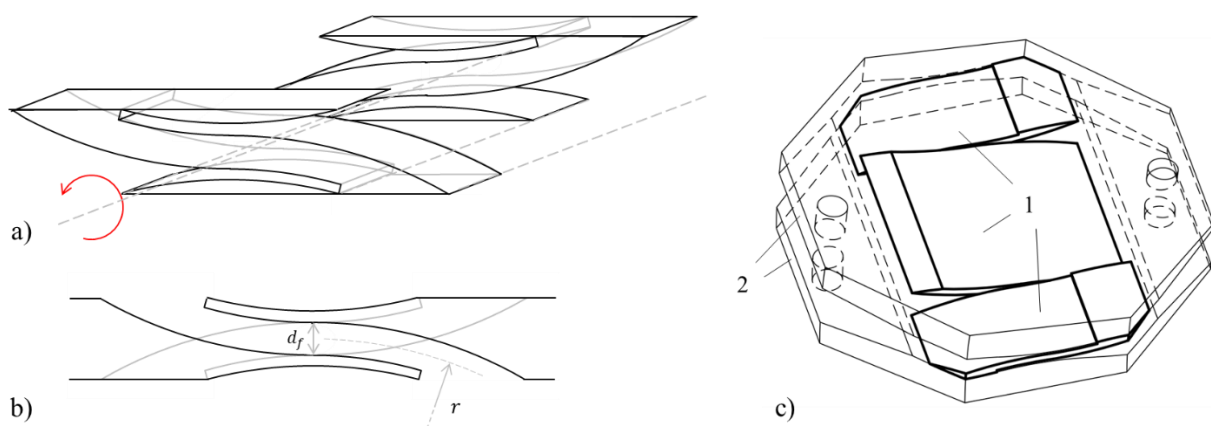


Abb. 44: Herstellung der Formgedächtnisstrukturen im FDM-Verfahren: a) Funktionsprinzip der Festkörpergelenkstruktur mit gegenläufig abrollenden Bändern. b) Seitenansicht mit Parametern, c) Umsetzung mit drei Bändern (1) zwischen zwei Elementen (2) für die Formgedächtnisstrukturen

können die Festkörpergelenke alle in der optimalen Orientierung gedruckt werden. Das bedeutet aber auch, dass gewisse Einschränkungen der Formfreiheit des Querschnitts der Strukturen gegeben sind: Damit Stützstrukturen vermieden werden, sollte die dem Druckbett zugewandte Seite der Segmente eine ebene Fläche aufweisen. Dementsprechend sollte der Querschnitt P_c angepasst werden.

10.2.2 Herstellungsprozess und Nachbearbeitung

Wie im SLS-Verfahren werden die Strukturen als STL an eine Slicer-Software übergeben. Für die Herstellung der Funktionsmuster in dieser Arbeit wurde die Open Source Software Ultimaker Cura (Ultimaker B.V., Utrecht, Niederlande) verwendet. Die Slicer Software erstellt dabei die Druckbefehle in Form von G-Code für den verwendeten 3D-Drucker. Für den Druck der Funktionsmuster wurden die Drucker Neptune 2 (Elegoo Inc., Shenzhen, China), Anycubic Predator (Anycubic Co. Ltd., Shenzhen, China) und Creality Ender 5 (Creality 3D Technology Co. Ltd., Shenzhen, China) eingesetzt. Es wurde mit einem Düsendurchmesser von 0,4 mm, ohne Stützstrukturen, mit einer Druckbetttemperatur von 60°C und einer Düsentemperatur von 200°C-240°C gedruckt. Der Bauraum ist abhängig von den jeweiligen Druckern und begrenzt hier nur die Länge der einzelnen Segmente. In Abb. 45 ist ein Segment in der Slicer-Software und während des Drucks dargestellt.

Die Segmente der Struktur werden einzeln gedruckt, anschließend der Seilzug eingefädelt und im nächsten Schritt zusammengesetzt und verschraubt. Dieser Montageschritt wird in Kauf genommen, um in allen Segmenten die optimale Druckrichtung für die Festkörpergelenke zu erhalten und damit funktionierende Festkörpergelenke im FDM-Druck herstellen zu können. Ein Funktionsmuster für eine montierte Struktur ist in Abb. 46 gezeigt. Die abgebildete Typ 2 Struktur besteht aus drei verschraubten Segmenten. Hier wurde eine Referenzstange installiert,

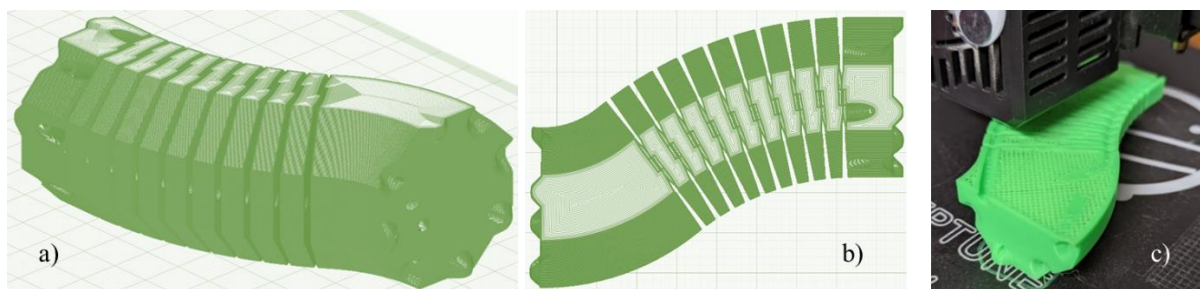


Abb. 45: Additive Fertigung der Formgedächtnisstrukturen im FDM-Verfahren: a) Segment einer Struktur im Slicer in der isometrischen Ansicht und b) mit senkrechtem Blick auf die Druckebene. c) Fertigung des Segments mit einem Neptune 2 Drucker.

welche die vorgegebene Endeffektorendposen zeigt, und welche den Fehler der Endeffektorendposen der Struktur zu den vorgegebenen Zielposen visualisieren soll. Hier ist eine Abweichung des Strukturendeffektors zu den vorgegebenen Posen mit bloßem Auge erkennbar. Die Abweichungen im Druckprozess der günstigen Desktop-Drucker wirken sich hier auf die Anschlagsstellungen der Struktur aus.

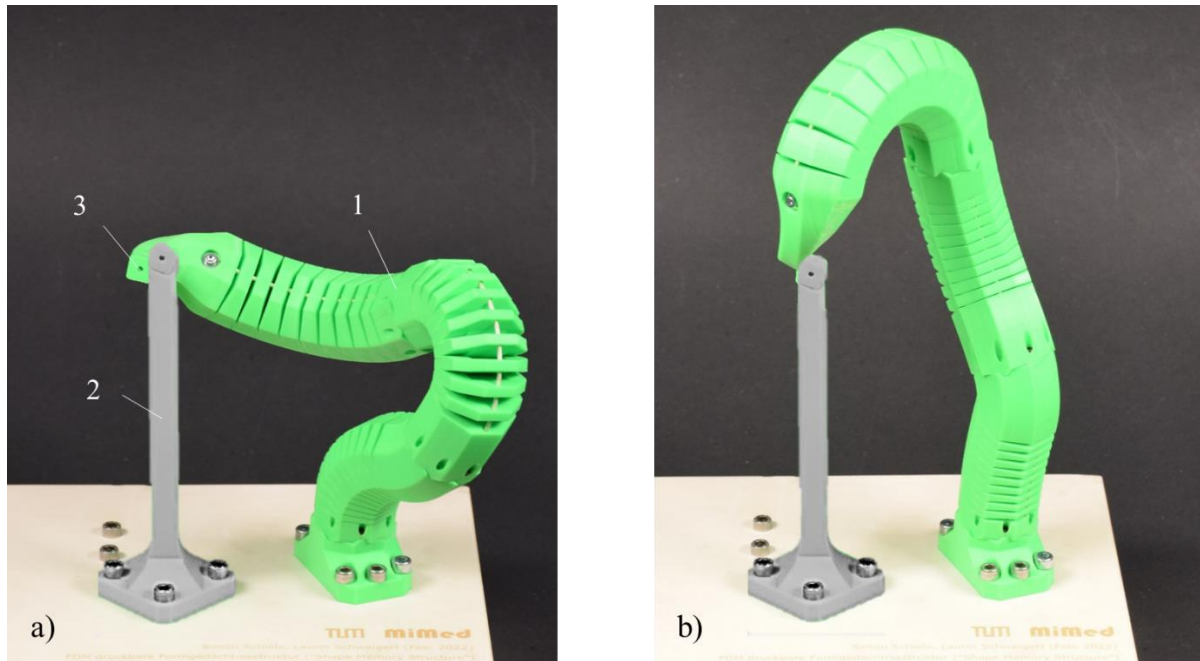


Abb. 46: Im FDM-Verfahren gedruckte Struktur (1) mit drei Segmenten in den beiden ausgelegten Konfigurationen a) bzw. b). Eine Referenzstange (2) (im Bild grau eingefärbt) zeigt die vorgegebenen Endeffektorposen, welche der Endeffektor (3) mit einem sichtbaren Fehler erreicht (angelehnt an Schiele *et al.* 2022).

10.3 Verbindungselemente

Es ist nicht immer möglich, die entworfenen Strukturen in einem Stück zu drucken. Zum einen gibt es Beschränkungen bei der Länge der Strukturen, abhängig vom Bauraum des eingesetzten 3D-Druckers. Zum anderen hängen die mechanischen Eigenschaften der Festkörpergelenke von der Orientierung im Druckerbaureaum ab. Um trotzdem entsprechend lange Strukturen drucken zu können, kann die Struktur in mehrere, auf den Bauraum angepasste Teile unterteilt und nach dem Druck zusammengesetzt werden.

Soweit möglich, sollten SLS gedruckte Strukturen liegend im Bauraum gedruckt werden, sodass die Festkörpergelenke mit ihrer Drehachse senkrecht zur Druckebene liegen (s. Kapitel 5.3.2). Das heißt die größte Bauraumdimension in z-Richtung kann nicht voll ausgenutzt

werden. Bei bestimmten additiven Fertigungsverfahren (z.B. im FDM-Druck) können funktionierende Festkörpergelenke sogar nur in einer bestimmten Orientierung gedruckt werden. Das Problem wird gelöst, indem die Formgedächtnisstrukturen stückweise gedruckt und anschließend zusammengesetzt werden. Um nach dem Druck die Teile wieder zu einer Gesamtstruktur zusammenzufügen, werden Verbindungselemente an die Enden der einzelnen Teile angebracht. Die Verbindungselemente können einfache formschlüssige Steckverbinder sein, die nach dem zusammensetzen verklebt werden. Durch die rauen Oberflächen und hohe Genauigkeiten der Teile ist das im SLS-Verfahren eine geeignete Vorgehensweise. Die FDM gedruckten Segmente wurden, wie in Abb. 47 gezeigt, verschraubt. Dabei werden an den Enden der Segmente Verbindungselemente angebracht, mit denen sich die Segmente nur in der richtigen Reihenfolge und Orientierung zusammensetzen lassen.

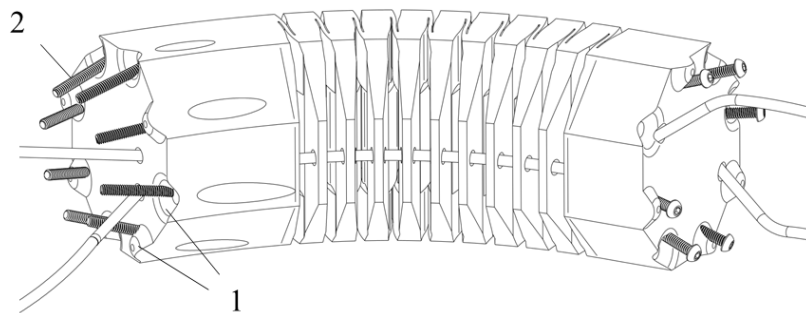


Abb. 47: Segment einer für das FDM-Verfahren entworfenen Formgedächtnisstruktur vom Typ 2. Eine formschlüssige Kontaktgeometrie aus Noppen und Löchern (1) sorgt für eine eindeutige Zusammensetzung und Verschraubung (2) mit den (hier nicht abgebildeten) Nachbarsegmenten.

10.4 Verwendete Seilzüge

Für die Strukturen werden je nach Größe, Druckverfahren und Material unterschiedliche Seilzüge herangezogen. Für im SLS-Verfahren gedruckte Strukturen mit Elementradien r_c von 2 mm bis 10 mm bieten sich mit Kunststoff beschichtete Stahlseile mit geringen Durchmessern an. So können hohe Zugkräfte aufgebracht werden und gleichzeitig ein geringer Platzbedarf der Seilzugführungen in der Struktur sichergestellt werden. Die Ummantelung der Seile sorgt für eine glatte Oberfläche und verbessert hier die Reibungseigenschaften. Im Zuge dieser Arbeit wurden mit Polyamid ummantelte Edelstahlseile der Firma Carl Stahl Technocables GmbH (Süßen, Deutschland) verwendet, je nach benötigter Seilkraft mit einem Außendurchmesser von 0,36 mm oder 0,61 mm (Werkstoff 1.4401, 6 x 7 – WSC, PA 12 ummantelt). Die

Mindestbruchkraft liegt hier bei 54 N (für die Seile mit einem Außendurchmesser von 0,36 mm) bzw. bei 151 N (für die Seile mit einem Außendurchmesser von 0,61 mm). Ein Vorteil dieser Seile ist die Verfügbarkeit in Medizinproduktqualität, für mögliche Anwendungen der Strukturen im Bereich der Medizintechnik.

Damit die Idee der Formgedächtnisstrukturen als wirtschaftlich günstiger Roboterersatz erhalten bleibt, wurden auch preislich günstigere Seile getestet. Günstige Schmuckseile mit 0,35 mm Außendurchmesser und PA6 Ummantelung eignen sich für Strukturen bei denen geringere Seilkräfte ausreichen. Für die größeren FDM gedruckten Strukturen ($r_c > 10$ mm) wurden Nylonseile mit einem Durchmesser von 2,4 mm eingesetzt.

Bei dem Einsatz der Seilzüge in den Strukturen muss die Knotenfestigkeit beachtet werden. Während die Herstellerangaben die Reißfestigkeit der Seile angeben, ist die Reißfestigkeit an einem geknoteten Seil um bis zu 50% reduziert. Dies wurde auch bei den erstellten Funktionsmustern und bei den Versuchen zur Evaluierung der Steifigkeiten von SLS-gefertigten Festkörpergelenken beobachtet (s. Kapitel 12.3), bei denen die Seilzüge am Ende der Struktur mit einem Knoten befestigt wurden. Obwohl die zuvor genannten Edelstahlseile eine maximale Zugkraft von 54 N aushalten sollten, sind sie bereits bei viel kleineren Zugkräften von >30 N gerissen.

11. Anwendungsbeispiele

Einige konzeptionelle Anwendungsszenarien für die Formgedächtnisstrukturen wurden bereits in Form von verschiedenen Greifsystemen (Krieger, Schiele *et al.* 2019), einem ersten *Pick-and-Place* Ansatz (Krieger, Schiele *et al.* 2019) und Führungselementen für die minimalinvasive Chirurgie (Krieger 2021) gezeigt. Im Folgenden zum einen ein weiteres Anwendungsszenario in Form von Kriechrobotern aufgezeigt und zum anderen das Prinzip des *Pick-and-Place*-Systems auf Basis der Mehrposen-Formgedächtnisstrukturen weiterentwickelt.

11.1 Kriechroboter

Eine Inspiration für den Entwurf von Kontinuumsrobotern rührt von Kriechtieren wie Schlangen und Würmern, daher liegt es nahe mit den hier vorgestellten Strukturen Kriechroboter zu entwerfen. In schwer zugänglichen und unbekanntem Umgebungen, wie sie oftmals in Katastrophengebieten vorliegen, können schlangenähnliche kleine flexible Systeme ihre Vorteile entfalten. Ihre Form und Art der Bewegung erlaubt ihnen, sich durch schmale Öffnungen und auf unebenen Oberflächen fortzubewegen. Durch die schnelle Konstruktion, die schnelle Herstellung und den niedrigen Preis der Systeme kann der Verlust des Roboters in diesen gefährlichen Umgebungen verschmerzt werden. Die einzelnen Konfigurationen, die in diesem Kapitel erstellten Strukturen, wurden nicht mit den automatisierten Methoden in Kapitel 6.2 entworfen, da hier die Bewegung des gesamten Systems und nicht nur die Posen des Endeffektors bestimmt werden müssen. Jedoch soll mit diesem Anwendungskonzept die Möglichkeiten der Strukturen veranschaulicht werden. Die Bewegungsabläufe der Kriechsysteme wurden mit dem quasistatischen Modell in Kapitel 8.1 evaluiert.

Die entwickelten mobilen Systeme bestehen aus einem flexiblen Bewegungsapparat (der Formgedächtnisstruktur) an dessen Ende ein steifer Körper mit der integrierten Aktorik und Elektronik sitzt. Um die Reibung an bestimmten Stellen der Struktur zu erhöhen, kann die Struktur mit Silikon beschichtet werden. In Abb. 45 ist das Konzept schematisch dargestellt. Die hier gezeigten Systeme beschränken sich auf die Auslenkung in der Ebene, das heißt sie berücksichtigen nur die Vortriebsbewegung und haben noch keine Lenkung.

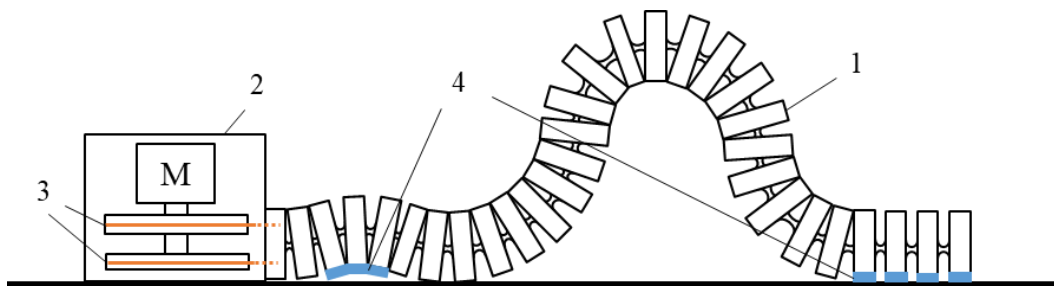


Abb. 48: Konzept des Kriechroboters mit einem flexiblen Körper aus einer Formgedächtnisstruktur (1), einer Motoreinheit (2) mit Motor und zwei über ein Getriebe befestigten Seilzugrollen (3). Bestimmte Bereiche der Struktur sind zur Erhöhung der Reibung mit Silikon beschichtet (4).

Der Aufbau und der Bewegungsablauf zweier solcher mobilen Systeme ist in den folgenden Abbildungen (Abb. 50 bis Abb. 51) dargestellt. In den drei Abbildungen werden die Modelle und die realen Umsetzungen zweier Kriechsysteme (a und b) dargestellt. Diese beiden Systeme basieren auf den Typ 2 Formgedächtnisstrukturen, haben also drehgelenkartige Festkörpergelenke. Es wurden im Zuge dieser Arbeit noch weitere Konzepte getestet und entsprechende Strukturen erstellt, diese sind im Folgenden jedoch nicht im Detail aufgeführt.

