

# Ein von nachgiebigen Mechanismen inspirierter Ansatz zur Konzeptionierung von additiv gefertigten Soft Robots

P. Steck, H. Völkl, S. Wartzack

**INHALT** Die ausgeprägten Designfreiheiten durch die additive Fertigung finden besonders in der Gestaltung von Soft Robots Anwendung [1]. Unter Soft Robotics wird ein junges und schnell wachsendes Forschungsgebiet verstanden, welches durch variable und steuerbare Nachgiebigkeiten innerhalb der Strukturen Lösungen für verschiedene Bewegungsprobleme finden möchte [2]. Die Bauteile werden dabei häufig als Vorabmodell aus Gründen der Funktionsintegration additiv hergestellt. Durch die Funktionsintegration können z. B. bewegliche Baugruppen durch ein Einzelbauteil höherer Komplexität substituiert und somit Wirkungsgrade verbessert, Massen reduziert und Montagezeiten verkürzt werden. Dies entspricht in den Zielen den Nachgiebigen Mechanismen, welche jedoch aktuell noch nicht im Kontext von Soft Robotics betrachtet werden und deshalb auch keine Konzeptions- oder Designvorschriften für diesen Anwendungsfall existieren. Im vorliegenden Beitrag wird ein Ansatz zur Konzeptionierung von Soft Robots vorgestellt, welche auf einer Kombination aus der Konstruktionsmethodik nach Pahl/Beitz und einer Auslegungsmethodik für nachgiebige Mechanismen basiert. Hierbei wurden verschiedene additiv gefertigte Soft Robotic Greiferkonzepte verglichen und parallel unterschiedliche Aktivierungsformen in der Soft Robotic untersucht. Die Soft Robotic Greifer können zur Manipulation von Gegenständen, beispielsweise in der Lebensmittelindustrie, verwendet werden.

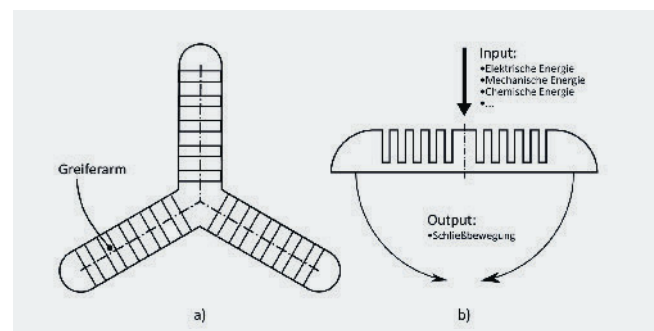
## 1 Anforderungen an Soft Robots

Künstliche Muskeln und flexible Handprothesen zum ergonomischen Greifen waren im vergangenen Jahrzehnt Gegenstand vieler Forschungsarbeiten in der Medizintechnik [3–8]. Dabei helfen Soft Robots (SR) mit ihrem Leichtbaucharakter und der Fähigkeit, den biologischen Aufbau von Knochen, Fleisch, Bändern, Sehnen oder Haut zu imitieren [9]. So werden aus synthetischen Werkstoffverbunden bionische Strukturen für die Prothetik bzw. Orthetik geschaffen. Weitere Einsatzmöglichkeiten von SR finden sich in der Luft- und Raumfahrtindustrie. Dort sollen zukünftig SR für Selbstmontagearbeiten eingesetzt werden und mittels Formgedächtniswerkstoffen hybride Energiespeicheraufgaben und Impulsübertragungen ausführen [10]. So können auch schwer zugängliche Orte durch vorprogrammierte Faltmechanismen erreichbar gemacht werden, ohne komplizierte Steuer- und Regelkreise bei der Konstruktion vorsehen zu müssen. Weiterhin werden SR als Handlinginstrumente in der Lebensmittelindustrie

## A compliant mechanism inspired approach for the design process of additive manufactured soft robots

**ABSTRACT** The distinctive design freedoms provided by additive manufacturing are particularly applied in the design of soft robots [1]. Soft robotics is a young and rapidly growing field of research which aims to find solutions for various motion problems by means of variable and controllable compliance within the structures [2]. The components are often produced additively as a preliminary model for reasons of functional integration. Functional integration can be used, for example, to replace moving assemblies with a single component of higher complexity, thus improving efficiency, reducing mass and shortening assembly times. This corresponds to the goals of compliant mechanisms, which are not yet considered in the context of soft robotics and therefore no concept or design guidelines exist for this specific application. In this paper an approach for the conceptual design of soft robots is presented, which is based on a combination of the design methodology according to PAHL/BEITZ and a design methodology for compliant mechanisms. Different additively manufactured soft robotic gripper concepts were compared and different forms of activation in the soft robot were investigated in parallel. The soft robotic grippers can then be used for manipulating objects, for example in the food industry.