Der Körper von Struktur Abb. 50.a wird durch zwei Seilzüge aktuiert. Die Seilzüge schneiden an bestimmten Stellen die Drehachsen der Gelenke und aktuiert damit bei einer aufgebrachten Seilkraft nur Teile der Struktur. Die Struktur in Abb. 50.b besteht nur aus einem Seilzug und verwendet die Rückstellkräfte der Festkörpergelenke für Teile der Bewegung. In Abb. 50 ist der Aufbau dieser beiden Strukturen vergrößert dargestellt und die Seilzüge und die Positionen der Festkörpergelenke abgebildet. Neben der Lage der Seilzugführung wurden auch hier die Steifigkeiten der Festkörpergelenke über die Dicke der Gelenke angepasst, um den Ablauf der Bewegung zu beeinflussen. In Abb. 50 sind die Gelenkdicken der jeweiligen Gelenknummer abgebildet.

In Abb. 49.a.I ist die Struktur in ihrer unausgelenkten Ruhelage abgebildet. Der erste Seilzug ist für die Kontraktion der Struktur verantwortlich (Abb. 49.a.II-III), wobei die Silikonbeschichtung (SF00 2k-Silikon, 0 ShA) an der Spitze der Struktur dazu führt, dass der hintere Teil der Struktur in Bewegungsrichtung gezogen wird und nicht nach hinten rutscht. Danach hebt der zweite Seilzug das Ende der Struktur an (Abb. 49.a.IV), anschließend wird der erste Seilzug wieder freigegeben und die Rückstellkräfte in den Festkörpergelenken führen zu einem Ausstrecken der Struktur und damit zu einer translatorischen Bewegung des Systems (Abb. 49.a.V). Dieses System zieht die Motoreinheit hinter sich her.

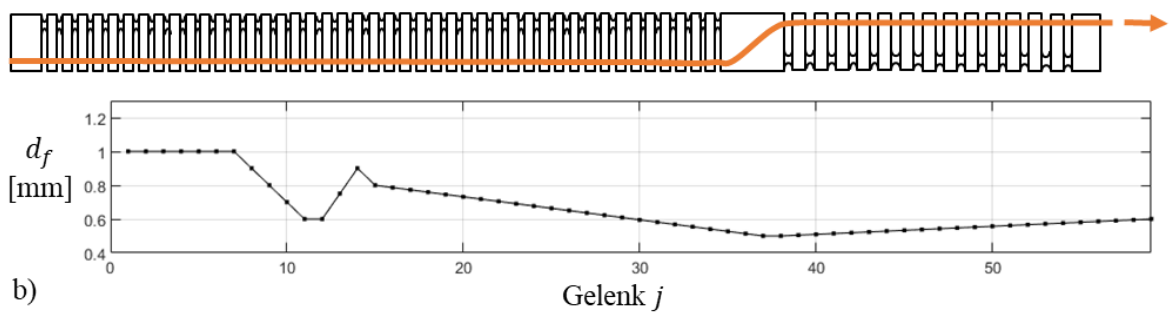
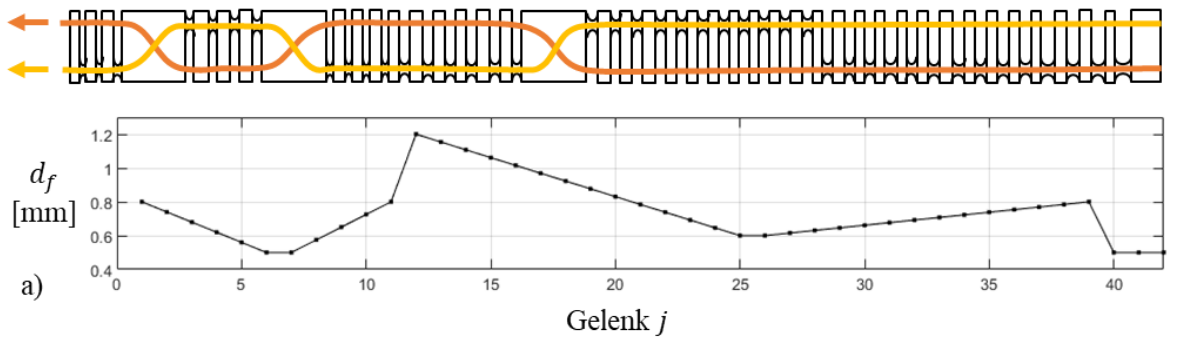


Abb. 50: Seitenansicht der Strukturen der beiden Kriechroboter a) und b) und jeweils die Gelenkdicken aufgetragen über die Gelenknummer.

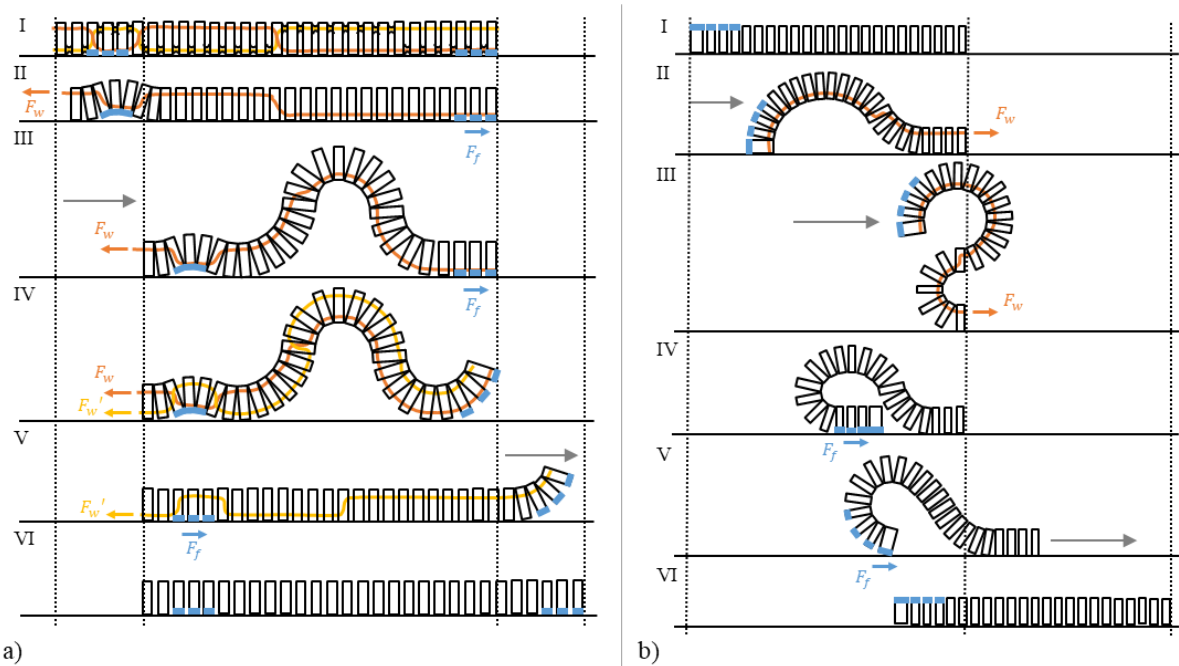


Abb. 49: Bewegungsablauf zweier Kriechroboter: a) Struktur mit zwei Seilzügen, b) Struktur mit einem Seilzug.

In Abb. 49.b wird die Struktur nur durch einen Seilzug angesteuert, der hier auch zu einer Kontraktion führt. Wird der Seilzug verkürzt, richtet sich die Struktur auf und rollt sich ein (Abb. 49.b.II-III). Nach Freigeben des Seilzugs fällt die Struktur zunächst wieder nach unten und das silikonbeschichtete Ende bekommt Kontakt mit dem Untergrund. Die Rückstellkräfte in den Festkörpergelenken sorgen dafür, dass sich die Struktur im nachfolgenden Schritt ausstreckt und durch die erhöhte Reibung an der Spitze der Struktur in Bewegungsrichtung geschoben wird.

Die hier gezeigten Kriechroboter wurden im SLS-Verfahren gedruckt. Die Ansteuerung der Seilzüge erfolgt bei beiden Strukturen über einen einzelnen Modellbau Servomotor. Für Struktur A wird dafür ein einstufiges Stirnradgetriebe verwendet, das aus zwei in der Drehachse versetzten Zahnradpaarungen besteht. Bei diesen Zahnradpaarungen werden an bestimmten Stellen die Zähne der Zahnräder weggelassen und erlauben so ein Durchrutschen der Räder an diesen Stellen. Mit diesem Getriebe werden die Seilzüge in einer festgelegten Abfolge angezogen und freigegeben und es entsteht das Bewegungsmuster aus Abb. 49.a. Für die zweite Struktur aus Abb. 49.b ist die Aktuierung einfacher, da nur ein einzelner Seilzug abwechselnd auf- und abgerollt werden muss.

Die realen Bewegungen der Strukturen werden in Abb. 51 gezeigt. Um die Funktion der Roboter zu überprüfen, wurde ein Experiment zum Vergleich der theoretischen und der tatsächlich erreichten Vorwärtsbewegung durchgeführt. Für die Struktur A ergibt sich bei einer Beinlänge von 190 mm aus dem Modell eine theoretische Vorwärtsbewegung von 73 mm pro Zyklus. Die tatsächlich erreichte Distanz pro Zyklus beträgt 23 mm. Für Struktur B ergibt sich bei einer Beinlänge von 210 mm eine theoretische zurückgelegte Distanz pro Zyklus von 158 mm und eine tatsächlich erreichte Distanz pro Zyklus von 153 mm. Bei der Berechnung der theoretischen Distanz pro Zyklus wird davon ausgegangen, dass es kein Rutschen zwischen Silikonfuß und Untergrund gibt, während das in der Realität auftreten kann. Die Reibungseffekte zwischen der restlichen Struktur und dem Boden werden ebenso vernachlässigt. Des Weiteren werden im Modell die Effekte der plastischen Verformung der Festkörpergelenke nicht miteinbezogen, welche bei den realen Systemen einen erheblichen Einfluss auf das Bewegungsverhalten haben. Die plastische Verformung bei der Auslenkung der Systeme führt dazu, dass sich das System nicht mehr vollständig in seine Ausgangsposition zurückbewegt und damit nicht seine volle Bewegungsreichweite ausschöpfen kann.

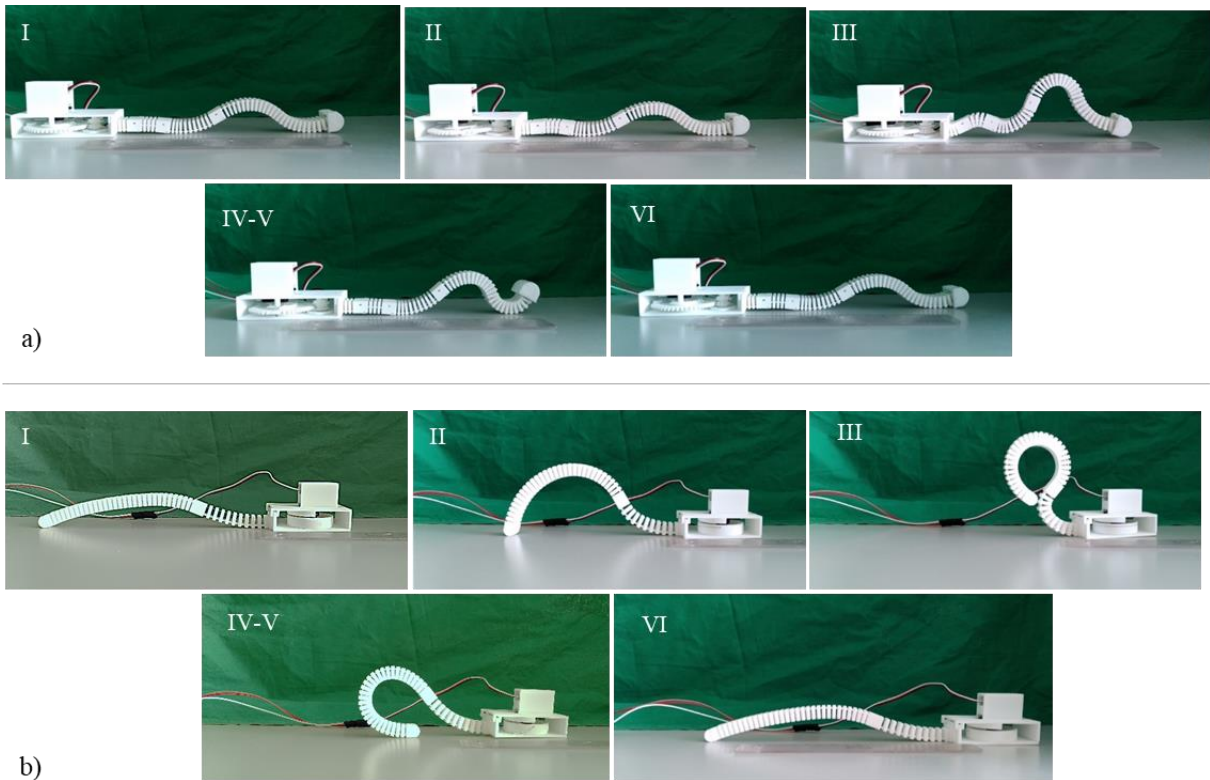


Abb. 51: Reale Bewegungsabläufe der zwei Kriechroboter a) und b) aus Abb. 50 und Abb. 49.

11.2 Pick-and-Place-System

Eine der am häufigsten eingesetzten robotischen Systeme sind *Pick-and-Place*-Systeme, welche in der Industrie zur Handhabung von Objekten z.B. in der Montage, zur Verpackung oder zur Qualitätskontrolle eingesetzt werden. Bei *Pick-and-Place* Aufgaben fährt das System wenige definierte Endeffektorendposen immer wieder an, was prädestiniert ist für den Einsatz der Formgedächtnisstrukturen. Es wurde daher ein Funktionsmuster für ein solches System mit Ansteuerungseinheit und Endeffektor entwickelt.

Die Ansteuerungseinheit für die Aktuierung der Strukturen besteht aus den Motoren, der Steuerelektronik und Bedienelementen. Die Motoren rollen über Seilwinden die Seilzüge auf. Da die Ansteuerungseinheit, im Vergleich zu den Produktionskosten der Strukturen, große Kosten verursacht, wird hier ein Konzept vorgestellt, mit dem die Strukturen schnell mit der Ansteuerungseinheit verbunden und getrennt werden können. Damit soll ein einfaches Austauschen der Strukturen ermöglicht werden, um schnell und unkompliziert defekte Strukturen ersetzen oder Strukturen für andere Aufgaben einsetzen zu können. Die Ansteuerungseinheit wurde für Strukturen mit maximal zwei Seilzügen entworfen. Die Strukturen werden über ein Verbindungssystem in die Ansteuerungseinheit eingesetzt und befestigt. Dieses besteht aus einer abnehmbaren Verschlusskappe mit Schnapphaken, mit der

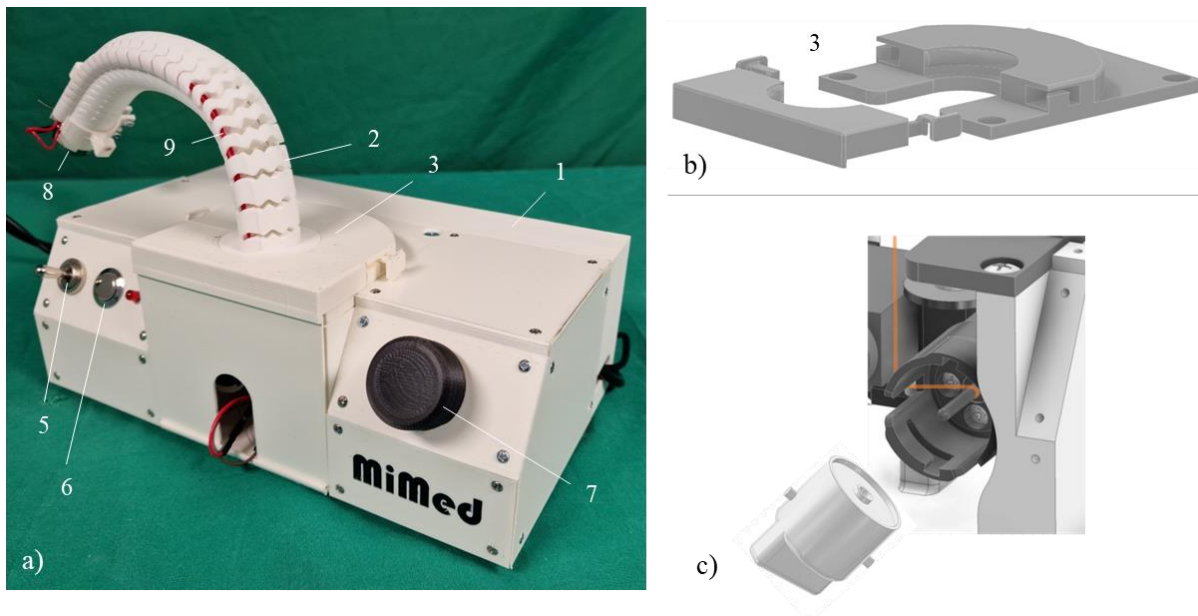


Abb. 52: a) Ansteuerungseinheit (1) mit eingesetzter Formgedächtnisstruktur (2). Die Struktur wird über ein Verbindungssystem (3) eingeklemmt. Bedienelemente dienen zur Ansteuerung der Struktur (5), (6), (7). Ein Elektromagnet (8) als Endeffektor, dessen Verkabelung (9) in die Struktur integriert wird. b) Verbindungssystem (3) mit Schnapphaken. c) Seilzugeinspannung

die Struktur in die Ansteuerungseinheit eingeklemmt wird (s. Abb. 52.b). Innerhalb der Ansteuerungseinheit sind zwei Smart Servos der Firma FeeTech (Shenzhen, China) befestigt. Neben der Vorgabe der Position kann bei diesen Servomotoren der Motorstrom, die Geschwindigkeit und die Position ausgelesen werden. Der Motorstrom kann dabei zur Bestimmung des Drehmoments verwendet werden. Die Seilzüge werden auf die jeweilige Motorwelle gewickelt und über eine Kappe mit Bajonettverschluss eingeklemmt (s. Abb. 52.c). Nachdem die Struktur eingesetzt wurde, müssen die Motoren auf die beiden Seilzuglängen eingestellt werden, da diese je nach Struktur und Führung innerhalb der Struktur unterschiedlich lang sein können. Das kann über per Knopfdruck automatisch geschehen, wobei die Servomotoren so lange drehen, bis die Seilkraft (bzw. der Motorstrom) einen gewissen Grenzwert überschritten hat. Falls die Endeffektorendposen noch nicht erreicht werden oder die Struktur noch nicht genug versteift ist, können die Seilzuglängen über einen Drehregler nachjustiert werden.

Als Werkzeug wird an die Spitze der Struktur ein Elektromagnet angebracht, der hier zu Anschauungszwecken Stahlkugeln aufnehmen und ablegen kann. Die Kabelführungen des Elektromagneten werden in die Struktur integriert. Ein dreistufiger Kippschalter startet die Bewegung: In der mittleren Schalterposition ist das System ausgeschaltet, in den beiden anderen Schalterpositionen bewegt sich die Struktur zwischen den beiden Endeffektorendposen. Dabei bestimmt die Schalterposition bei welcher Endeffektorendpose das Werkzeug „zugreift“ (also der Elektromagnet eingeschaltet wird) und bei welcher Endeffektorendpose das Werkzeug „loslässt“ (der Elektromagnet ausgeschaltet wird).

12. Experimente

Im Zuge dieser Arbeit wurden verschiedene Experimente durchgeführt, deren Aufbau, Durchführung und Ergebnisse im Folgenden zusammengefasst sind. Im ersten Versuch wird die Genauigkeit der Anschlagsstellung der ausgelenkten Formgedächtnisstrukturen untersucht. Das zweite Experiment dient als Validierung des quasistatischen Modells in Kapitel 8.1. Im dritten Experiment werden die Gelenksteifigkeiten der SLS-gefertigten Festkörpergelenke untersucht und mit den Formeln aus Kapitel 8.1 verglichen.

Der empirische Mittelwert \bar{x} der Messwerte x_k mit $k = 1, 2, \dots, n$ wird mit folgender Formel berechnet, wobei n hier für die Anzahl der Messungen steht:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \quad (12.1)$$

Die Standardabweichung der Stichprobe berechnet sich mit folgender Formel:

$$s_x = s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2} \quad (12.2)$$

12.1 Bestimmung der Genauigkeit der Endeffektorendposen

Es wurde ein Experiment durchgeführt, um die Genauigkeit der Endeffektorendposen der Strukturen und die Wirksamkeit des neuen Kontaktdesigns aus Kapitel 5.3.3 zu validieren. Der Versuch zur Ermittlung der Genauigkeit der Formgedächtnisstrukturen in ihren Anschlagsstellungen wurde von Krieger, Schiele *et. al* (2019) bereits mit Hilfe eines optischen Trackingsystems durchgeführt. Dabei wurden allerdings nur Einposen-Formgedächtnisstrukturen untersucht und die Messungen haben sich auf die Position des Endeffektors beschränkt. In diesem Versuch wird der Fehler der Pose (Position und Orientierung) des Endeffektors in beiden Anschlagsstellungen gemessen. Es soll eine Aussage über die Richtigkeit, die Wiederholgenauigkeit und den Einfluss der Kontaktstrukturen auf die Richtigkeit der Anschlagsstellung getroffen werden.

Material und Methoden:

Dazu wurde ein elektromagnetisches (EM) Messsystem verwendet, um die Endposen des Endeffektors mit der Simulation zu vergleichen. Das Experiment untersucht die Abweichung der gedruckten Strukturen zu den MATLAB-Modellen und vergleicht zusätzlich zwei verschiedene Kontaktstrukturen. Es werden eine Typ 1 Formgedächtnisstruktur mit

Punktkontakt (keine Kontaktstruktur) und eine Typ 1 Formgedächtnisstruktur mit Linienkontakt und sinusförmiger Verzahnungsstruktur aus Kapitel 5.3.3 verglichen. Bei diesen Testkörpern wurde aus einer bestehenden Struktur eine Anschlagstellung für die zweite Endeffektorendpose gefunden (s. Kapitel 6.2.2). Der Testkörper entspricht Struktur I aus Abb. 33. Es wurde ein EM-Messsystem (NDI Aurora) mit einem Feldgenerator, zwei 6-DOF-Sensoren und einem 6-DOF-Kalibrierungssensor verwendet. Ein Sensor wurde an der Spitze und ein Sensor auf halber Länge der Struktur angebracht, um nicht nur die Endeffektorpose, sondern auch Informationen über die gesamte Anschlagstellung zu erhalten. Die Betätigung der Strukturen erfolgte durch zwei HEBI X5-4-Robotermodule (HEBI Robotics, Pittsburgh, USA), um eine wiederholbare Seilkraft aufzubringen. Zur Auslenkung wurde ein Seil von Carl Stahl Technocables GmbH (Süßen, Deutschland) mit einem Außendurchmesser von 0,36 mm eingesetzt (Werkstoff 1.4401, 6 x 7 – WSC, PA 12 ummantelt).

Es wurden zwei Testkörper der gleichen Struktur im SLS-Verfahren aus PA2200 hergestellt und getestet: Testkörper 1 ist eine Typ 1 Struktur mit einer Länge von 114 mm, zwei Endeffektorendposen und ohne Kontaktstruktur. Testkörper 2 ist wie Testkörper 1 aufgebaut, mit dem Unterschied, dass bei dieser Struktur die bereits erwähnte sinusförmige Verzahnungsstruktur integriert wurde, die bei Auslenkung einen Linienkontakt zwischen den benachbarten Elementen erzeugt (s. Kapitel 5.3.3). Für die EM-Sensoren wurden an den Teststrukturen Halterungen mitgedruckt, in welche die Sensoren eingeklipst wurden. Um die genaue Position und Orientierung der Sensoren relativ zur Struktur zu bestimmen, wurde vor

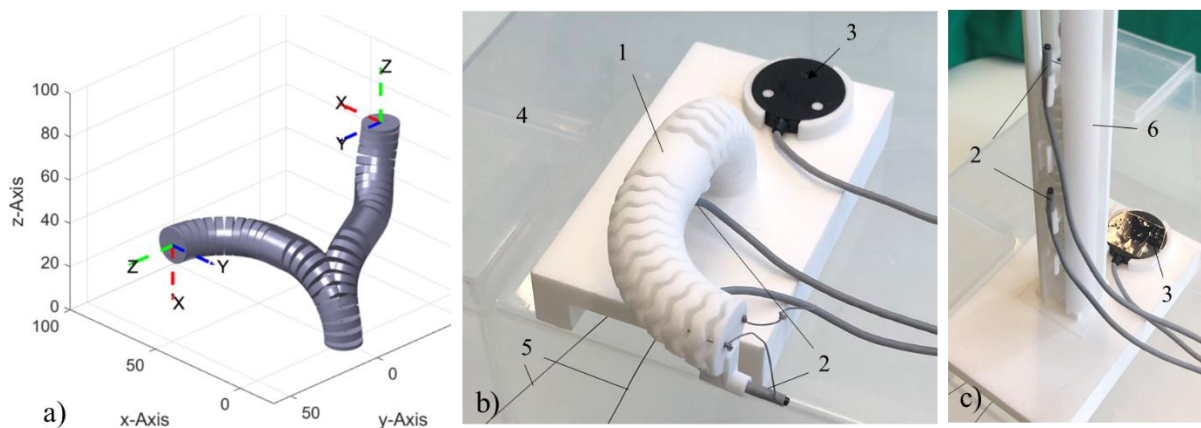


Abb. 53: Experiment zu der Genauigkeit der Endeffektorendposen: a) Modell der Teststruktur, ausgelenkt in den beiden Anschlagstellungen (alle Achsen in mm). b) Versuchsaufbau mit Testkörper (1), EM-Sensoren (2), Referenzsensor (3), Feldgenerator (4) und Seilzügen (5) zur Auslenkung. c) Vor der Versuchsdurchführung erfolgt die Kalibrierung der Pose der Sensoren mit Hilfe eines Kalibrierkörpers (6), der die Struktur in ihrer unausgelenkten Konfiguration hält.

jeder Versuchsdurchführung eine Kalibrierung durchgeführt. Dabei werden die Sensoren im geraden Zustand des Testkörpers ausgelesen. Für die Kalibrierung wurde eine zusätzliche Stützstruktur verwendet, um den Prüfling in seiner geraden Position zu halten. Die Struktur wurde nun abwechselnd in die erste und zweite Anschlagstellung ausgelenkt, wobei dieser Vorgang fünfmal mit der gleichen Kabelkraft wiederholt wurde. Bilder des Versuchsaufbaus sind in Abb. 53 zu sehen.

Ergebnisse:

Die Mittelwerte \bar{x}_e beschreiben die Mittelwerte der absoluten Positionsfehler in alle drei Raumrichtungen und des absoluten Orientierungsfehlers der z-Achse der gemessenen Trackerposen zu den Trackerposen im Modell. Die zwei Anschlagstellungen der beiden Testkörper werden mit zwei Trackern gemessen, welche einmal auf halber Länge der Struktur und einmal an der Spitze der Struktur angebracht sind. Für beide Testkörper führt das zu vier Messgruppen für den Positionsfehler und den Orientierungsfehler, mit fünf Messungen pro Messgruppe. Neben den Mittelwerten sind die Standardabweichungen s und die Extremwerte e_{min} und e_{max} der Messgruppen angegeben. Die Orientierungsfehler sind für eine bessere Einordnung der Größenordnung in Grad angegeben.

Tabelle 2 – Versuchsergebnisse Experiment 1

		Tracker 1 (Mitte)								Tracker 2 (Spitze)							
		Positionsfehler e_p [mm]				Orientierungsfehler e_o in z [°]				Positionsfehler e_p [mm]				Orientierungsfehler e_o in z [°]			
		e_{min}	e_{max}	\bar{x}_e	s	e_{min}	e_{max}	\bar{x}_e	s	e_{min}	e_{max}	\bar{x}_e	s	e_{min}	e_{max}	\bar{x}_e	s
Testkörper 1	Pose 1	3,7	4,0	3,9	0,2	8,6	10,3	9,2	0,8	16,7	17,7	17,3	0,5	15,5	21,2	18,8	2,4
Testkörper 1	Pose 2	3,4	4,3	3,9	0,4	10,9	13,8	12,5	1,1	18,9	22,9	21,5	1,6	24,1	26,9	25,8	1,1
Testkörper 2	Pose 1	0,8	1,1	0,9	0,1	0,6	9,7	3,8	3,5	3,2	4,1	3,7	0,4	1,1	17,2	5,7	6,7
Testkörper 2	Pose 2	2,1	2,6	2,3	0,2	4,0	5,2	4,6	0,6	2,1	3,0	2,5	0,5	8,0	13,8	10,7	2,1

Auswertung und Diskussion:

Vergleicht man die Werte von Testkörper 1 mit Testkörper 2, so zeigt sich, dass der Einsatz der Kontaktstruktur eine deutliche Verringerung der Positions- und Orientierungsfehler bewirkt. Da für beide Kontaktstrukturen nur ein Testkörper untersucht wurde, werden hier keine statistischen Signifikanztests bezüglich der Verbesserung der Richtigkeit durch die Kontaktstruktur durchgeführt. Die Wiederholgenauigkeit liefert bei allen Testkörpern zufriedenstellende Ergebnisse, durch Standardabweichungen der Positionen von $\leq 0,5$ mm bei sieben der acht Messgruppen und Standardabweichungen der Orientierungen von $\leq 2,4^\circ$ bei sechs der acht Messgruppen.

Ungenauigkeiten in den eingesetzten Druckverfahren führen zu Fehlern in der Struktur, die sich, wenn sie bei den Anschlägen der ersten Gelenke der Struktur auftreten, stark auf die Endeffektorendposen auswirken können. Daher wird aus den angegebenen Druckungenauigkeiten und der Form der Struktur ein Referenzwert für den Vergleich der Richtigkeit berechnet. Tritt durch die Ungenauigkeiten im Fertigungsverfahren an einem Gelenk der Struktur an der Kontaktstruktur (dem Gelenkansschlag) eine Abweichung auf, wird über den resultierenden Winkelfehler und den Abstand dieses Gelenks zu dem Endeffektor, ein möglicher Fehler der Endeffektorendpose berechnet. Die Beträge des Positionsfehlers e_p und des Orientierungsfehlers e_o des Endeffektors, die durch den i -ten Gelenkansschlag verursacht werden, können dabei vereinfacht mit den folgenden Zusammenhängen beschrieben werden:

$$e_p = \|\mathbf{t}_{ee}\| \cdot \frac{e_{am}}{d_c} \quad (12.3)$$

$$e_o = \sin^{-1}\left(\frac{e_{am}}{d_c}\right) \quad (12.4)$$

Der Vektor \mathbf{t}_{ee} beschreibt den Translationsvektor von Gelenkmittelpunkt zu Endeffektorkoordinatensystem. Der Wert e_{am} bezeichnet den Fehler aus dem additiven Fertigungsverfahren und d_c den kürzesten Abstand der Gelenkansschläge zu dem Gelenk. Eine Maßabweichung e_{am} von 0,05 mm (Angabe der Genauigkeit des SLS-Verfahrens in der xy Ebene laut Hersteller) am ersten Gelenkansschlag führt bei den Strukturen in diesem Experiment zu einem Positionsfehler e_p von 0,58 mm und einem Orientierungsfehler e_o von $0,41^\circ$. Wird diese Berechnung für alle Gelenke durchgeführt und von dem schlechtesten Fall ausgegangen, das heißt alle Fehler addieren sich auf, ergibt das einen Positionsfehler von 7,67 mm und einen Orientierungsfehler von $9,41^\circ$. Werden diese Werte mit den Werten von Testkörper 2 verglichen, relativieren sich die Fehler des Endeffektors, da die Mittelwerte der gemessenen Fehler alle unterhalb dieser Werte liegen. Die Richtigkeit der Anschlagsstellungen und damit auch der Endeffektorendposen hängt also maßgeblich von der Maßhaltigkeit des Druckverfahrens ab.

12.2 Validierung des quasistatischen Modells

Um das quasistatische Modell aus Kapitel 8.1 nutzen zu können, muss überprüft werden, wie genau das Modell die Bewegung einer realen Struktur abbilden kann und ob diese Vorhersage exakt genug für die Anwendungszwecke des Modells ist. Für den Einsatz des Modells zur Vorhersage der Bewegung, z.B. um Kollisionen mit Objekten in der Umgebung zu vermeiden, darf der Fehler nicht größer als eine bestimmte vorgegebene Abweichung sein. Wird diese

Toleranz eingehalten, ist die kollisionsfreie Bewegung der Struktur gewährleistet. Als Referenzwert für die maximale Abweichung der hier getesteten Strukturen wird der Durchmesser der Teststruktur hergenommen.

Material und Methoden:

Es wurde ein Experiment zur Validierung des Modells durchgeführt, bei dem die Trajektorien der Endeffektoren der Formgedächtnisstrukturen aus Kapitel 8.2 (s. Tabelle 1 und Abb. 38) aufgenommen und mit dem Modell verglichen wurden. Diese Strukturen haben alle die gleiche Anschlagsstellung bei vollständiger Auslenkung und bestehen aus 40 Elementen und 39 drehgelenkartigen Festkörpergelenken. Die Dicke d_f der Festkörpergelenke variiert über die Testkörper und die Breite b_f der Festkörpergelenke variiert zum einen über die Testkörper und zum anderen abschnittsweise innerhalb eines Testkörpers. Der Name des Testkörpers gibt dabei die Werte von d_f und b_f an: Testkörper „08x7030“ hat Festkörpergelenke mit $d_f = 0,8 \text{ mm}$ und $b_f = 7,0 \text{ mm}$ für Gelenk 1 bis Gelenk 22 und $b_f = 3,0 \text{ mm}$ für Gelenk 23 bis Gelenk 39. Die Messung der Strukturen ist bei allen Testkörpern in der gleichen Ausrichtung erfolgt: Die Strukturen zeigen im unausgelenkten Zustand in die Richtung der Erdbeschleunigung. Zur Messung der Bewegung des Endeffektors der Struktur wurde die optische Infrarotstereokamera Polaris Vicra (NDI Medical, Waterloo, Kanada) verwendet. Dazu wurde an der Spitze der

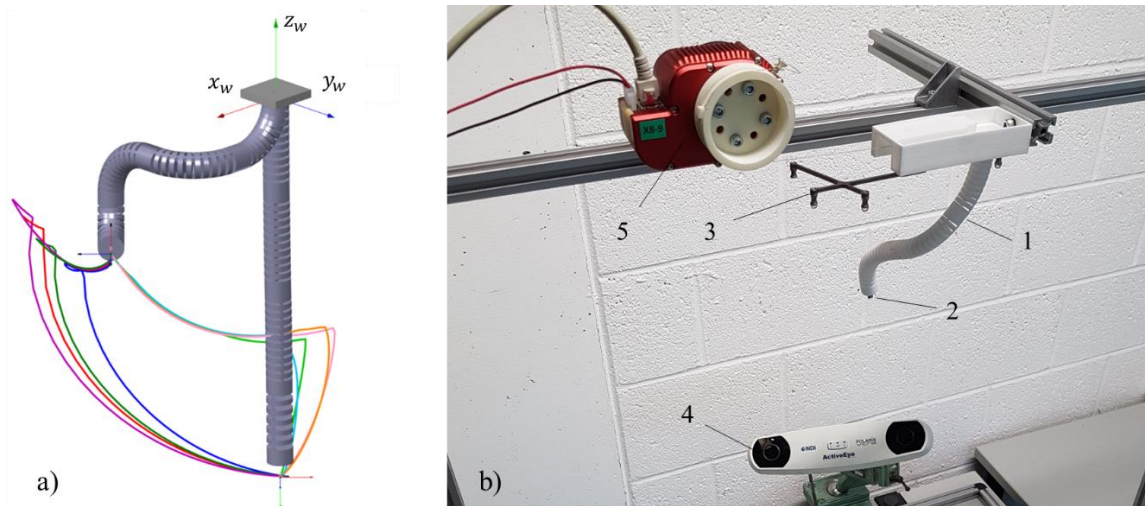


Abb. 54: Experiment zur Validierung des quasistatischen Modells: a) Testkörper mit den modellierten Endeffektorbahnen, abhängig von den Gelenksteifigkeiten (entsprechen den Testkörpern aus Kapitel 8.2). b) Versuchsaufbau: Die Teststruktur (1) wird am Endeffektor mit einer optischen Trackerkugel (2) und an der Basis mit einem Referenztracker (3) versehen. Die Tracker werden über eine Stereokamera (4) erfasst, während die Struktur über ein Motormodul (5) ausgelenkt wird.

Struktur eine optische Markerkugel angebracht und an der Basis der Struktur ein Referenztracker. Damit lässt sich die Position des Endeffektors im Kamerakoordinatensystem messen und mit Hilfe des Referenztrackers in das Koordinatensystem des quasistatischen Modells umrechnen. Die Auslenkung der Strukturen wurde mit einem HEBI X8-9 Robotikmodul (HEBI Robotics, Pittsburgh, USA) über einen Seilzug von Carl Stahl Technocables GmbH (Süßen, Deutschland) mit einem Außendurchmesser von 0,36 mm (Werkstoff 1.4401, 6 x 7 – WSC, PA 12 ummantelt) durchgeführt. Der Seilzug wurde von dem HEBI-Modul auf eine Rolle mit einem Durchmesser von 25 mm aufgewickelt.

In einem ersten Schritt wurde bestimmt, welche Motorposition für eine vollständige Auslenkung der Teststruktur angefahren werden muss. Dazu wurde die Struktur schrittweise bis zu seiner Anschlagstellung ausgelenkt und optisch kontrolliert, ob alle Anschläge zwischen den Elementen erreicht sind. Zusätzlich kann bei vollständiger Auslenkung der Struktur über die Motormomentmessung des HEBI-Moduls ein starker Anstieg der Seilkraft registriert werden. Somit ist die Motorposition für die vollständige Auslenkung bestimmt und es konnte die Messung der Endeffektorbahnkurve erfolgen. Pro Teststruktur wurden drei Messzyklen durchgeführt, das heißt die Struktur wurde dreimal in ihre Anschlagstellung ausgelenkt und wieder losgelassen. Pro Messzyklus wurden 160 Punkte aufgenommen, 80 Punkte bei der Auslenkung der Struktur in die Anschlagstellung und 80 Punkte während der Bewegung zurück in die ausgestreckte Ausgangskonfiguration. Die Auslenkung ist in konstanten Schritten erfolgt, wobei ein Schritt einer Verkürzung des Seilzugs um $1/80$ der Gesamtlänge des Seils, das die Struktur für das komplette Auslenken benötigt, entspricht. Die Geschwindigkeit der Auslenkung ist mit 1,5 s pro Messschritt erfolgt.