für zerbrechliche Lebensmittel wie z. B. Eier oder Obst kommerziell eingesetzt [11]. In **Bild 1** ist ein solcher SR-Lebensmitteligreifer zu sehen, welcher in diesem Beitrag zum Vergleich ver-



**Bild 1.** Schematische Darstellung eines Dreiarms-Greifers: a) Draufsicht b) Seitenansicht. Grafik: KTmfk

schiedener Greiferkonstruktionen und Energieformen konzipiert wurde. Um die benötigte große Verformung eines SR-Greifers gewährleisten zu können, darf das Verformungsverhalten nicht konservativ linear betrachtet werden [12]. Verformungen, welche so groß sind, dass die Tragfähigkeit des Gesamtsystems beeinflusst werden kann, weisen ein starkes nichtlineares Verhalten auf, wodurch eine einfache Linearisierung unzulässig wird. Soft Robots sind damit in ihrem Verformungsverhalten ähnlich zu nachgiebigen Mechanismen, weshalb die Konstruktions- und Materialvorschläge analog gelten [13]. Im Folgenden werden Handlungsempfehlungen zur Konstruktion und Materialauswahl für SR an dem oben beschriebenen Greifer exemplarisch gezeigt. Diese basieren auf einer bereits etablierten Methode zur Konstruktion für nachgiebige Mechanismen.

## 2 Stand der Technik zur Konstruktion von nachgiebigen Mechanismen und Soft Robots

Die Konstruktion von nachgiebigen Mechanismen kann über analytische oder rechnergestützte Methoden erfolgen. Bei der analytischen Konstruktion von nachgiebigen Mechanismen kommen in der strukturmehchanischen Auslegung die erweiterte Maxwell-Gleichung [14] nach Calladine [15] und die „Rule of complementary Patterns“ von Blanding [16] zum Einsatz. Hierbei werden Einzelbauteile auf Fachwerkstrukturen reduziert, um mit Stäben und Balken die Freiheitsgrade systematisch einzuschränken. Bei der rechnerunterstützten Konstruktion von nachgiebigen Systemen werden nach erfolgreicher Topologieoptimierung Konstruktionskataloge und algorithmenbasierte Methoden verwendet, um den Designvorschlag in ein fertigungsgerechtes Bauteil zu überführen [17, 18].

Für nachgiebige Mechanismen wünschenswerte Eigenschaften sind eine hohe zulässige Dehnung bei gleichzeitig guter Festigkeit, sowie gute dynamische und thermische Stabilitätseigenschaften. Daher werden zur methodischen Auswahl geeigneter Werkstoffe für nachgiebige Systeme in der Luft- und Raumfahrtindustrie folgende überschlägige Auslegungsformeln verwendet [19]:

Das zu maximierende Verhältnis aus der zulässigen Biegespannung  $\sigma_{B,zul}$  und der Biegesteifigkeit  $E \cdot I$  beschreibt die allgemeine Eignung des Werkstoffes für nachgiebige Mechanismen [20]. Das Flächenträgheitsmoment  $I$  kann aufgrund der Werkstoffunabhängigkeit entfallen, was nach dem Gesetz von Hook zur prozentualen Dehnung  $\varepsilon$  führt (Gl. 2.1).

$$\max f = \frac{\sigma_{B,zul}}{I} \cdot \varepsilon \quad 2.1$$

Weiterhin beschreibt die Lösung der Beschleunigungsdifferentialgleichung für ungedämpfte Einmassenschwinger analytisch die Vibrationssteifigkeit von Werkstoffen. Gleichung 2.2 zeigt den Zusammenhang zwischen der ersten Eigenfrequenz  $\omega_0$  und der Steifigkeitsmatrix  $K$  bzw. Massenmatrix  $M$ .