Ergebnisse:

Für jeden Messpunkt wurde der kleinste euklidische Abstand zur berechneten Bahnkurve ermittelt, was für jeden Messwert einen Positionsfehler e_p ergibt. Die Messungen wurden aufgeteilt in die Aufwärtsbewegung, also die Bewegung von der unausgelenkten Konfiguration in die ausgelenkte Anschlagstellung und Abwärtsbewegung, also von der ausgelenkten Anschlagstellung in die unausgelenkte Konfiguration. Über alle Messwerte der drei Messzyklen einer Struktur ergeben sich daraus der minimale Positionsfehler e_{min} , der maximale Positionsfehler e_{max} , der Mittelwert des Positionsfehler \bar{x}_e und die Standardabweichung des Positionsfehler s .

Aufwärts- und Abwärtsbewegung wurden getrennt betrachtet, da bei der Abwärtsbewegung deutliche Abweichungen von dem Modell ersichtlich sind. Für die Aufwärtsbewegung ergibt sich ein mittlerer Positionsfehler von 10,9 mm mit einer Standardabweichung von 5,2 mm. Für

die Abwärtsbewegung ergibt sich ein Fehler von 16,8 mm bei einer Standardabweichung von 12,3 mm (für die ausführlichen Ergebnisse siehe Anhang B.2). Die Bewegungen von 2 der 8 Testkörper sind in Abb. 55 und Abb. 56 dargestellt. Abgebildet sind die Testkörper „08x7030“ und „12x1060“. Es werden hier zum einen die Strukturen in verschiedenen Konfigurationen dargestellt, zum anderen sind die berechneten Endeffektorbahnkurven und die experimentell bestimmten Endeffektorbahnkurven eingezeichnet. Dabei sind die tatsächlichen Messpunkte abgebildet und die sich ergebene Kurve aus den gemittelten Messwerten, jeweils für Aufwärts- und Abwärtsbewegung.

Auswertung und Diskussion:

Für eine Bewertung der Abweichung der Endeffektorbahnkurve des quasistatischen Modells zu der gemessenen Endeffektorbahnkurve wird ein Signifikanztest durchgeführt. Dabei wird überprüft, ob die Abweichung der Bahnkurve des Modells von der gemessenen Bahnkurve (Mittelwert \bar{x}_e) statistisch signifikant kleiner als der Durchmesser der Teststruktur (Erwartungswert μ_0) ist. Es wird dafür ein Signifikanzniveau von 5% gewählt, das heißt es soll überprüft werden, ob die Annahme $\bar{x}_e < \mu_0$ mit einer Restfehlerwahrscheinlichkeit von 5% zutrifft. Für die Signifikanzprüfung wird ein einseitiger t-Test verwendet, für den die Annahme einer normalverteilten Grundgesamtheit der Messgröße gelten muss. Der t Wert wird mit folgender Formel berechnet:

$$t = \sqrt{n} \cdot \frac{\bar{x}_e - \mu_0}{s} \quad (12.5)$$

Um die Hypothese $\bar{x}_e < \mu_0$ zu bestätigen, muss gelten:

$$t < -t_{crit} \quad (12.6)$$

Der Erwartungswert μ_0 entspricht hier dem Durchmesser der Struktur von 16 mm und die Stichprobengröße n der Anzahl der Testkörper ($n = 8$). Es wird auch hier zwischen Aufwärtsbewegung und Abwärtsbewegung der Struktur unterschieden. Bei einem Mittelwert $\bar{x}_{e,auf}$ von 10,9 mm und einer Standardabweichung von 5,2 mm ergibt sich für die Aufwärtsbewegung ein t Wert von -2,77. Bei einem Mittelwert $\bar{x}_{e,ab}$ von 16,8 mm und einer Standardabweichung von 12,3 mm ergibt sich für die Abwärtsbewegung ein t Wert von 0,18. Der kritische Wert t_{crit} wird aus der t-Verteilung mit Signifikanzniveau 0,05 und Freiheitsgrad $n - 1 = 7$ entnommen und ergibt sich damit zu 1,90. Mit Formel (12.6) kann daher für die Aufwärtsbewegung die Hypothese $\bar{x}_{e,auf} < \mu_0$ bestätigt werden. Damit ist der Positionsfehler der Endeffektorbahnkurve des quasistatischen Modells signifikant kleiner als der Durchmesser der Teststruktur. Für die Abwärtsbewegung kann das jedoch nicht bestätigt werden, die

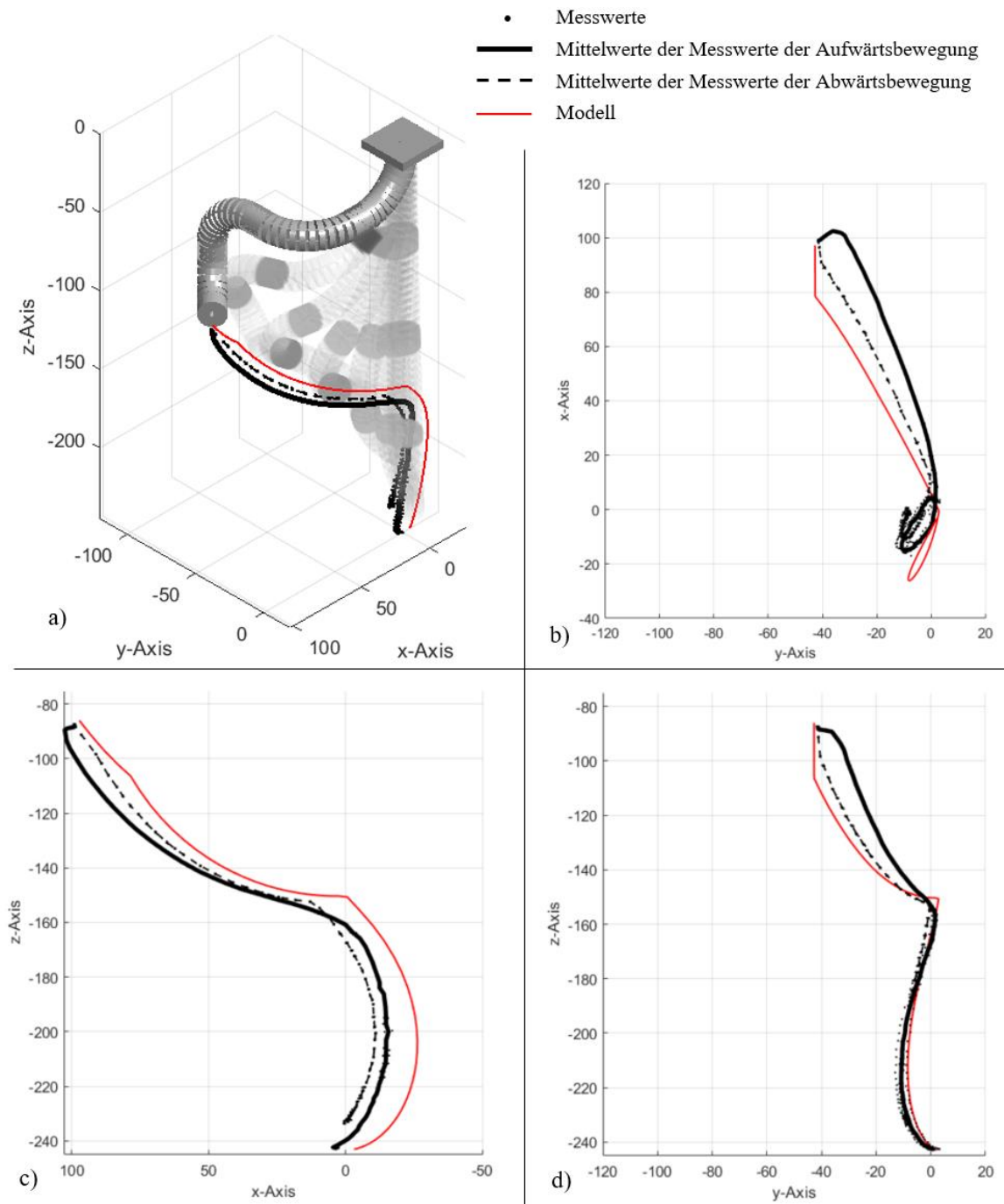


Abb. 55: Ergebnisse des Experiments zur Validierung des quasistatischen Modells: Testkörper 08x7030. a) Isometrische Ansicht des Modells der Teststruktur in verschiedenen Konfigurationen während der Aufwärtsbewegung, die Endeffektorbahnkurven aus dem Modell und die Endeffektorbahnkurven aus den Messwerten. Nur Endeffektorbahnkurven: b) Seitenansicht von links, c) Untersicht, d) Vorderansicht. Alle Achsen sind in mm angegeben.

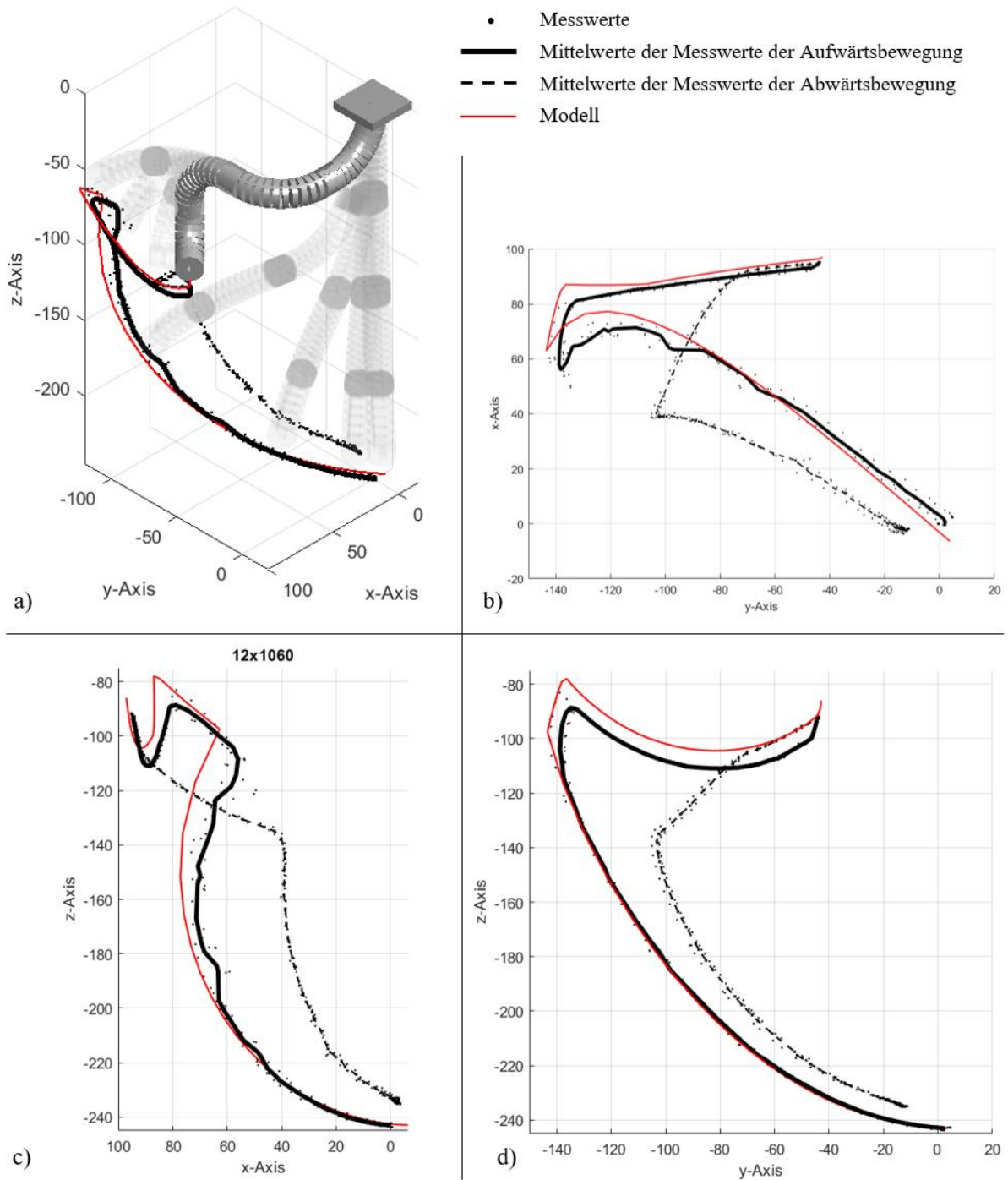


Abb. 56: Ergebnisse des Experiments zur Validierung des quasistatischen Modells: Testkörper 12x1060. a) Isometrische Ansicht des Modells der Teststruktur in verschiedenen Konfigurationen während der Aufwärtsbewegung, die Endeffektorbahnkurven aus dem Modell und die Endeffektorbahnkurven aus den Messwerten. Nur Endeffektorbahnkurven: b) Seitenansicht von links, c) Untersicht, d) Vorderansicht. Alle Achsen sind in mm angegeben.

Abweichungen der gemessenen Bahnkurve zu der des quasistatischen Modells sind hier zu groß.

12.3 Evaluierung der Steifigkeiten von SLS-gefertigten Festkörpergelenken

Die Gelenksteifigkeiten der Festkörpergelenke berechnen sich wie beschrieben mit den Formeln (8.8) und (8.9). In dem folgenden Experiment soll nun überprüft werden, ob diese Zusammenhänge die realen Gelenksteifigkeiten der Strukturen wiedergeben. Das ist eine Voraussetzung, um die Endeffektorbahnkurven der Strukturen gezielt beeinflussen zu können. Da im Rahmen dieser Arbeit nur eine Anpassung der Endeffektorbahn von Strukturen mit drehgelenkartigen Festkörpergelenken realisiert wurde, beschränkt sich das Experiment auf drehgelenkartige Festkörpergelenke und Formel (8.9).

Material und Methoden:

Es wurden Festkörpergelenke gedruckt, ausgelenkt und die Seilkraft, die zur vollständigen Auslenkung der Gelenke benötigt wird, gemessen. Es wurden eine Reihe an Testkörpern mit je einem Festkörpergelenk im SLS-Verfahren aus PA2200 gedruckt. Es handelt sich hier, wie in Kapitel 5.3.2 beschrieben, um drehgelenkartige Festkörpergelenke mit zwei in der Drehachse versetzten Gelenken. Es wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt. Bei beiden Versuchsreihen wurde die Gelenkdicke d_f über mehrere Testkörper variiert, das heißt beginnend bei einer Gelenkdicke von 0,3 mm wurde diese in 0,2 mm Schritten bis zu einer Gelenkdicke von 1,5 mm erhöht. Folgende Werte wurden innerhalb der Versuchsreihe nicht geändert: Die Gelenkbreite b_f beträgt 3 mm, der Abstand von Seilzug zu Gelenkachse (charakterisiert durch die Summe aus r_f und r_w) 8 mm, der maximale Auslenkwinkel φ beträgt 0,3142 rad (18°) und die Höhe des Gelenks h_f beträgt 3,2 mm. Bei der zweiten Versuchsreihe waren höhere Seilkräfte als bei der ersten Versuchsreihe nötig, bedingt durch einen geringeren Abstand des Seilzuglochs zum Gelenk von 4 mm, durch eine größere Gelenkbreite b_f von 6 mm und durch eine geringere Gelenkhöhe von 1,9 mm. Die beiden Versuchsreihen bestanden also jeweils aus 7 verschiedenen Testkörpern, wobei jeder der 7 gelisteten Testkörper dreimal gefertigt und getestet wurde. Die Parameter der verschiedenen Testkörper sind noch einmal im Detail im Anhang B.3 aufgeführt. Zur Auslenkung wurde ein Seil von Carl Stahl Technocables GmbH (Süßen, Deutschland) mit einem Außendurchmesser von 0,36 mm verwendet (Werkstoff 1.4401, 6 x 7 – WSC, PA 12 ummantelt). Zur Messung der Seilkraft wurde der Kraft-Weg-Messer Medio-Line 40010 (Pesola, Schindellegi, Schweiz) eingesetzt. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 57 gezeigt.

Es wird per Hand an dem Kraft-Weg-Messer am Ende des Seilzugs gezogen und damit das Gelenk bis zu dem Gelenkansschlag ausgelenkt. Wird eine merkliche Erhöhung der Seilkraft festgestellt, hat das Gelenk den maximalen Auslenkwinkel (also den Gelenkansschlag) erreicht. Gleichzeitig wird mit einer in der Drehachse des Gelenks angebrachten Kamera die Messung aufgezeichnet. Die Kamera zeichnet das Gelenk und den Kraft-Weg-Messer auf und es kann damit zum Zeitpunkt der vollständigen Auslenkung die Kraft am Messgerät abgelesen werden.

Ergebnisse:

Aus der theoretischen Drehfedersteifigkeit aus Formel (8.9) kann mit Formel (8.6) das erwartete Rückstellmoment berechnet und über den Hebelarm die erwartete Seilkraft berechnet werden. Es wurde dabei die Abhängigkeit des E-Moduls von der Gelenkdicke wie in Formel (8.10) berücksichtigt und der Einfluss von Gewichtskraft und der Gleitreibung zwischen Seil und Struktur herausgerechnet. Die erwartete Seilkraft F_w ergibt sich damit zu:

$$F_w = \frac{c_{yy} \cdot \alpha + M_g}{r_w + r_f} \cdot e^{\mu_k \cdot \alpha} \quad (12.7)$$

mit der berechneten Drehfedersteifigkeit c_{yy} , dem Auslenkwinkel α , dem Drehmoment aus der Gewichtskraft M_g , dem Hebelarm des Seilzugs $r_w + r_f$ und dem Faktor $e^{\mu_k \cdot \alpha}$ aus der Formel (8.5) für die Seilreibung. Die erwartete Seilkraft F_w wurde nun mit der gemessenen Seilkraft $F_{w,meas}$ verglichen und die Differenz gebildet. Die Werte sind in Abb. 58 als Diagramm

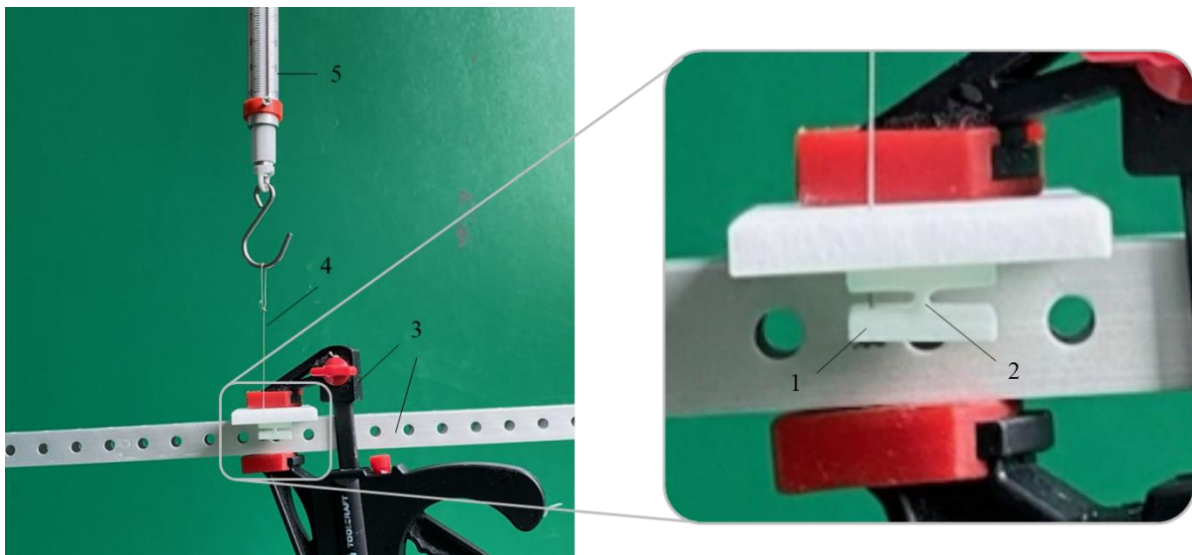


Abb. 57: Versuchsaufbau des Experiments zu Evaluierung der Gelenksteifigkeiten: Der Testkörper (1) mit Festkörpergelenk (2) wird an der Basis mit einer Klemme fixiert (3). Über einen Seilzug (4) wird das Gelenk ausgelenkt und die benötigte Kraft von einem Kraft-Weg-Messer (5) abgelesen.

dargestellt. Der Mittelwert der Abweichungen beträgt in der ersten Versuchsreihe 1,02 N mit einer Standardabweichung von 0,28 N. In der zweiten Versuchsreihe konnten die Testkörper ab einer Gelenkdicke von 1,1 mm nicht mehr vollständig ausgelenkt werden, da die auftretenden Seilkräfte zu hoch waren und der Seilzug bei allen drei Versuchen gerissen ist. Der Mittelwert der Abweichungen beträgt in der zweiten Versuchsreihe 3,72 N mit einer Standardabweichung von 2,21 N.