$$\max \omega_0 = \sqrt{\frac{K(L)}{M(\rho)}} \rightarrow \frac{L}{\rho} \quad 2.2$$

Zudem führt die zyklische Verformung einer Struktur bei hochfrequenten Bewegungen zu Reibvorgängen im Inneren des Materialgefüges und damit zu intrinsischer Wärmeentwicklung. Wird das Verhältnis aus der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und des Wärmeaus-

dehnungskoeffizienten  $\alpha$  maximiert, ist dies ein Maß für einen thermisch stabilen Werkstoff (Gl. 2.3).

$$\max g = \frac{\lambda}{\alpha} \quad 2.3$$

Außerdem hängt die Wärmeleitfähigkeit u. a. direkt proportional von der Dichte ab und wechselwirkt folglich mit der bevorzugt niedrigen Dichte für hohe Eigenfrequenzen aus Gleichung 2.2. Jedes nachgiebige System aus thermoplastischem Kunststoff weist somit die Nachteile der fehlenden Dauerschwingfestigkeit und der ihr zugrundeliegenden geringen Wärmeleitfähigkeit auf.

Neben den oben gezeigten Auslegungsformeln gibt es aus der Forschung noch anwendungsnähere Einschätzungen. Tibbitts *et al.* postulierten dazu in [21], dass es am Markt an Werkstoffen fehlt, welche in funktionellen und leistungsstarken Umgebungen verwendet werden können, um multifunktionale und intelligente oder reaktive Aufgaben zu erfüllen. Hier könnten Shape Memory Polymere (SMP) eine Lösung sein, welche aufbauend auf metallischen Formgedächtnislegierungen bereits in den 1980er Jahren entwickelt wurden [22]. Eine weitere Möglichkeit, Elastomere zur additiven Fertigung eines SR zu nutzen, zeigten Miriyev *et al.* in [23]. Die Autoren verwendeten ein Elastomer mit hoher Bruchdehnung, welches mit Ethanol vermischt wurde und mit einem Widerstandsdraht elektrisch aktiviert werden konnte. Das so geschaffene Verbundmaterial ist ein Pseudo-EAP (elektroaktives Polymer). Dass der Verbund aus konventionellen Polymeren ebenfalls eine gute Möglichkeit ist, um SR mittels Materialextension-(MEX-)Druckern [24] zu fertigen, zeigten SkylarScott *et al.* in [25]. Gemein hin wird diese Form der Kunststoffverarbeitung Fused Layer Modelling-(FLM-) bezeichnet. Einen methodischen Ansatz zur Entwicklung FLM-gefertigter Multi-Material-(MM) Strukturen stellten Watschke *et al.* in [26] vor. Im nächsten Kapitel werden die beschriebenen Gleichungen und ein SMP am Beispiel eines additiv gefertigten Dreiarm-Greifers angewandt. Hierfür werden verschiedene Greiferkonzepte methodisch entwickelt und in Entwürfe überführt, welche zudem Erkenntnisse über unterschiedliche Wirkprinzipien ermöglichen sollen. Die aus den anschließenden Versuchen erhaltenen Ergebnisse stellen Handlungsempfehlungen für die zukünftige Auslegung von Soft Robots dar.

## 3 Eine Methode zur Konzeption von Soft Robot Greifern mit unterschiedlichen Wirkprinzipien

Die Greiferkonzepte werden mittels der Konstruktionsmethodik (Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten) nach Pahl/Beitz erstellt [27]. Im Rahmen der Planungsphase werden sechs Festanforderungen bestimmt:

1. Ausführung der Schließbewegung: < 3 min
2. Zulässige Masse: < 50 g
3. Herstellungspreis: < 15 €
4. Hohe elastische Verformung der Struktur
5. Möglichst hohe zulässige Durchbiegung der Greiferarme
6.  $\sigma_{B,zul}/E$ -Verhältnis des Werkstoffes: > 4

Es wird explizit kein Anspruch auf maximale Beweglichkeit der Greiferarme gestellt, da diese eine hohe Abhängigkeit von der verwendeten Energieform und des Werkstoffes hat. Aus den Anforderungen für SR-Greifer ergibt sich eine Funktionsstruktur,

Tabelle 1. Werkstoffdaten der verwendeten Kunststoffe.

Werkstoff	$\sigma_{B,zul}$ in N/mm <sup>2</sup>	E in N/mm <sup>2</sup>	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$\lambda$ in W/mK	$\alpha$ in $\times 10^{-5}$ 1/K	Kosten in €/kg
PLA [28]	49	2650	1300	0,13	12	11,-
TPU 63A [29]	26	5,3	1070	0,2	17	100,-
ABS [28]	48	2400	1030	0,18	9,5	25,-
PETG [28]	59	2300	1270	0,29	6,8	13,-
SMP55 [30]	11	570	1250	-	-	346,-
Silikon00 [31]	4	0,3	1060	-	-	31,-

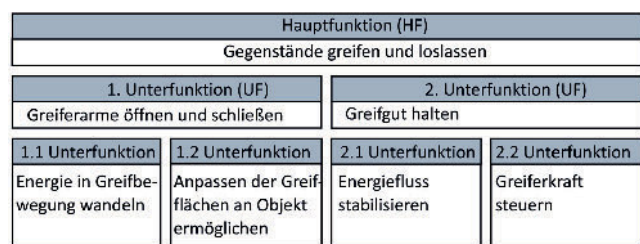


Bild 2. Funktionsstruktur nach Pahl/Beitz für SR-Greifer. Grafik: KTMfk

welche die Hauptfunktion (HF) in kleinere Unterfunktionen (UF) gliedert (Bild 2).

Um geeignete Werkstoffe für Soft Robots zu finden, wird die im vorherigen Kapitel beschriebene Methode zur Materialauswahl für nachgiebige Mechanismen auf verschiedene FLM-verarbeitbare Werkstoffe angewendet. Tabelle 1 zeigt eine Auswahl verschiedener FLM-verarbeitbarer Werkstoffe.

PLA, PETG und ABS sind etablierte Werkstoffe im FLM und haben weitestgehend ähnliche Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften. Tabelle 2 zeigt einen Vergleich der auf PLA normierten Verhältniswerte für die in der vorherigen Tabelle vorgestellten Werkstoffe. TPU (Shore 63A) und Silikon (Shore 00) sind dabei als flexible Werkstoffe ideal bei großen Stellwegen, haben jedoch Einschränkungen bei der dynamischen Stabilität. Für die Werkstoffe SMP55 und Silikon 00 konnten keine Wärmeleit- und Wärmeausdehnungskoeffizienten gefunden werden. Da allerdings Kunststoffe im Vergleich mit anderen Werkstoffen (z. B. Metal-

Tabelle 2. Auf PLA normierte Verhältniswerte für verschiedene MEX-Kunststoffe zur Fertigung von Nachgiebigen Mechanismen.

Werkstoff	Normierte Werte			
	$\frac{\sigma_{B,zul}}{E}$	$\frac{E}{\rho}$	$\frac{\lambda}{\alpha}$	€
PLA	1,00	1,00	1,00	1,00
TPU 63A	265,31	$2,43 \times 10^{-3}$	1,09	9,09
ABS	1,08	1,14	1,75	2,27
PETG	1,39	0,89	3,94	1,18
SMP55	0,22	0,29	-	31,45
Silikon 00	721,09	$1,39 \times 10^{-4}$	-	2,82

le) generell keine guten Wärmebeständigkeiten aufweisen, werden die Temperatureigenschaften nicht weiter betrachtet [32].

Weiterhin bietet die Formgedächtniseigenschaft des SMP55 zusätzliches Potenzial bei der hybriden Energiespeicherung. Eine primäre Energiequelle (z. B. mechanische Energie) wird hier zunächst eine initiale „Programmierung“ des Werkstoffes zur Verformung einer Struktur hervorrufen. Danach wird Wärme genutzt, um die molekulare Verschiebung wieder zu revidieren und die Struktur in die Ausgangslage zu überführen.

Nach der werkstoffseitigen Betrachtung wurde die in Bild 1 dargestellte Prinzipskizze in zwei verschiedene Varianten ausgearbeitet (Bild 3).