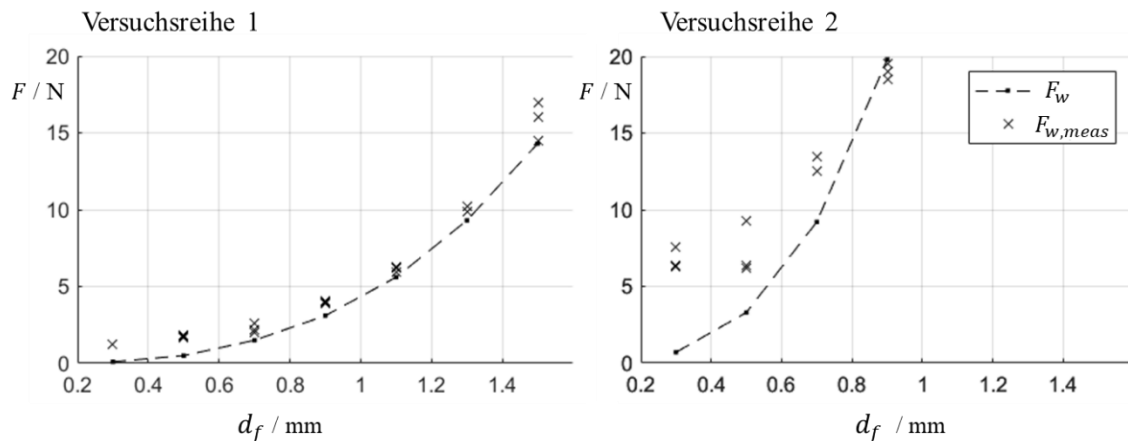


Abb. 58: Ergebnisse der beiden Versuchsreihen des Experiments zu Evaluierung der Gelenksteifigkeiten. Über die verschiedenen Festkörpergelenkdicken d_f sind die erwarteten Seilkräfte F_w aus Formel (12.7) und die gemessenen Seilkräfte $F_{w,meas}$ eingezeichnet.

Auswertung und Diskussion:

Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe zeigen gute Übereinstimmungen der berechneten Seilkräfte (mit den theoretischen Drehfedersteifigkeiten) und der gemessenen Seilkräfte. Die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe weichen allerdings stärker von den berechneten Seilkräften ab. Bei der Berechnung der Steifigkeiten in Formel (8.9) werden die Gelenke zur Vereinfachung als Balken, mit dem Querschnitt der dünnsten Stelle der Gelenke, betrachtet. In Versuchsreihe 2 haben die Gelenke eine kleinere Höhe h_f und daher liegt die Vermutung nahe, dass diese Gelenke weniger dem Balkenmodell entsprechen als die Gelenke in Versuchsreihe 1.

13. Zusammenfassung

Die Interaktion von Robotern mit Menschen und komplexen Umgebungen motiviert die Entwicklung von Robotersystemen aus nachgiebigen Strukturen. Dabei ermöglichen additive Fertigungsverfahren die schnelle und kostengünstige Erstellung neuer Robotersysteme und Mechanismen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Formgedächtnisstrukturen (*Shape Memory Structures*), monolithische schlangenähnliche unteraktuierte Roboterstrukturen und deren automatisierte Entwurfsprozesse vorgestellt. Basierend auf vorhergehenden Arbeiten, beschreibt diese Arbeit das Konzept, den Aufbau, den automatisierten Konstruktionsprozess und den Herstellungsprozess dieser Strukturen.

Die Bezeichnung der Strukturen als Formgedächtnisstrukturen wurde als Analogie zu den Formgedächtnislegierungen gewählt, da sich die flexiblen Strukturen mit nur einem Aktuierungsfreiheitsgrad in eine vordefinierte komplexe Form auslenken und versteifen lassen. Die Strukturen bestehen aus einer seriellen Kette von steifen Elementen und Festkörpergelenken und werden mit Hilfe möglichst weniger Aktoren über Seilzüge in vordefinierte Gesamtformen (Anschlagsstellungen) ausgelenkt. Unter Vorgabe von Zielposen des Strukturendeffektors (Endeffektorendposen) und verschiedener weiterer Rahmenparameter können diese additiv fertigen Strukturen mit den vorgestellten Methoden automatisiert entworfen werden. Die Strukturen können bei sich wiederholenden Aufgaben oder in komplexen Umgebungen nützlich sein, bei denen ein einfacher Aufbau und eine einfache Steuerung wichtiger ist als die Vielseitigkeit eines herkömmlichen Robotersystems.

Für den Entwurf der Formgedächtnisstrukturen können die folgenden Vorgaben gemacht werden: Mit der Vorgabe der Gesamtpose kann eine Einposen-Formgedächtnisstruktur entworfen werden (Krieger, Schiele *et al.* 2019). Aufbauend auf diesen Vorarbeiten wird in dieser Arbeit das Prinzip der Formgedächtnisstrukturen um Strukturen mit mehreren Endeffektorendposen erweitert. Es werden mehrere Zielposen für den Endeffektor definiert und eine Struktur gesucht, die diese erreichen kann. Dazu wurde zunächst das grundlegende Funktionsprinzip der Formgedächtnisstrukturen und deren Nomenklatur vorgestellt. Darauf folgen die mechanischen Konzepte zur konstruktiven Umsetzung der Strukturen. Diese Konzepte bilden die Grundlage, um Formgedächtnisstrukturen zu realisieren, die in mehr als eine Endeffektorendpose ausgelenkt werden können. Nach der Vorstellung der mechanischen Konzepte wurde die Beschreibung der direkten Kinematik der Strukturen gezeigt und eine Ersatzkinematik für die Suche nach Strukturparametern zur Erstellung einer geeigneten Struktur vorgestellt. Die Beschreibung der Kinematik der Strukturen bildet die Grundlage für

die Modellierung und die automatisierte Erstellung der Strukturen. Um solche aufgabenspezifischen Systeme wirtschaftlich einsetzen zu können, muss der Entwurfsprozess automatisiert werden. Es wurde daher ein automatisierter Konstruktionsprozess entwickelt, um die Strukturen schnell und kostengünstig, ausgelegt für eine Aufgabe, zu entwerfen. Zwei Ansätze für den automatisierten Entwurf der Strukturen über die Ersatzkinematik wurden dabei vorgestellt. Der automatisierte Entwurf bezieht sich dabei zunächst nur auf die Strukturen in ihren versteiften Anschlagsstellungen, also in den jeweiligen vollständig ausgelenkten Zuständen. Um eine Voraussage über das Bewegungsverhalten der Strukturen zwischen diesen Anschlagsstellungen machen zu können, wurde ein quasistatisches Modell der Strukturen aufgestellt. Mit Hilfe dieses Modells kann eine Vorhersage über die Bahnkurve des Endeffektors gemacht werden und durch eine Anpassung der Gelenksteifigkeiten, diese an eine vorgegebene Bahnkurve angenähert werden. Die Strukturen wurden im SLS-Verfahren mit PA12 und im FDM-Verfahren mit PLA gedruckt. Es wurde auf die beiden eingesetzten additiven Fertigungsverfahren und die Anpassung der Strukturen auf die beiden Verfahren eingegangen. Mit der Auslegung der Strukturen für die Herstellung in FDM-Druckern wird zum einen eine kostengünstige Erstellung der Strukturen ermöglicht, zum anderen soll durch die weite Verbreitung solcher Drucker der Zugang zu den Formgedächtnisstrukturen für viele Anwender eröffnet werden.

Um die mechanischen Konzepte zu validieren und um Anwendungen der Formgedächtnisstrukturen zu illustrieren, wurden verschiedene Funktionsmuster und Anwendungsbeispiele erstellt. Der Einsatz der Formgedächtnisstrukturen in realen Anwendungen ist bisher noch nicht erfolgt, die Funktionsmuster sollen aber zeigen, welche Möglichkeiten die Strukturen in verschiedenen Anwendungsszenarien bieten könnten.

14. Ausblick

Basierend auf den in dieser Arbeit vorgestellten Methoden ist der nächste Schritt die Betrachtung weiterer Randbedingungen bei der automatisierten Konstruktion der Strukturen, wie der verfügbare Arbeitsraum, Hindernisse in der Umgebung oder bestimmte Lastszenarien, die in die automatisierte Konstruktion der Strukturen einfließen können.

Damit eine sinnvolle Anwendung der Strukturen möglich wird, müssen die räumlichen Beschränkungen der Umgebung, in der die Formgedächtnisstruktur eingesetzt werden soll, mit in den automatisierten Konstruktionsprozess aufgenommen werden. Im Konstruktionsprozess muss dementsprechend überprüft werden, ob sich die Struktur in dem erlaubten Bereich bewegt und keine dieser Beschränkungen verletzt wird. Das gilt im gleichen Maße für Hindernisse, die in der Bahnkurve des Endeffektors liegen. Auch hier muss gewährleistet werden, dass die Lösungsstruktur nicht mit den Hindernissen kollidiert. Das könnte erreicht werden, indem auch Kollisionen der Struktur mit ihrer (virtuellen) Umgebung in die Kostenfunktion in Kapitel 6.2.2 eingehen. Wie zuvor schon beschrieben, wird bei der Suche nach einer geeigneten Struktur für das Erreichen mehrerer Endeffektorendposen in Kapitel 6.2.2 ein Kostenfaktor eingeführt, anhand dessen die Qualität der einzelnen Lösungen bewertet wird. Dieses Prinzip der Bewertung der Lösungen kann um beliebige Randbedingungen erweitert werden. Wird z.B. eine Kollision mit der Umgebung der Struktur als Kostenfaktor eingeführt, wird eine Ersatzkinematik, die diese räumlichen Beschränkungen verletzt, mit einem hohen Kostenfaktor versehen und dementsprechend schlechter bewertet.

Ein weiterer wichtiger Schritt, um die Strukturen sinnvoll einsetzen zu können, ist die Berechnung der übertragbaren Kräfte der Strukturen. Da je nach Anwendung bestimmte Lastfälle auftreten, müssen die Strukturen so ausgelegt werden, dass sie diesen Belastungen standhalten können und sie auch unter Belastung ihre Bewegungsaufgabe sinnvoll erfüllen können. Um das volle Potenzial der Formgedächtnisstrukturen auszuschöpfen, ist es vor allem wichtig, sie in der Realität einzusetzen und die Strukturen aus dem Labor in reale Anwendungen zu bringen.

Aufbauend auf den Anpassungen der Gelenksteifigkeiten zur Beeinflussung der Endeffektorbahnkurve in Kapitel 8.2 sollte im nächsten Schritt untersucht werden, ob es auch möglich ist, ein Vorgehen zu entwickeln, welches erlaubt nicht nur den Endeffektorpfad einer bestehenden Struktur anzupassen, sondern auf Basis eines Endeffektorpfades eine Struktur zu finden, welche diesen Pfad abfahren kann. Dazu wurde in einem ersten Versuch das Vorgehen aus Kapitel 6.2.3 so erweitert, dass nicht nur Endeffektorendposen sondern auch der

Endeffektorpfad das Ziel der Optimierung ist. Das heißt bei jeder Iteration des in Kapitel 6.2.3 beschriebenen Optimierungsprozesses wird nicht nur bewertet wie gut die Strukturen ihre Endeffektorendposen erreichen, sondern auch wie gut sie den vorgegebenen Endeffektorpfad abfahren. Dafür wird in jeder Iteration das quasistatische Modell aus Kapitel 8.1 berechnet und die kürzesten Abstände der Punkte des Zielpfads zu dem berechneten Endeffektorpfad ermittelt. Diese Abstände gehen dann in die Kostenfunktion aus Formel (6.14) mit ein. Allerdings konnten mit diesem Vorgehen auf Grund der hohen Rechenzeiten keine Lösungen gefunden werden. Trotzdem wäre ein Entwurf der Strukturen, aufbauend auf der Endeffektorbahnkurve, eine interessante Weiterentwicklung des Entwurfsprozesses, um die Strukturen auf bestimmte Aufgaben anpassen zu können.

14.1 Alternative Konzepte automatisiert konstruierter aufgabenspezifischer *Low-Cost-Mechanismen*

Die Formgedächtnisstrukturen haben durch ihre Grundform der monolithischen seriellen Festkörpergelenkketten einige Einschränkungen. Sie sind nur für bestimmte Anwendungsfelder interessant, sie sind in der jetzigen Form nur begrenzt skalierbar, der automatisierte Entwurfsprozess findet nicht für alle Vorgaben eine umsetzbare Lösung und die Anpassung der Bahnkurven der Endeffektoren ist nur beschränkt möglich, da zum einen die Steifigkeitsänderungen nur in einem beschränkten Umfang möglich sind und zum anderen die Aktuierung aller Gelenke immer gleichzeitig erfolgt.

Im Zuge der Umsetzung der hier beschriebenen Strukturen sind weitere alternative Konzepte für den Entwurf von kostengünstigen und einfach fertigen Mechanismen entstanden. Diese Konzepte unterscheiden sich im Aufbau und der Lösungsfindung von den hier vorgestellten Strukturen, es soll aber ein kurzer Ausblick auf diese alternativen Konzepte gegeben werden.

Faltmechanismen

Die Faltungsrobotik verwendet Falttechniken wie Origami oder Kirigami, um mit einfachen Herstellungsmethoden komplexe Mechanismen zu entwerfen. Faltroboter und Faltmechanismen können aus ebenen Werkstücken hergestellt werden, was ihre Produktion im Vergleich zu additiv gefertigten Strukturen noch einfacher macht. Hier wurde nun ein automatisierter Konstruktionsprozess für Faltmechanismen mit einem Freiheitsgrad entworfen, die sich zwischen zwei vorgegebenen Endeffektorendposen und damit zwei Anschlagstellungen bewegen können. Die Vorgaben an die Strukturen ähneln denen der Formgedächtnisstrukturen, jedoch erfolgt die Bewegung zwischen den Anschlagstellungen über einen kinematisch gekoppelten Faltmechanismus. In Abb. 59 ist ein solcher Mechanismus

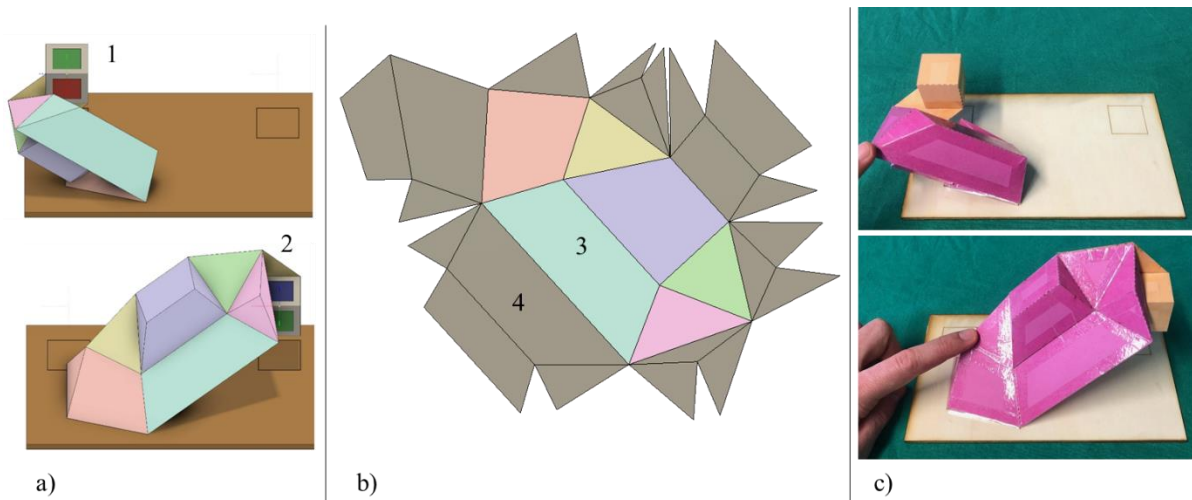


Abb. 59: Faltmechanismen mit zwei vorgegebenen Endanschlagsposen (1) bzw. (2): a) als CAD-Modell, b) als ebenes Faltmuster und c) umgesetzt als Papiermodell. In der Mitte des Faltnetzes sitzt die eigentliche Faltstruktur (3) und mit den äußeren Faltstrukturen (4) werden die dreidimensionalen Gelenkanschlüsse umgesetzt.

als CAD-Modell, als ebenes Faltnetz und als reales Papiermodell gezeigt. Die Automatisierung der Faltmustererstellung ist hier ebenfalls in MATLAB erfolgt. Es wird das kinematische Modell der Faltstruktur als Optimierungsproblem formuliert und mit der *Optimization Toolbox* in MATLAB nach einer geeigneten Lösung gesucht. Auch hier werden Gelenkanschlüsse für die Anschlagstellungen integriert, z.B. als Teil der Faltstruktur wie in dem Beispiel in Abb. 59 dargestellt.