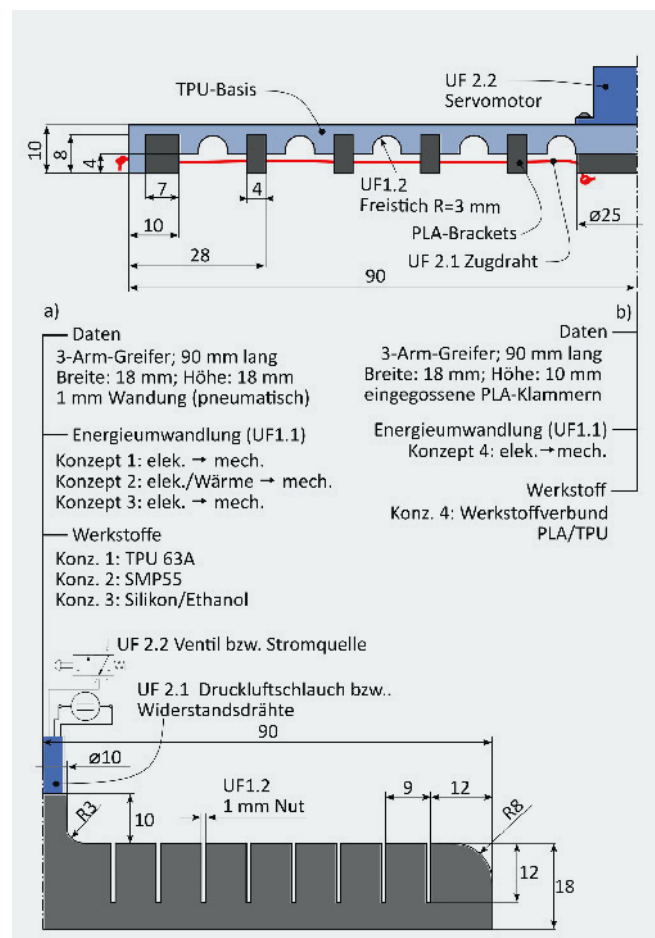
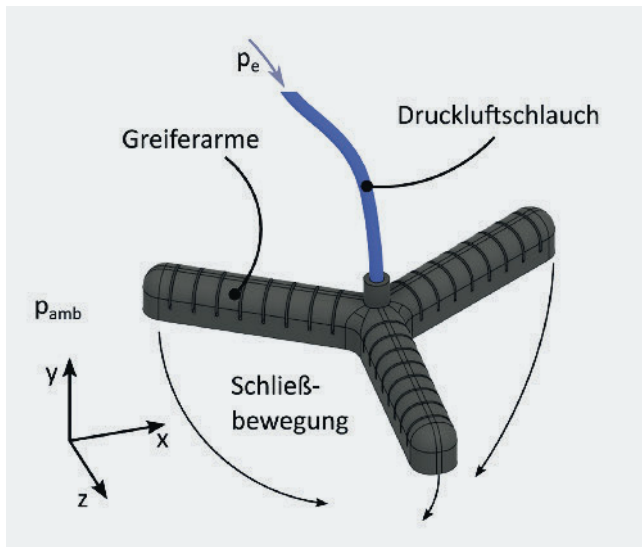
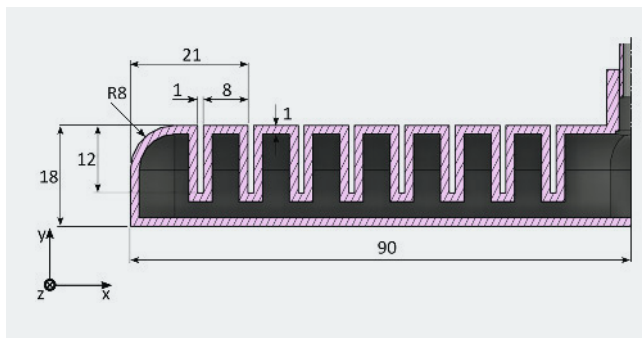


Bild 3. Übersicht über die ausgearbeiteten Greiferkonzepte: a) Variante 1 b) Variante 2. Grafik: KTMfk



**Bild 4.** TPU-Greifer in Ruhelage mit pneumatischer Energie als externen Stimulus. Grafik: KTMfk



**Bild 5.** Schnitt durch einen TPU-Greiferarm. Grafik: KTMfk

Die Greiferkonzepte aus Bild 3 sind mit drei gleich langen Armen im 120° Abstand ausgestattet und besitzen je nach Aktivierungsform z. B. runde Freistriche oder separierte, hohle Kammern, um die Verformbarkeit der Arme zu gewährleisten (UF1.2). Jeder Arm ist vom Mittelpunkt bis zum Ende 90 mm lang und hat ein Breite-zu-Höhe-Verhältnis von 1, wobei die Breite 18 mm misst. Außerdem wurde das Ende der Arme abgerundet, um Spannungsspitzen zu vermeiden.