Kinematisch gekoppelte Gelenkketten

Im Hinblick auf den Entwurf von Strukturen, die vorgegebene Trajektorien abfahren können, sind die Grenzen der Formgedächtnisstrukturen ersichtlich geworden. Durch die Tatsache der Unteraktuierung und der Kraftkopplung durch einen Seilzug, ergeben sich zum einen starke Einschränkungen bei dem Entwurf der Strukturen bzw. bei der Suche nach einer Struktur unter der Vorgabe einer Bahnkurve oder Trajektorie. Zum anderen ändert sich das Verhalten der Strukturen durch das Aufbringen externer Kräfte stark, was z.B. bei einer Änderung des Lastfalls bedeuten kann, dass die Bewegungsvorgabe nicht mehr erfüllt wird. Ein Konzept für die Erstellung additiv fertiger Mechanismen für das Abfahren vorgegebener Trajektorien wurde mit den seriell gekoppelten Mechanismen mit einem Freiheitsgrad in Schiele *et al.* (2022) vorgestellt. Diese im FDM-Verfahren gefertigten Mechanismen werden unter Vorgabe einer planaren Endeffektortrajektorie automatisiert entworfen. Die kinematische Kopplung der Mechanismusglieder erfolgt über Getriebestufen, die aus Stirnrädern und Zahnriemenrädern bestehen. Die grundlegenden Konstruktionsparameter dieser Mechanismen werden mit Hilfe

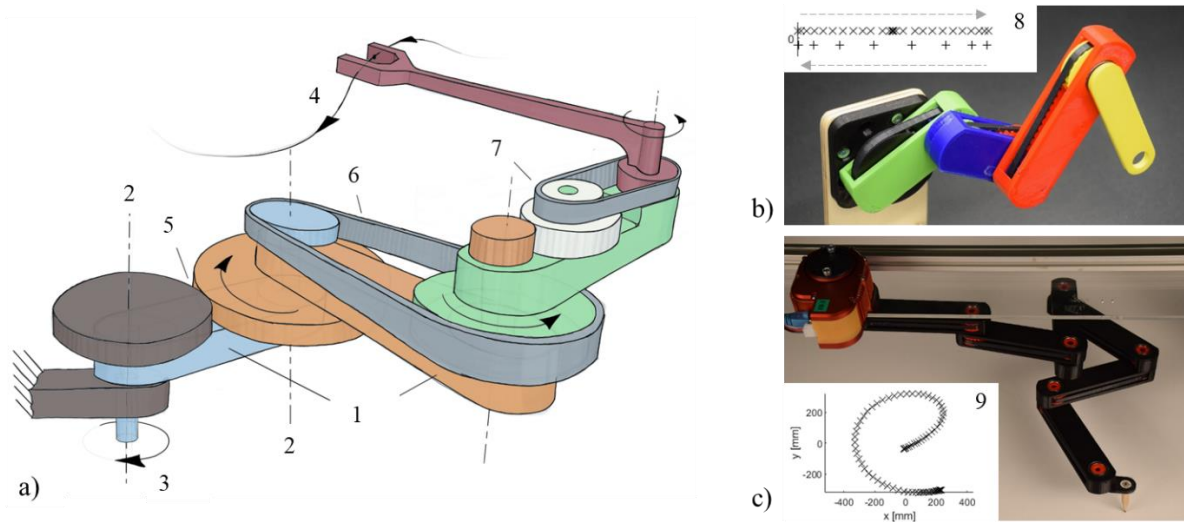


Abb. 60: Kinematisch gekoppelte serielle Gelenkketten für die Herstellung im FDM-Druck: a) Schematischer Aufbau der Mechanismen: Glieder (1), Drehachsen der Glieder (2), Antrieb (3), Trajektorie des Endeffektors (4), Stirnradpaarung (5), Zahnriemen (6), Übersetzung mit Stirnrädern und Zahnriemen (7). c) bzw. d) Zwei gedruckte Mechanismen mit den jeweiligen Trajektorien (8) bzw. (9) (angelehnt an Schiele *et al.* 2022).

einer Fourierreihe bestimmt, wobei die berechneten Fourier-Elemente mit ihrer jeweiligen Frequenz, Amplitude und Phase als rotierende 2D-Vektoren interpretiert werden, welche wiederum als Grundlage für den Aufbau der Mechanismenglieder dienen. Darauf aufbauend wird die kinematische Kopplung der Glieder berechnet und die entsprechenden Getriebestufen der Glieder entworfen. Alle Teile dieser Mechanismen, einschließlich der Zahnriemen, können mit dem kostengünstigen FDM 3D-Druckverfahren hergestellt werden. Die Software für den automatisierten Entwurf dieser Manipulatoren, von der Fourier-Zerlegung bis zur Generierung von CAD-Dateien, wurde in MATLAB implementiert. Um den automatisierten Entwurfsprozess zu validieren, wurden verschiedene Testmechanismen hergestellt und die Genauigkeit und Präzision der abgefahrenen Trajektorien untersucht.

Literaturverzeichnis

- Albu-Schäffer, A., Eiberger, O., Fuchs, M., Grebenstein, M., Haddadin, S., Ott, C., Stemmer, A., Wimböck, T., Wolf, S., Borst, C. & Hirzinger, G., 2011. Anthropomorphic Soft Robotics – From Torque Control to Variable Intrinsic Compliance. In *Springer Tracts in Advanced Robotics*. pp. 185–207.
- Amanov, E., Nguyen, T.-D. & Burgner-Kahrs, J., 2015. Additive manufacturing of patient-specific tubular continuum manipulators. In R. J. Webster & Z. R. Yaniv, eds. *Medical Imaging 2015: Image-Guided Procedures, Robotic Interventions, and Modeling*. p. 94151P.
- Ananthasuresh, G.K., Kota, S. & Gianchandani, Y., 1994. A METHODOLOGICAL APPROACH TO THE DESIGN OF COMPLIANT MICROMECHANISMS. In *1994 Solid-State, Actuators, and Microsystems Workshop Technical Digest*. San Diego, CA USA: Transducer Research Foundation, Inc., pp. 189–192.
- Anderson, V.C. & Horn, R.C., 1967. *Tensor Arm Manipulator Design*, American Society of Mechanical Engineers (ASME).
- Anon, 2021. Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie (ISO/ASTM 52900:2021); Deutsche Fassung EN ISO/ASTM 52900:2021 Additive. *Deutsches Institut für Normung e. V.*
- Bendsøe, M.P. & Sigmund, O., 2004. *Topology Optimization*,
- Brecht, S. V., Stock, M., Stolzenburg, J.-U. & Lueth, T.C., 2019. 3D Printed Single Incision Laparoscopic Manipulator System Adapted to the Required Forces in Laparoscopic Surgery. In *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, pp. 6296–6301.
- Breuninger, J., Becker, R., Wolf, A., Rommel, S. & Verl, A., 2012. *Generative Fertigung mit Kunststoffen: Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern [Generative manufacturing with plastics: Conception and Design for Selective Laser Sintering]*, Springer-Verlag.
- Brockett, R.W., 1984. Robotic manipulators and the product of exponentials formula. In P. A. Fuhrmann, ed. *Mathematical Theory of Networks and Systems*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 120–129.
- Burgner-Kahrs, J., Rucker, D.C. & Choset, H., 2015. Continuum Robots for Medical Applications: A Survey. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(6), pp.1261–1280.
- Chirikjian, G.S., 1992. *Theory and Applications of Hyper-Redundant Robotic Manipulators*. California Institute of Technology.
- Coemert, S., Roth, R., Strauss, G., Schmitz, P.M. & Lueth, T.C., 2020. A handheld flexible manipulator system for frontal sinus surgery. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 15(9), pp.1549–1559.

- Corke, P., 2017. *Robotics, Vision and Control*, Cham: Springer International Publishing.
- Coros, S., Thomaszewski, B., Noris, G., Sueda, S., Forberg, M., Sumner, R.W., Matusik, W. & Bickel, B., 2013. Computational design of mechanical characters. *ACM Transactions on Graphics*, 32(4).
- Craig, J.J., 2005. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*,
- Cuellar, J.S., Smit, G., Plettenburg, D. & Zadpoor, A., 2018. Additive manufacturing of non-assembly mechanisms. *Additive Manufacturing*, 21, pp.150–158.
- Denavit, J. & Hartenberg, R.S., 1955. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices.
- Desai, R., Safonova, M., Muelling, K. & Coros, S., 2018. Automatic design of task-specific robotic arms. *arXiv*, pp.2–5.
- Digumarti, K.M., Gehring, C., Coros, S., Hwangbo, J. & Siegwart, R., 2014. CONCURRENT OPTIMIZATION OF MECHANICAL DESIGN AND LOCOMOTION CONTROL OF A LEGGED ROBOT. In *Mobile Service Robotics*. WORLD SCIENTIFIC, pp. 315–323.
- Dudenredaktion, Mechanismus. <https://www.duden.de/node/94947/revision/1328286> [abgerufen am 03.01.2023].
- Dupont, P.E., Lock, J., Itkowitz, B. & Butler, E., 2010. Design and control of concentric-tube robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 26(2), pp.209–225.
- Eigner, M., Roubanov, D. & Zafirov, R., 2014. *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung* M. Eigner, D. Roubanov, & R. Zafirov, eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Eytelwein, J.A., 1801. *Handbuch der Mechanik fester Körper und der Hydraulik: mit vorzüglicher Rücksicht auf ihre Anwendung in der Architektur aufgesetzt*, Berlin: Fleischer.
- Fabri, A. & Pion, S., 2009. CGAL - The Computational Geometry Algorithms Library. In *Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems - GIS '09*. New York, New York, USA: ACM Press, p. 538.
- Farin, G., Hoschek, J. & Kim, M.-S., 2002. *Handbook of computer aided geometric design*, Elsevier.
- Federhofer, K., 1932. *Graphische Kinematik und Kinetostatik [Graphic kinematics and kinetostatics]*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Feng, F., Hong, W. & Xie, L., 2020. Design of 3D-Printed Flexible Joints With Presetable Stiffness for Surgical Robots. *IEEE Access*, 8, pp.79573–79585.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. & Khorasani, M., 2021. *Additive Manufacturing Technologies*, Cham: Springer International Publishing.

- Gilbert, H.B., Rucker, D.C. & Webster III, R.J., 2016. Concentric Tube Robots: The State of the Art and Future Directions. In *Springer Tracts in Advanced Robotics*. pp. 253–269.
- Groenewegen, M.W.M., Aguirre, M.E. & Herder, J.L., 2015. Design of a Partially Compliant, Three-Phalanx Underactuated Prosthetic Finger. In *Volume 5A: 39th Mechanisms and Robotics Conference*. American Society of Mechanical Engineers, pp. 1–7.
- Grzesiak, A., Becker, R. & Verl, A., 2011. The Bionic Handling Assistant: A success story of additive manufacturing. *Assembly Automation*, 31(4), pp.329–333.
- Gul, J.Z., Sajid, M., Rehman, M.M., Siddiqui, G.U., Shah, I., Kim, K.-H., Lee, J.-W. & Choi, K.H., 2018. 3D printing for soft robotics – a review. *Science and Technology of Advanced Materials*, 19(1), pp.243–262.
- Ha, S., Coros, S., Alspach, A., Bern, J.M., Kim, J. & Yamane, K., 2018. Computational Design of Robotic Devices from High-Level Motion Specifications. *IEEE Transactions on Robotics*, 34(5), pp.1240–1251.
- Hirose, S., 1993. *Biologically inspired robots: snake-like locomotors and manipulators*, Oxford University Press.
- Howell, L.L., Magleby, S.P. & Olsen, B.M., 2013. *Handbook of compliant mechanisms*, John Wiley & Sons.
- Howell, L.L. & Midha, A., 1994. A Method for the Design of Compliant Mechanisms With Small-Length Flexural Pivots. *Journal of Mechanical Design*, 116(1), pp.280–290.
- Hu, Y., Zhang, L., Li, W. & Yang, G.-Z., 2019. Design and Fabrication of a 3-D Printed Metallic Flexible Joint for Snake-Like Surgical Robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2), pp.1557–1563.
- Jeanneau, A., Herder, J., Laliberte, T. & Gosselin, C., 2004. A Compliant Rolling Contact Joint and Its Application in a 3-DOF Planar Parallel Mechanism With Kinematic Analysis. In *Volume 2: 28th Biennial Mechanisms and Robotics Conference, Parts A and B*. ASMEDC, pp. 689–698.
- Jeong, U. & Cho, K.-J., 2015. Feedforward friction compensation of Bowden-cable transmission via loop routing. In *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, pp. 5948–5953.
- Jing, G., Tosun, T., Yim, M. & Kress-Gazit, H., 2016. An End-To-End System for Accomplishing Tasks with Modular Robots. In *Robotics: Science and Systems XII*. Robotics: Science and Systems Foundation.
- Kerle, H., Corves, B. & Hüsing, M., 2015. *Getriebetechnik [Gear Technology]*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Kiener, L., Saudan, H., Cosandier, F., Perruchoud, G., Ummel, A., Pejchal, V., Zaltron, P., Puyol, Y. & Lichtenberger, M., 2021. Compliant mechanism based on additive manufacturing. *CEAS Space Journal*, (0123456789).

- Kolachalama, S. & Lakshmanan, S., 2020. Continuum Robots for Manipulation Applications: A Survey. *Journal of Robotics*, 2020, pp.1–19.
- Krieger, Y.S., 2021. *Automatisierter Entwurf von additiv gefertigten monolithischen Manipulatorstrukturen für die minimalinvasive Chirurgie*. Technische Universität München.
- Krieger, Y.S., Kuball, C.-M., Rumschoettel, D., Dietz, C., Pfeiffer, J.H., Roppenecker, D.B. & Lueth, T.C., 2017. Fatigue strength of laser sintered flexure hinge structures for soft robotic applications. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, pp. 1230–1235.
- Krieger, Y.S., Schiele, S., Detzel, S., Dietz, C. & Lueth, T.C., 2019. Shape Memory Structures-Automated Design of Monolithic Soft Robot Structures with Pre-defined End Poses. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Montreal, Canada: IEEE, pp. 9357–9362.
- Lipson, H. & Pollack, J.B., 2000. Automatic design and manufacture of robotic lifeforms. *Nature*, 406, p.974.
- Lueth, T.C., 2015. SG-Library: Entwicklung einer konstruktiven MATLAB-Toolbox zur räumlichen Modellierung von Körpern, Gelenken und Getrieben [SG-Library: Development of a constructive MATLAB toolbox for spatial modeling of bodies, joints and gears]. In *11. Kolloquium Getriebetechnik*. pp. 183–203.
- Lusk, C., 2013. Using Pseudo-Rigid Body Models. In *Handbook of Compliant Mechanisms*. Oxford, UK: John Wiley & Sons Ltd, pp. 55–76.
- Lussenburg, K., Sakes, A. & Breedveld, P., 2021. Design of non-assembly mechanisms: A state-of-the-art review. *Additive Manufacturing*, 39(December 2020), p.101846.
- Machado, F., Malpica, N. & Borromeo, S., 2019. Parametric CAD modeling for open source scientific hardware: Comparing OpenSCAD and FreeCAD Python scripts T. Al-Ameri, ed. *PLOS ONE*, 14(12), p.e0225795.
- Mankame, N.D. & Ananthasuresh, G.K., 2002. Contact Aided Compliant Mechanisms: Concept and Preliminaries. In *Volume 5: 27th Biennial Mechanisms and Robotics Conference*. American Society of Mechanical Engineers, pp. 109–121.
- Mareczek, J., 2020. *Grundlagen der Roboter-Manipulatoren – Band 1*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Mavroidis, C., DeLaurentis, K.J., Won, J. & Alam, M., 2001. Fabrication of Non-Assembly Mechanisms and Robotic Systems Using Rapid Prototyping. *Journal of Mechanical Design*, 123(4), pp.516–524.
- Megaro, V., Zehnder, J., Bächer, M., Coros, S., Gross, M. & Thomaszewski, B., 2017. A computational design tool for compliant mechanisms. *ACM Transactions on Graphics*, 36(4), pp.1–12.

- Mirth, J.A., 2014. An Examination of Trispiral Hinges Suitable for Use in ABS-Based Rapid Prototyping of Compliant Mechanisms. In *Volume 5A: 38th Mechanisms and Robotics Conference*. American Society of Mechanical Engineers, pp. 1–7.
- Momani, S., S. Abo-Hammou, Z. & MK. Alsmad, O., 2016. Solution of Inverse Kinematics Problem using Genetic Algorithms. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 10(1), pp.225–233.
- Müglitz, J., 1991. Roboterähnliche räumliche Führungsmechanismen. *Robotersysteme*, 7, pp.231–237.
- Murray, R.M., Li, Z. & Sastry, S.S., 2017. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC Press.
- Mutlu, R., Alici, G., in het Panhuis, M. & Spinks, G.M., 2016. 3D Printed Flexure Hinges for Soft Monolithic Prosthetic Fingers. *Soft Robotics*, 3(3), pp.120–133.
- Nearchou, A.C., 1998. Solving the inverse kinematics problem of redundant robots operating in complex environments via a modified genetic algorithm. *Mechanism and Machine Theory*, 33(3), pp.273–292.
- Open Cascade S.A.S., 2022. Open CASCADE Technology OCCT.
- Paik, J., 2015. Soft Components for Soft Robots. In A. Albu-Schäffer, O. Brock, & A. Raatz, eds. *Soft Robotics*. Soft Robotics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 272–281.
- Peele, B.N., Wallin, T.J., Zhao, H. & Shepherd, R.F., 2015. 3D printing antagonistic systems of artificial muscle using projection stereolithography. *Bioinspiration & Biomimetics*, 10(5), p.055003.
- Rad, F.P., 2014. *Design and Characterization of Curved and Spherical Flexure Hinges for Planar and Spatial Compliant Mechanisms*. Università di Bologna.
- Robinson, G. & Davies, J.B.C., 1999. Continuum robots - a state of the art. In *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C)*. IEEE, pp. 2849–2854.
- Roppenecker, D., 2017. *Entwicklung und Validierung eines generativ gefertigten Snake-Like Manipulators für die minimal-invasive Chirurgie*. Technische Universität München.
- Ros-Freixedes, L., Gao, A., Liu, N., Shen, M. & Yang, G.-Z., 2019. Design optimization of a contact-aided continuum robot for endobronchial interventions based on anatomical constraints. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 14(7), pp.1137–1146.
- Rost, A. & Schädle, S., 2013. The SLS-generated soft robotic hand - An integrated approach using additive manufacturing and reinforcement learning. *Proceedings - 2013 12th International Conference on Machine Learning and Applications, ICMLA 2013*, 1, pp.215–220.

- Rus, D. & Tolley, M.T., 2015. Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*, 521(7553), pp.467–475.
- Saxena, A., 2005. Synthesis of compliant mechanisms for path generation using genetic algorithm. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 127(4), pp.745–752.
- Saxena, A. & Ananthasuresh, G.K., 2001. Topology synthesis of compliant mechanisms for nonlinear force–deflection and curved path specifications. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 123(1), pp.33–42.
- Scarcia, U., Berselli, G., Melchiorri, C., Ghinelli, M. & Palli, G., 2016. Optimal Design of 3D Printed Spiral Torsion Springs. In *Volume 2: Modeling, Simulation and Control; Bio-Inspired Smart Materials and Systems; Energy Harvesting*. American Society of Mechanical Engineers, pp. 1–9.
- Scharff, R.B.N., Doubrovski, E.L., Poelman, W.A., Jonker, P.P., Wang, C.C.L. & Geraedts, J.M.P., 2017. Towards Behavior Design of a 3D-Printed Soft Robotic Hand. In *Biosystems and Biorobotics*. pp. 23–29.
- Schiele, S., Baumgartner, S., Laudahn, S. & Lueth, T.C., 2022. Automated design of task specific additively manufacturable coupled serial chain mechanisms for tracing predefined planar trajectories. In *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Kyoto, Japan: IEEE, pp. 3047–3052.
- Schiele, S., Phalen, H., Kulozik, J., Krieger, Y.S. & Lueth, T.C., 2021. Automated design of underactuated monolithic soft robotics structures with multiple predefined end poses. In *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, pp. 6868–6874.
- Schiele, S., Rehekampff, C., Schroeffler, A., Schweigert, L. & Lueth, T.C., 2022. Automated design of FDM-printable snake-like compliant mechanisms with predefined end-effector poses. In *Proceedings of the ASME 2022 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2022)*. Columbus, OH, USA, p. 6.
- Schmitt, F., Piccin, O., Barbé, L. & Bayle, B., 2018. Soft Robots Manufacturing: A Review. *Frontiers in Robotics and AI*, 5(JUN).
- Sims, K., 1994. Evolving 3D Morphology and Behavior by Competition. *Artificial Life*, 1(4), pp.353–372.
- Sun, Y., Liu, Y., Xu, L., Zou, Y., Faragasso, A. & Lueth, T.C., 2020. Automatic Design of Compliant Surgical Forceps With Adaptive Grasping Functions. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), pp.1095–1102.
- Sung, C.R., 2016. Computational design of foldable robots via composition. , (2011).
- Thomaszewski, B., Coros, S., Gauge, D., Megaro, V., Grinspun, E. & Gross, M., 2014. Computational design of linkage-based characters. *ACM Transactions on Graphics*, 33(4), pp.1–9.