Um die UF1.1 zu erfüllen, werden verschiedene Wirkprinzipien miteinander verglichen. Das Konzept 1 beschreibt dabei eine pneumatisch aktivierte Methode zur Realisierung eines Soft Robots. Hierbei wird die Verwendung eines hyperelastischen Werkstoffes wie z. B. thermoplastisches Polyurethan (TPU) verfolgt. Dieser besitzt – je nach Shore-Härte – eine maximale Dehngrenze bis 950 % [29]. Im Konzept 2 wird die Variante 1 des Greifers aus einem Smart Memory Polymer der Firma SMP Technologies gefertigt und über Druckluft aktiviert und durch Wärme relaxiert. Das SMP basiert im molekularen Aufbau auf einem TPU und wird über additive und verschiedene Wärmeverfahren auf einen Erweichungspunkt von 55 °C eingestellt. Im Konzept 3 wird das in [23] vorgestellte Pseudo-EAP genutzt, um auch die Werkstoffgruppe der Silikone auf Verwendbarkeit bei SR zu untersuchen. Das vierte Konzept ist eine mechanische Lösung, für welche eine zweite Variante des Greifers entwickelt wurde. Die nachgiebigen Bereiche der Greiferarme werden hierbei durch einen über Zugdrähte (UF2.1) verbundenen Servomotor verbogen. Um die hohe

Varianz der Steifigkeiten innerhalb der Struktur zu generieren, wird dazu ein Werkstoffverbund mit zwei unterschiedlichen und FLM-druckbaren Kunststoffen geschaffen.

Die unterschiedlichen SR-Greiferkonzepte werden im Anschluss anhand eines quantitativen Vergleichs der Masse  $m$ , der Schließdauer  $t$  und der monetären Aufwände  $A$  bewertet. Das Gewicht bezieht sich auf den Greifer inklusive aller Anbauteile, die zur einwandfreien Verwendung des Greifers notwendig sind. So ist beispielsweise beim pneumatisch arbeitenden Greifer die Mindestlänge eines Druckluftschlauches (UF2.1) von 14 mm notwendig (7 mm innerhalb des Greifers und 7 mm innerhalb eines Ventils), ebenso wie der Servomotor (UF2.2) beim MM-Greifer. Für die Schließdauer wird die benötigte Zeit zum Schließen der Greiferarme mittels Highspeed-Kamera (GOM Aramis 3D HHS) und handelsüblicher Stoppuhr gemessen. Anfangs- und Endbedingung war hierfür, dass keine weitere Bewegung der Greiferarme stattfindet. Für den monetären Aufwand wurden alle zur Fertigstellung des jeweiligen Greifers notwendigen Kosten summiert. Um verschiedene Möglichkeiten der Energieumwandlung bei SR analysieren zu können, wird die UF 1.1 in den folgenden Kapiteln genauer untersucht und dabei die Greiferkonzepte und ihre Besonderheiten detaillierter beschrieben.

### 3.1 Konzept 1: SR-Greifer aus TPU mit Druckluft als Energieträger

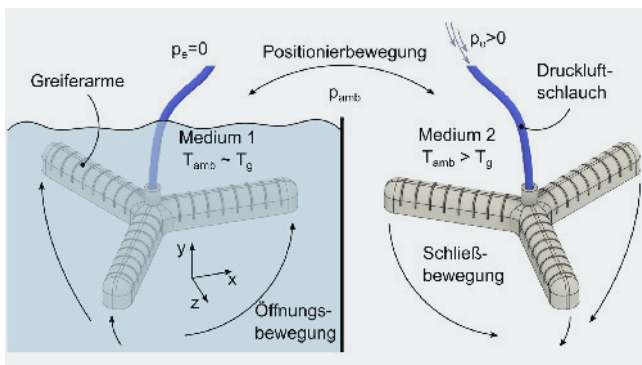
In Bild 4 ist die pneumatische Variante des Greifers aus reinem TPU zu sehen, welche an eine zentrale Druckluftversorgung bei  $p_e = 2$  bar angeschlossen, durch einen 4 mm Druckluftschlauch (UF2.1) versorgt und über ein 2/3-Wegeventil (UF2.2) gesteuert wurde.

Der Greifer wurde hierfür hohl ausgeführt und mit 1 mm breiten Dehnungsnuten versehen (Bild 5). Durch die so resultierenden Kammern wird die Innenfläche auf der Oberseite des Greifers vergrößert, was bei Überdruck im Inneren der Kammern nach den Gesetzen von Avogadro und Guy-Lussac zu einer stark asymmetrischen Expansion und schlussendlich zur Bewegung der Greiferarme in negative  $z$ -Richtung führen sollte (UF1.2).

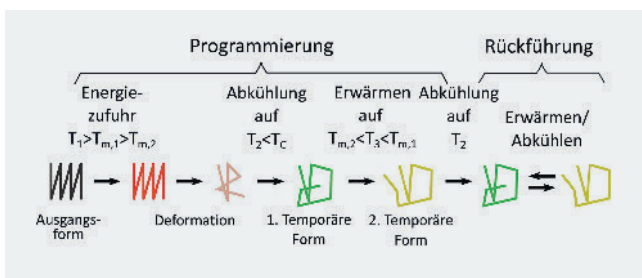
Um die Dichtigkeit zu gewährleisten, wurde bei der Fertigung des druckaktivierten Greifers eine Fülldicke von 100 % eingestellt. Die Wanddicke der Struktur trägt ebenfalls zur Dichtigkeit bei, weshalb diese als ein Vielfaches ( $5 \times 0,4$  mm) der eingestellten Pfadbreite des Fertigungsprozesses konstruiert wurde. Da das TPU in flüssigem Zustand sehr niedrigviskos ist, reicht der sogenannte Retract (das Zurückziehen des Filamenthalbbeuges durch den Extrudermotor) nicht aus, um den Druck innerhalb der Düse zu verringern und so das Heraussickern des Werkstoffes bei der Positionierbewegung zu verringern.

Das Verkleben der Kammern kann deshalb nur durch Positionierbewegungen innerhalb des Druckobjektes vermieden werden. Die Druckgeschwindigkeit wird vom Hersteller mit 12 mm/s angegeben. Um gute Druckergebnisse zu erzielen, sollte dieser Wert auch zwingend eingehalten werden. Außerdem zeigte sich, dass die Maximaltemperatur von 230 °C nicht überschritten werden sollte, da Zersetzungen im Material die Folge sein könnten. Da das eingangs beschriebene SMP ebenfalls auf TPU basiert und zudem über Wärme gesteuert wird, muss bei der Verarbeitung ebenfalls zwingend auf die Drucktemperatur geachtet werden. Auf diese und weitere Eigenheiten von SMP wird im nächsten Kapitel näher eingegangen.





**Bild 6.** Funktionsschema eines SMP-Greifers mit thermischer und pneumatischer Energie als externe Stimuli. Grafik: KTMfk



**Bild 7.** Formgedächtniszyklus eines 2-Phasen Shape-Memory Polymers [33]. Grafik: KTMfk

### 3.2 Konzept 2: SR-Greifer aus einem SMP mit Druckluft und Wärme als Energieträger

**Bild 6** zeigt das Funktionsschema eines SR-Greifers aus einem Shape-Memory Polymer (SMP55) der Firma SMP Technologies, welcher thermisch und pneumatisch aktiviert wird (UF1.1).

Das SMP55 ist ein Polymer mit einem 2-Phasen-Formgedächtniseffekt und besitzt eine Übergangstemperatur bei 55°C. Die Öffnung des Greifers wird realisiert durch den internen Phasenübergang mithilfe von Wärme und anschließender Relaxation in die Ausgangslage. Die Schließung erfolgt entsprechend dem TPU-Greifer aus dem vorherigen Kapitel mithilfe einer pneumatischen Aktivierung (UF2.2, vgl. Kapitel 3.1). Wird ein Produkt aus einem SMP gefertigt, erhält es seine Ausgangsform. Dieser Vorgang wird „initiale Werkstoffprogrammierung“ genannt und ist mit dem Schmelzen des Halbzeugs verbunden  $T > T_{m,1}$  (siehe **Bild 7**).