- Trivedi, D., Rahn, C.D., Kier, W.M. & Walker, I.D., 2008. Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research. *Applied Bionics and Biomechanics*, 5(3), pp.99–117.
- Tummala, Y., Wissa, A., Frecker, M. & Hubbard, J.E., 2014. Design and Optimization of a Contact-Aided Compliant Mechanism for Passive Bending. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 6(3), pp.1–9.
- da Veiga, T., Chandler, J.H., Lloyd, P., Pittiglio, G., Wilkinson, N.J., Hoshiar, A.K., Harris, R.A. & Valdastrì, P., 2020. Challenges of continuum robots in clinical context: a review. *Progress in Biomedical Engineering*, 2(3), p.032003.
- Walker, I.D., 2013. Continuous Backbone “Continuum” Robot Manipulators. *ISRN Robotics*, 2013, pp.1–19.
- Walker, I.D., Choset, H. & Chirikjian, G.S., 2016. Snake-Like and Continuum Robots. In *Springer Handbook of Robotics*. Cham: Springer International Publishing, pp. 481–498.
- Wallin, T.J., Pikul, J. & Shepherd, R.F., 2018. 3D printing of soft robotic systems. *Nature Reviews Materials*, 3(6), pp.84–100.
- Webster, R.J. & Jones, B.A., 2010. Design and Kinematic Modeling of Constant Curvature Continuum Robots: A Review. *The International Journal of Robotics Research*, 29(13), pp.1661–1683.
- Wegner, A. & Witt, G., 2012. Konstruktionsregeln für das Laser-Sintern [Design rules for laser sintering]. *Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics Technology*, 8(3), pp.253–277.
- Wegner, A. & Witt, G., 2013. Ursachen für eine mangelnde Reproduzierbarkeit beim Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen [Causes of poor reproducibility in laser sintering of plastic parts]. *RTEjournal - Forum für Rapid Technologie*, (1).
- Wohlers, T.T., Campbell, I., Diegel, O., Huff, R. & Kowen, J., 2020. *Wohlers Report 2020*, Fort Collins, Colorado: Wohlers Associates, Inc.
- Yang, G. & Chen, I.-M., 2022. *Modular Robots: Theory and Practice*, Singapore: Springer Singapore.
- Yap, H.K., Ng, H.Y. & Yeow, C.-H., 2016. High-Force Soft Printable Pneumatics for Soft Robotic Applications. *Soft Robotics*, 3(3), pp.144–158.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol: Thermoplastischer Kunststoff
API	<i>Application Programming Interface</i> : Programmierschnittstelle
B-Rep	<i>Boundary Representation</i> : Repräsentation eines Volumens als Oberflächenmodell
CPL	<i>Closed Polybool List</i> : Datentyp der SG-Library, 2D Punkteliste zur Beschreibung von geschlossenen Konturen
CSG	<i>Constructive Solid Geometry</i> : Repräsentation eines Volumens mit Hilfe von Volumenprimitiven
DOF	<i>Degree Of Freedom</i> : Freiheitsgrad
EE/ee	Endeffektor
EL	<i>Edge List</i> : Datentyp der SG-Library, Bezeichnung der Liste der Kanten zur Beschreibung einer Kontur
EM	elektromagnetisch
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> : Schmelzschichtverfahren, filamentbasiertes additives Fertigungsverfahren
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i> : andere Bezeichnung für FDM, s. FDM
FG	<i>Flexible Geometry</i> : hier vorgestellter Datentyp zur Beschreibung der monolithischen Festkörpergelenkstrukturen mit der SG-Library
FKG	Festkörpergelenk
FL	<i>Facet List</i> : Datentyp der SG-Library, Bezeichnung der Liste der Dreiecke zur Beschreibung eines Oberflächenmodells
GUI	<i>Graphical User Interface</i> : Grapische Benutzeroberfläche
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i> : Name der Mathematiksoftware von Mathworks
MCAD	<i>Mechanical Computer Aided Design</i> : Computerunterstützte Mechanikkonstruktion
MiMed	(Lehrstuhl für) Mikrotechnik und Medizingerätetechnik
PL	<i>Point List</i> : Datentyp der SG-Library, 2D Punkteliste zur Beschreibung von Konturen
PLA	Poly lactide/Polymilchsäuren: Gruppe von thermoplastischen Kunststoffen (Polyester)
SG	<i>Solid Geometry</i> : Datentyp der SG-Library zur Beschreibung von Oberflächenmodellen
SMA	<i>Shape Memory Alloys</i> : Formgedächtnislegierungen

SLA	Stereolithografie: photopolymerbasiertes additives Fertigungsverfahren
SLS	Selektives Lasersintern: pulverbasiertes additives Fertigungsverfahren
STL	<i>Standard Tessellation Language</i> (ursprünglich <i>stereolithography</i>): Dateiformat für Oberflächenmodelle
VL	<i>Vertex List</i> : Datentyp der SG-Library, 3D-Punktliste zur Beschreibung von Oberflächenmodellen

Notation und Symbolverzeichnis

Allgemein

- x Normal: Skalarer Wert mit $x \in \mathbb{R}$
- \mathbf{x} Fett geschrieben: Vektorieller Wert mit $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ mit $n > 1$
- \mathbf{X} Großbuchstabe und fett geschrieben: Matrix mit $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ mit $n, m > 1$. Hier ausgenommen sind Kraftvektoren \mathbf{F} und Momentenvektoren \mathbf{M} , die hier auf Grund ihrer üblichen Nomenklatur mit Großbuchstaben bezeichnet werden.
- $\|\mathbf{x}\|$ Euklidische Norm von \mathbf{x} , Betrag des Vektors \mathbf{x}

Rotationen und Translationen

- ${}^b \mathbf{t}_p$ Vektor vom Ursprung des Koordinatensystems b zu Punkt p ($\mathbf{t} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$)
- ${}^b \mathbf{R}_f$ Rotationsmatrix, die einen Vektor aus dem Koordinatensystem f im Koordinatensystem b darstellt ($\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$)
- ${}^b \mathbf{T}_f$ Homogene Transformationsmatrix, die die Transformation aus dem Koordinatensystem f ins Koordinatensystem b darstellt ($\mathbf{T} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$)

Spezifisch

SI-Einheit:

- \square_s Variablen bezogen auf Segmente (s für *segment*)
- \square_c Variablen bezogen auf die Zwischenelemente (c für *connector element*)
- \square_f Variablen bezogen auf die Festkörpergelenke (f für *flexure joint*)
- \square_w Variablen bezogen auf die Seilzüge und Seilzugführungen (w für *wire*)
- \square' Variablen bezogen auf die zweite Anschlagstellung der Struktur
- \square'' Variablen bezogen auf die dritte Anschlagstellung der Struktur, usw.
- r_c Radius der Zwischenelemente mm
- \mathbf{P}_c Geschlossene 2D Punktliste (CPL) zur Beschreibung des Querschnitts der Strukturen ($\mathbf{P}_c \in \mathbb{R}^{n \times 2}$) mm
- n_c Anzahl der Zwischenelemente –
- h_c Höhe eines Zwischenelements mm
- α_c Maximaler Auslenkwinkel eines Festkörpergelenks rad
- φ_c Verdrehung eines Zwischenelements zu seinem vorherigen Nachbarlement rad
- φ_{max} Maximal erlaubte Verdrehung eines Zwischenelements rad
- r_f Abstand des Festkörpergelenks zur Mitte des zugehörigen Zwischenelements mm

h_f	Höhe des Festkörpergelenks	<i>mm</i>
d_f	Dicke des Festkörpergelenks an der dünnsten Stelle	<i>mm</i>
b_f	Breite der drehgelenkartigen Festkörpergelenke	<i>mm</i>
n_w	Anzahl der Seilzüge	–
r_w	Abstand des Lochs der Seilzugführung zur Mitte des zugehörigen Zwischenelements	<i>mm</i>
d_w	Durchmesser des Lochs der Seilzugführung zur Mitte des zugehörigen Zwischenelements	<i>mm</i>
$s_{w,min}$	Minimale Steigung der Seilzugführung innerhalb eines Elements	–
i	Index für die Elemente der Strukturen	–
$\mathbf{\Gamma}$	Vektor zur allgemeinen Beschreibung der momentanen Drehachse und des Auslenkwinkels des unteren Festkörpergelenks eines Elements ($\mathbf{\Gamma} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$)	<i>rad</i>
γ	Betrag des momentanen Auslenkwinkels des unteren Festkörpergelenks eines Elements	<i>rad</i>
\mathbf{e}	Momentane Drehachse des unteren Festkörpergelenks eines Elements ($\mathbf{e} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$)	–
n_s	Anzahl der Kreissegmente	–
r_s	Radius eines Kreissegments	<i>mm</i>
θ_s	Aufspannwinkel eines Kreissegments	<i>rad</i>
l_s	Bogenlänge eines Kreissegments	<i>rad</i>
φ_s	Verdrehung eines Kreissegments zu seinem vorherigen Nachbarsegment	<i>rad</i>
j	Index für die Segmente der Strukturen	–
B_i	Bezeichnung des Basiskoordinatensystems des Elements i	–
F_i	Bezeichnung des Folgekoordinatensystems des Elements i	–
n_{ee}	Anzahl der Zielposen des Endeffektors (ee)	–
\mathbf{T}_{ee}	Homogene Transformationsmatrix einer Pose des Endeffektors dargestellt im Weltkoordinatensystem w ($\mathbf{T}_{ee} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$)	–
\mathbf{w}	Relative Gewichtung der Positions- und Orientierungsfehler bei der numerischen Suche nach Gelenkwinkeln der Ersatzkinematik ($\mathbf{w} \in \mathbb{R}^{1 \times 6}$)	–
N	Anzahl der erstellten Ersatzkinematiken im Optimierungsprozess	–
C	Kosten der Ersatzkinematiken im Optimierungsprozess	–
k_p	Gewichtungsfaktor der Kosten der Positionsfehler des Endeffektors bei der Suche nach geeigneten Ersatzkinematiken im Optimierungsprozess	–
k_o	Gewichtungsfaktor der Kosten der Orientierungsfehler des Endeffektors bei der Suche nach geeigneten Ersatzkinematiken im Optimierungsprozess	–
k_l	Gewichtungsfaktor der Kosten für die Roboterlänge bei der Suche nach geeigneten Ersatzkinematiken im Optimierungsprozess	–

s_{n_s}	Standardabweichung der Zustandsvariable n_s im Optimierungsprozess	–
s_{r_s}	Standardabweichung der Zustandsvariablen $r_{s,j}$ im Optimierungsprozess	mm
s_{θ_s}	Standardabweichung der Zustandsvariablen $\theta_{s,j}$ im Optimierungsprozess	rad
k_{keep}	Anteil der Ersatzkinematiken aus der vorherigen Iteration die im Optimierungsprozess behalten werden	–
k_{mut}	Anteil der Ersatzkinematiken aus der vorherigen Iteration die „mutieren“	–
k_{new}	Anteil der Ersatzkinematiken die in jeder Iteration neu gesamplet werden	–
\mathbf{M}_\square	Drehmomentenvektor ($\mathbf{M}_\square \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$)	Nm
\mathbf{F}_\square	Kraftvektor ($\mathbf{F}_\square \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$)	N
\mathbf{r}_\square	Positionsvektor ($\mathbf{r}_\square \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$)	mm
\mathbf{C}_s	Steifigkeitsmatrix eines Festkörpergelenks ($\mathbf{C}_s \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$)	$\frac{N \text{ mm}}{rad}$
c_{kl}	Eintrag der Steifigkeitsmatrix eines Festkörpergelenks an der Stelle $k, l \in x, y, z$	$\frac{N \text{ mm}}{rad}$
I_{kl}	Flächenträgheitsmoment 2. Ordnung mit $k, l \in x, y, z$	mm^4
E	E-Modul	$\frac{N}{mm^2}$
G	Schubmodul	$\frac{N}{mm^2}$
ν	Querkontraktionszahl	–
m_c	Masse eines Elements	kg
μ_s	Haftreibungskoeffizient zwischen Seilzug und Struktur	–
μ_k	Gleitreibungskoeffizient zwischen Seilzug und Struktur	–
β	Umlenkwinkel des Seilzugs	rad
\bar{x}	empirischer Mittelwert der Messwerte x	–
s	Standardabweichung der Stichprobe	–
d_c	Kleinster Abstand der Kontaktstruktur eines Elements zu dem Festkörpergelenk	–
\mathbf{e}_p	Vektor des Positionsfehlers ($\mathbf{e}_p \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$)	mm
e_p	Absoluter Positionsfehler	mm
\mathbf{e}_o	Vektor des Orientierungsfehlers ($\mathbf{e}_o \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$)	◦
e_o	Absoluter Orientierungsfehler	◦
e_{am}	Maximaler Fehler des additiven Fertigungsverfahrens in der Druckebene	mm

Entstandene Publikationen

- Schiele, S., Rehekampff, C., Schroeffler, A., Schweigert, L. & Lueth, T.C., 2022. Automated design of FDM-printable snake-like compliant mechanisms with predefined end-effector poses. In *Proceedings of the ASME 2022 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2022)*. Columbus, OH, USA, p. 6.
- Schiele, S., Baumgartner, S., Laudahn, S. & Lueth, T.C., 2022. Automated design of task specific additively manufacturable coupled serial chain mechanisms for tracing predefined planar trajectories. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2022)*. Kyoto, Japan, p. 7.
- Nominiert für *IROS Best Paper Award on Robot Mechanisms and Design*
- Schiele, S., Nguyen, T.N. & Lueth, T.C., 2021. Evaluating clearance parameters of 3D printed joints for the automated design of a non-assembly delta robot. In *2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. IEEE, pp. 583–588.
- Schiele, S., Phalen, H., Kulozik, J., Krieger, Y.S. & Lueth, T.C., 2021. Automated design of underactuated monolithic soft robotics structures with multiple predefined end poses. In *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, pp. 6868–6874.
- Krieger, Y.S., Schiele, S., Detzel, S., Dietz, C. & Lueth, T.C., 2019. Shape Memory Structures-Automated Design of Monolithic Soft Robot Structures with Pre-defined End Poses. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Montreal, Canada: IEEE, pp. 9357–9362.

Beteiligte Personen und entstandene Studienarbeiten

Diese Arbeit entstand in reger Zusammenarbeit mit verschiedenen Kollegen und Studierenden, ohne deren Unterstützung die Umsetzung nicht möglich gewesen wäre. Die Arbeit baut auf dem Thema meiner Masterarbeit „Automatisierter Entwurf monolithischer Softrobotik Strukturen mit definierten Endposen“ (2018) am Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik unter der Betreuung von **Dr.-Ing. Yannick Krieger** auf. Von ihm stammt die ursprüngliche Idee der „*Shape Memory Structures*“.

Besonders möchte ich die Zusammenarbeit mit **Henry Phalen** (Department of Mechanical Engineering, Johns Hopkins University, USA) hervorheben, der maßgeblich an der Idee und der Implementierung der konzentrischen Strukturen in Kapitel 5.3.1 und der Inhalte in Kapitel 6.2.3 beteiligt war. Die Zusammenarbeit hat während seines Gastaufenthalts am MiMed im Sommer 2019 begonnen und bis zur Abgabe dieser Arbeit andauert.

Während der Zeit am MiMed durfte ich verschiedene studentische Arbeiten betreuen, die zu der Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben. Im Folgenden sind die jeweiligen Arbeiten und deren Beitrag zu den jeweiligen Kapiteln chronologisch aufgeführt:

- **Julian Kulozik**, Bachelorarbeit, „Automatisierte Konstruktion additiv gefertigter Festkörpergelenkstrukturen mit mehreren vordefinierten Endkonfigurationen (2020). Die Ergebnisse dieser Arbeit sind in den Kapiteln 5.3.3, 5.3.4, 6.2.1, 6.2.2 und 9 eingegangen. Abb. 41 und Abb. 42 basieren auf Abbildungen aus dieser Arbeit.
- **Sebastian Baumgartner**, Masterarbeit, „Automatisierter Entwurf von additiv fertigmachen, minimal aktuierten Manipulatoren für das Abfahren vorgegebener Trajektorien“, 2021. Die Ergebnisse dieser Arbeit haben maßgeblich zu den Kapiteln 6.1.1, 8.1, 8.2, 12.2 und 14.1 beigetragen. Abb. 27 bis Abb. 29, Abb. 34, Abb. 37, Abb. 38, Abb. 54 bis Abb. 56, Abb. 60 und Abb. 61 basieren auf Abbildungen aus dieser Arbeit.
- **Laurin Schweigert**, Bachelorarbeit, „Design und Konstruktion eines unteraktuierten Roboter-Arms als FDM-gefertigte Formgedächtnis-Festkörpergelenkstruktur mit mehreren vordefinierten Endposen“, 2022. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind in den Kapiteln 5.3.1 und 10 eingegangen. Abb. 16, Abb. 43 bis Abb. 47 basieren auf Abbildungen aus dieser Arbeit.

- **Maude Furmann**, Masterarbeit, „Entwurf mobiler Roboter basierend auf unteraktuierten Festkörpergelenkstrukturen“, 2022. Kapitel 11.1 basiert auf den Ergebnissen dieser Arbeit. Abb. 48 bis Abb. 51 basieren auf Abbildungen aus dieser Arbeit.
- **Isabella Ostner**, Semesterarbeit, „Automatisierte Konstruktion additiv gefertigter Festkörpergelenk-Mechanismen zur Annäherung an vorgebbare Bahnkurven“, 2022. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind in die Kapitel 8.1, 8.2 und 12.3 eingegangen. Abb. 36, Abb. 39, Abb. 40, Abb. 57 und Abb. 58 basieren auf Abbildungen aus dieser Arbeit.
- **Daniel Seikowsky**, Semesterarbeit, „Entwicklung eines Pick-and-Place-Systems basierend auf additiv gefertigten Festkörpergelenkstrukturen“, 2022. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind in Kapitel 11.2 eingegangen. Abb. 52 basiert auf Abbildungen aus dieser Arbeit.
- **Laurin Schweigert**, Semesterarbeit, „Automatisierter Entwurf von Faltstrukturen für definierte Endeffektorposen“, 2023. Das Konzept dieser Arbeit wird in Kapitel 14.1 zusammengefasst. Abb. 59 basiert auf Abbildungen aus dieser Arbeit.

Anhang

A MATLAB Software

A.1 Eingabeparameter

Für die Erstellung der Formgedächtnisstrukturen müssen in dem Hauptskript in MATLAB eine Reihe an strukturspezifischen, herstellungsspezifischen und algorithmusspezifischen Parameter definiert werden. Diese sind in den folgenden Tabellen mit ihrer Bezeichnung, einer Beschreibung und dem äquivalenten Symbol in dieser Arbeit aufgeführt:

Name im Code	Beschreibung	Symbol im Text
name	Es wird ein Name für die Struktur festgelegt.	-
T_goals	Hier werden die n_{ee} gewünschten Endeffektorendposen der Struktur definiert und als homogene Transformationsmatrizen gespeichert. In MATLAB wird das als $4 \times 4 \times n_{ee}$ Matrix gespeichert.	T_{ee}
md_type	Variable zur Auswahl des mechanischen Konzepts der Struktur, wie in Kapitel 5.3 beschrieben.	-
ce_r	Dieser skalare Wert entspricht dem Zylinderradius, der zur Berechnung der Basisstruktur verwendet wird.	r_c
CPLce	Mit dieser Variable kann der Querschnitt der Strukturen definiert werden. Wird Sie nicht gesetzt, wird als Querschnitt ein Kreis mit dem Radius r_c verwendet.	P_c
wh_d	Definiert die Durchmesser der Seilzugführungen. Bei n Seilzugführungen werden die Werte als $n \times 1$ Vektor gespeichert.	d_w
wh_p	Definiert die xy-Position der Seilzugführungen im Koordinatensystem der Querschnitts CPL. Der Betrag dieser Positionen entspricht r_w . Die Positionen von n Seilzügen werden als $n \times 2$ Matrix gespeichert.	p_w

ce_opt	Mit dieser Variable wird festgelegt welche Kontaktstrukturen zwischen den Elementen verwendet werden. Diese werden ausführlicher in Kapitel 5.3.3 beschrieben. Zur Auswahl stehen:		-
'basic'	Es werden keine Kontaktstrukturen eingefügt, die Elemente berühren sich bei Kontakt nur in einem Punkt. Diese Option macht nur bei kreisförmigen CPLs Sinn, da sich sonst keine definierten Berührungspunkte/-linien/-flächen ergeben.	-	
'surslopes'	Abgeschrägter Kontaktbereich wie in Abb. 21.	-	
'freelock'	Abgeschrägter Kontaktbereich mit sinusförmiger Verzahnung wie in Abb. 22.	-	
fj_opt	Hier werden die Optionen zur Erstellung der Festkörpergelenke festgelegt. Die Einstellungen werden als <i>name-value pair</i> in einem <i>cell array</i> definiert:		-
'FlexJointType'	Beschreibt welcher Festkörpergelenktyp verwendet wird durch eine der folgenden Optionen.	-	
'circ'	Kugelgelenkartiges Kerbgelenk	-	
'rect'	Drehgelenkartiges Kerbgelenk	-	
'rect_gap'	Zwei versetzte Kerbgelenke mit der gleichen Rotationsachse	-	
'none'	Damit wird kein Festkörpergelenk integriert. Diese Option kann für	-	

		nachträglich eingesetzte Gelenke verwendet werden.	
'FlexJointDim'	Beschreibt die initialen Dimensionen der Festkörpergelenke. Diese werden als 1×2 Vektor gesetzt, wobei der erste Wert die dünnste Stelle und der zweite Werte die Breite in Richtung der Rotationsachse beschreibt.		$[d_f \quad b_f]$
'FlexJointDx'	Abstand des Festkörpergelenks zum Koordinatenursprung von CPLce.		r_f
'FilletType'	Bestimmt den Verrundungstyp der Kerbgelenke durch eine der folgenden Optionen.		-
	'radius'	Kreisförmige Verrundung (Kreiskerbgelenk)	-
	'tan'	Tangentiale Verrundung nach der Zugdreieck Methode von Mattheck	-
'FilletMax'	Maximale Radius der Verrundung in mm.		-
'AddStruct'	Wird der maximale Verrundungsradius erreicht, wird mit dieser Einstellung festgelegt, an welcher Stelle das Festkörpergelenk verlängert wird. Eine der folgenden Optionen wird ausgewählt.		-
	'base'	Das Gelenk wird auf eine höhere Basis gestellt, um immer noch Festkörpergelenk mit definierten Verrundungen zu erhalten.	-

		'mid'	Die dünnste Stelle des Gelenks wird verlängert.	-
h_min	Die minimale Dicke der Zwischenelemente wird hiermit begrenzt. Bei einer gegebenen Raumkurve wirkt sich dieser Wert bei der Erstellung der Basisstruktur auf die Anzahl der Elemente einer Struktur aus.			-
angle_max	Begrenzt den maximalen Auslenkwinkel der Festkörpergelenke. Da der maximale Auslenkwinkel der Festkörpergelenke von Größe, Typ und Fertigungsart abhängt, wird bei einem Überschreiten dieses Werts eine Warnung ausgegeben, das Programm aber trotzdem ausgeführt.			-
part_length_max	Begrenzt die Maximallänge der Formgedächtnisstrukturen. Dieser Wert hängt vom eingesetzten 3D-Drucker ab.			-
prw_w	Nur für den SLS-Druck: Gibt die Breite der Löcher für die Pulverentfernung an.			-

Neben den strukturspezifischen Parametern gibt es herstellungsspezifische Einstellungen, die festgelegt werden müssen:

gap_min	Dieser Wert definiert die minimale Spaltbreite, die innerhalb der Strukturen eingehalten werden muss. Durch die begrenzte Auflösung und Genauigkeit der Druckverfahren, darf eine bestimmte Spaltbreite nicht unterschritten werden. Bei dem Unterschreiten dieser Spaltbreite können die Teile verkleben oder es lässt sich im Falle des SLS-Verfahrens das Pulver nicht mehr entfernen.		-
thickness_min	Analog zu gap_min wird hier die im jeweiligen Druckverfahren minimale Wandstärke festgelegt. Dies bezieht sich im Gegensatz zu h_min nicht nur auf die Elementhöhe, sondern auf alle Geometrien der Struktur.		$d_{th,min}$

Für den Optimierungsalgorithmus aus Kapitel 6.2.3 müssen die folgenden Werte gesetzt werden:

num_FGs	Anzahl der Ersatzkinematiken, die pro Iteration bewertet werden.	N
max_iter	Maximale Anzahl an Iterationen des Optimierungsprozesses.	-

Innerhalb der Funktion des Optimierungsalgorithmus aus Kapitel 6.2.3 können die folgenden Einstellungen getroffen werden:

k_pos	Skalarer Gewichtungsfaktor der Kosten der Positionsfehler des Endeffektors	k_p
k_ang	Skalarer Gewichtungsfaktor der Kosten der Orientierungsfehler des Endeffektors	k_o
k_len	Skalarer Gewichtungsfaktor der Kosten für die Länge der Ersatzkinematik	k_l
sig_num_arcs	Standardabweichung der Zustandsvariable n_s	σ_{n_s}
sig_r	Standardabweichung der Zustandsvariablen $r_{s,j}$	σ_{r_s}
sig_th	Standardabweichung der Zustandsvariablen $\theta_{s,j}$	σ_{θ_s}
keep_frac	Anteil der Ersatzkinematiken aus der vorherigen Iteration die behalten werden (Ersatzkinematiken aus der vorherigen Iteration mit den niedrigsten Kosten). In der ersten Iteration ist $k_{keep} = 0$.	k_{keep}
new_frac	Anteil der Ersatzkinematiken die in jeder Iteration neu gesamplet werden. In der ersten Iteration ist $k_{new} = 1$.	k_{new}

A.2 Die wichtigsten Funktionen

Es wird ein Hauptskript aufgesetzt, um die Eingabeparameter der Strukturen zu definieren. In diesem Skript müssen die folgenden Funktionen in dieser Reihenfolge aufgerufen werden. Für weitere Informationen und Beispiele siehe Dokumentation des Codes:

<code>settingCompatibilitySMS</code>	Überprüft die Einstellungen auf Kompatibilität.
<code>arcStructFromGoals</code>	Optimierungsprozess, sucht nach einer passenden Ersatzkinematik.
<code>generateSMS</code>	Erstellt das Oberflächenmodell einer Formgedächtnisstruktur.
<code>runSMSSimulation</code>	Simulation der Formgedächtnisstruktur
<code>adjustPath</code>	Nähert den Endeffektorpfad der Struktur an einen vorgegebenen Pfad an.
<code>saveSTLfromSMS</code>	Exportiert die Struktur als STL-Datei für das additive Fertigungsverfahren.

Wird nicht das Optimierungsverfahren aus Kapitel 6.2.3 eingesetzt, sondern basierend auf einer bestehenden Struktur weitere Endeffektorendposen gesucht, wird statt `arcStructFromGoals` auf die folgenden Funktionen zurückgegriffen:

<code>fitCylinderstoCurvesSMS</code>	Fittet Zylinder an die vorgegebene Raumkurve.
<code>structureToGoal</code>	Versucht mit Hilfe eines bestehenden Modells einer Formgedächtnisstruktur weitere Endeffektorendposen zu erreichen.

A.3 Aufbau der FG-Struktur

Die entworfenen Formgedächtnisstrukturen werden in einem *structure array* gespeichert. Als Fortführung der SG-Datenstruktur in der SG-Library werden die beweglichen Strukturen als FG (*flexible geometry*) gespeichert. Ein FG-Datentyp setzt sich dabei aus den folgenden Felder zusammen:

SGtot	Zusammengesetzte Formgedächtnisstruktur, welche als STL exportiert werden kann.	-
SGel	Hier werden die einzelnen Elemente mit ihrem Basiskoordinatensystem im Koordinatenursprung in einem <i>cell array</i> gespeichert. Die einzelnen Elemente können somit in MATLAB verkettet und z.B. zur Visualisierung verwendet werden.	-
CEr	Radius der Zwischenelemente, entspricht ce_r .	r_c
CEh	Vektor ($n \times 1$) der Höhe der n Elemente	\mathbf{h}_c
FJalpha	Vektor ($n \times 1$) der Auslenkwinkel zwischen den Elementen. Eintrag i entspricht dem Auslenkwinkel zwischen Element i und Element $i - 1$.	$[\alpha_c \quad \alpha_c' \quad \dots]$
FJdim	Vektor ($n \times 2$) der Festkörpergelenkdimensionen. Eintrag $i, :$ entspricht den Dimensionen des Festkörpergelenks zwischen Element i und Element $i - 1$. Der erste Wert jeder Zeile beschreibt die dünnste Stelle des Gelenks und der zweite Werte die Breite in Richtung der Rotationsachse.	$[\mathbf{d}_f \quad \mathbf{b}_f]$
FJr	Vektor ($n \times 1$) der Radien der Festkörpergelenke	$\frac{1}{2}\mathbf{h}_f$
FJphi	Vektor ($n \times m$) der Verdrehwinkel der Elemente	$[\varphi_c \quad \varphi_c' \quad \dots]$
FJdx	Vektor ($n \times 1$) der Abstände der Festkörpergelenke zu der Mittelachse der Struktur	\mathbf{r}_f

W _{Hd}	Durchmesser der Seilzugführungen	$\begin{bmatrix} d_w \\ d_w' \\ \vdots \end{bmatrix}$
W _{Hp}	xy-Positionen der Seilzugführungen am ersten Element	$\begin{bmatrix} p_w \\ p_w' \\ \vdots \end{bmatrix}$

B Werte der Versuchsergebnisse

B.1 Experiment 1 - Bestimmung der Genauigkeit der Endeffektorendposen

Tabelle 3 – Versuchsergebnisse Experiment 1

		Tracker 1 (Mitte)								Tracker 2 (Spitze)							
		Positionsfehler e_p [mm]				Orientierungsfehler e_o in z [°]				Positionsfehler e_p [mm]				Orientierungsfehler e_o in z [°]			
		e_{min}	e_{max}	\bar{x}_e	s	e_{min}	e_{max}	\bar{x}_e	s	e_{min}	e_{max}	\bar{x}_e	s	e_{min}	e_{max}	\bar{x}_e	s
Testkörper 1	Pose 1	3,7	4,0	3,9	0,2	8,6	10,3	9,2	0,8	16,7	17,7	17,3	0,5	15,5	21,2	18,8	2,4
Testkörper 1	Pose 2	3,4	4,3	3,9	0,4	10,9	13,8	12,5	1,1	18,9	22,9	21,5	1,6	24,1	26,9	25,8	1,1
Testkörper 2	Pose 1	0,8	1,1	0,9	0,1	0,6	9,7	3,8	3,5	3,2	4,1	3,7	0,4	1,1	17,2	5,7	6,7
Testkörper 2	Pose 2	2,1	2,6	2,3	0,2	4,0	5,2	4,6	0,6	2,1	3,0	2,5	0,5	8,0	13,8	10,7	2,1

B.2 Experiment 2 - Validierung des quasistatischen Modells

Tabelle 4 – Versuchsergebnisse Experiment 2

Test- körper	d_f [mm]	b_f [mm]		Werte der Aufwärtsbewegung				Werte der Abwärtsbewegung			
		Gelenk Nr. 1 bis 22	Gelenk Nr. 23 bis 39	e_{min} [mm]	e_{max} [mm]	\bar{x}_e [mm]	s [mm]	e_{min} [mm]	e_{max} [mm]	\bar{x}_e [mm]	s [mm]
08x3070	0,8	3,0	7,0	5,6	26,8	12,5	5,3	5,8	54,5	25,5	13,9
08x7030	0,8	7,0	3,0	2,8	19,9	10,4	3,8	2,4	20,1	11,9	4,7
10x2070	1,0	2,0	7,0	2,9	12,3	8,2	2,4	3,8	47,9	21,4	12,7
10x7020	1,0	7,0	2,0	2,3	23,0	15,9	5,5	3,1	27,1	12,1	6,8
12x1040	1,2	1,0	4,0	0,3	16,9	8,5	4,6	1,1	45,2	23,5	12,3
12x4010	1,2	4,0	1,0	5,6	21,8	13,4	4,4	3,0	21,4	6,3	1,6
12x1060	1,2	1,0	6,0	1,0	15,3	6,2	3,4	0,8	43,8	18,9	13,4
12x6010	1,2	6,0	1,0	5,7	17,7	12,3	3,5	3,4	37,8	15,4	12,1
Alle				0,3	26,8	10,9	5,2	0,8	54,5	16,8	12,3

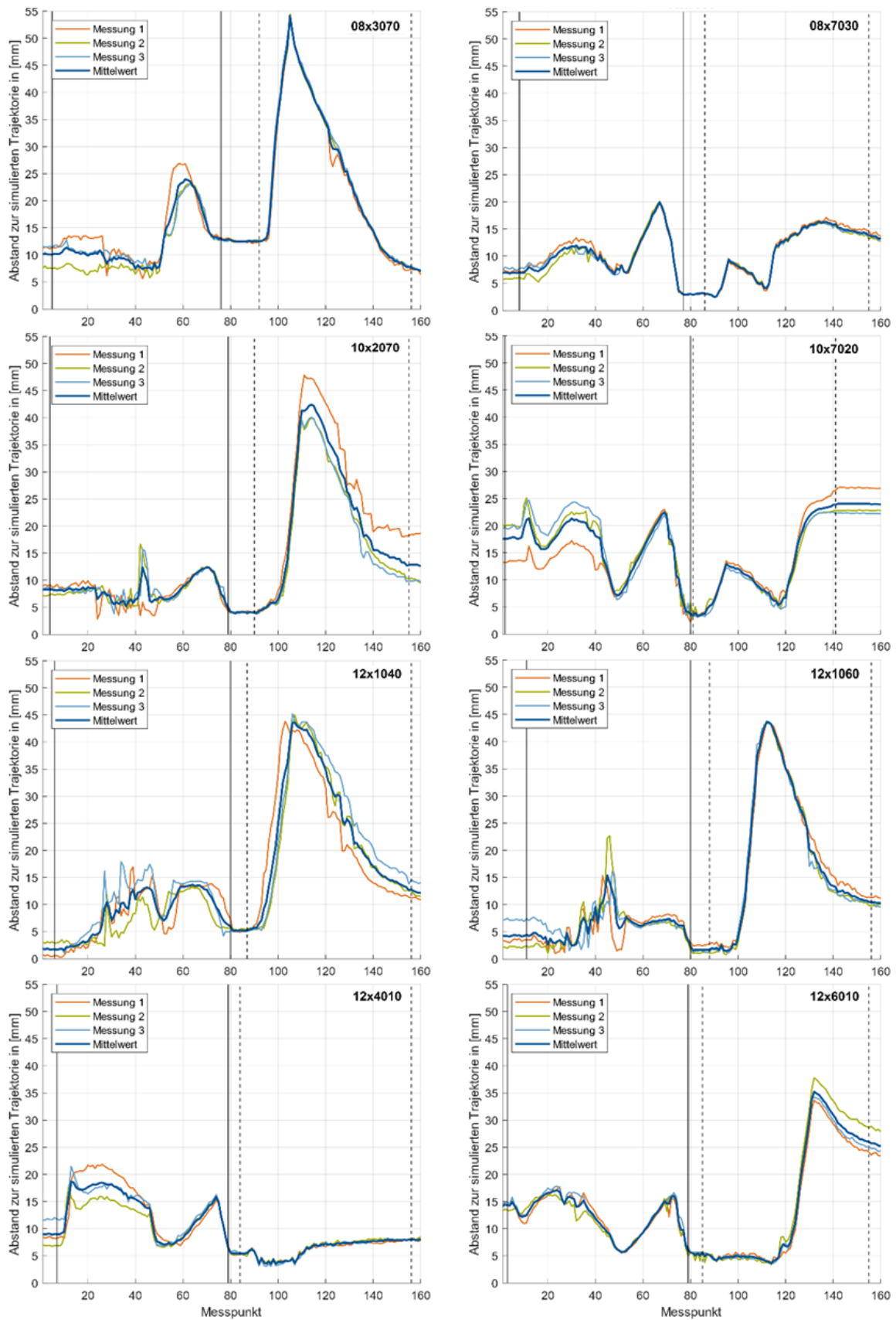


Abb. 61: Versuchsergebnisse des Experiment 2 – Validierung des quasistatischen Modells (s. Kapitel 12.2). Die Bereiche innerhalb der beiden durchgezogenen vertikalen Linien und der beiden gestrichelten vertikalen Linien markieren die Bereiche zur Mittelwertberechnung.

B.3 Experiment 3 - Evaluierung der Steifigkeiten von SLS-gefertigten Festkörpergelenken

Tabelle 5 – Parameter und Versuchsergebnisse des Experiments zur Evaluierung der Steifigkeiten von SLS-gefertigten Festkörpergelenken. Pro Testkörper wurden 3 Exemplare gefertigt und getestet.

		b_f [mm]	$r_f + r_w$ [mm]	h_f [mm]	d_f [mm]	α [rad]	Moment Gravi- tation M_g [Nm]	erwartete Seilkraft F_w [N]	gemessene Seilkraft $F_{w,meas}$ [N]		Differenz $ F_{w,meas} - F_w $ [N]
									\bar{x}	s	
Testkörper 1	Versuchsreihe 1	1,5	8	3,2	0,3	$\pi/10$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	0,1	1,2	0,0	1,1
Testkörper 2					0,5			0,5	1,8	0,1	1,3
Testkörper 3					0,7			1,4	2,3	0,3	0,9
Testkörper 4					0,9			3,0	4,0	0,1	1,0
Testkörper 5					1,1			5,5	6,1	0,2	0,6
Testkörper 6					1,3			9,2	10,0	0,2	0,8
Testkörper 7					1,5			14,4	15,8	1,3	1,5
Testkörper 8	Versuchsreihe 2	3,0	4	1,9	0,3	$1,8 \cdot 10^{-3}$		0,7	6,8	0,7	6,1
Testkörper 9					0,5			3,3	7,6	1,6	4,4
Testkörper 10					0,7			9,2	12,8	0,6	3,7
Testkörper 11					0,9			19,8	19,0	0,5	0,8
Testkörper 12					1,1			36,7	-	-	-
Testkörper 13					1,3			61,5	-	-	-
Testkörper 14					1,5			95,9	-	-	-