Wird das Produkt nach einer anschließenden Abkühlphase über die Übergangstemperatur  $T_{m,2}$  erwärmt, erweicht die Struktur schlagartig. Eine erneute Abkühlung der Außentemperatur lässt den Werkstoff erstarren (UF1.1).

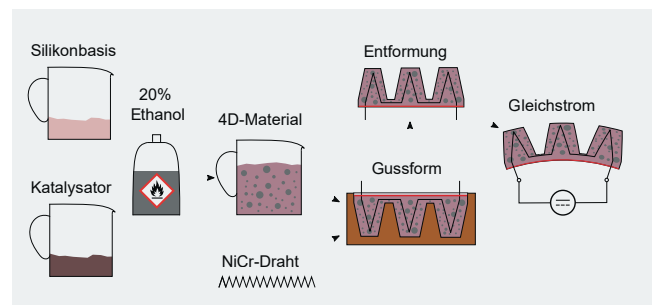
Obwohl der E-Modul schnell sinkt, bleibt die Festigkeit laut Hersteller gleich. Da das SMP grundsätzlich auch auf einem TPU basiert, gelten die Fertigungsparameter des TPU-Greifers entsprechend (vgl. Kapitel 3.1) [29; 30; 34]. Ausnahme ist die Deaktivierung der Heizplatte. Dadurch wird das Erweichen bei der Übergangstemperatur 55°C vermieden. Auch der finalen Einsetzbarkeit des fertigen Greifers sind aufgrund der charakteristischen niedrigen Erweichungstemperatur von Thermoplasten Grenzen gesetzt. Aus diesem Grund wird im nächsten Kapitel die Verwendbarkeit von Elastomeren innerhalb von SR untersucht.

### 3.3 Konzept 3: SR-Greifer aus Ethanol-dotiertem Silikon mit Wärme als treibenden Stimulus

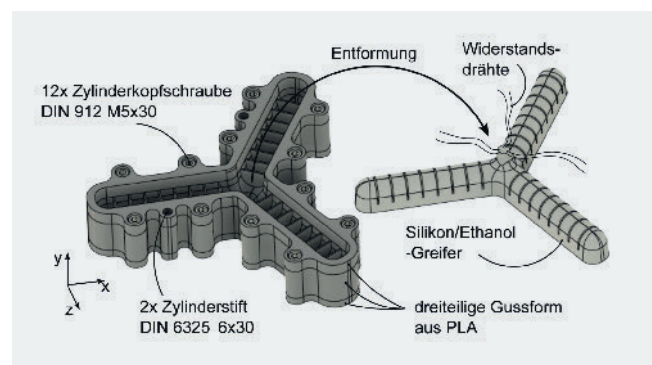
In diesem Kapitel wird ein Silikonkautschuk mit einer alternativen Aktivierungsmöglichkeit nach [23] auf die Greifervariante 1 (**Bild 3 a**) angewendet. Die konstruktive Ausgestaltung des Konzepts richtet sich hier stark nach dem Werkstoff, welcher daher zunächst beleuchtet wird. Das für diese Greifervariante verwendete transluzente Silikon ist ein platinierter Silikonkautschuk SF00-RTV2 des Herstellers Silikonfabrik und das Ethanol ein handelsübliches Bio-Ethanol von Herrlanspm e.K. [31]. Ethanol hat im isobaren Fall bei 1 bar Umgebungsdruck eine Gasübergangstemperatur bei 78,4°C. Wird der ausgehärtete Verbundwerkstoff über diese Temperatur erhitzt, verdampfen die eingelagerten Ethanol-Tropfen in der Silikonmatrix. Die Folge ist eine Verformung des Silikons, welche in einer sichtbaren Blasenbildung innerhalb der Silikonmatrix resultiert (UF1.1). Das Erwärmen des Silikon/Ethanol-Verbunds kann mithilfe eines im Silikon eingebetteten NiCr-Widerstandsdrahts (UF2.1), welcher an den Enden mit einer Gleichspannungsquelle verbunden ist, realisiert werden. So lässt sich die Verformung elektronisch steuern (UF2.2).

Die Grundabmaße des Greifers entsprechen denen des TPU- und des SMP-Greifers, jedoch ist der Greifer nicht hohl, sondern als Vollmaterial ausgeführt, damit sich die innenliegenden Drähte nicht berühren. Eine Berührung hätte einen Kurzschluss zur Folge, was zum Ausfall des Greifers führen würde.

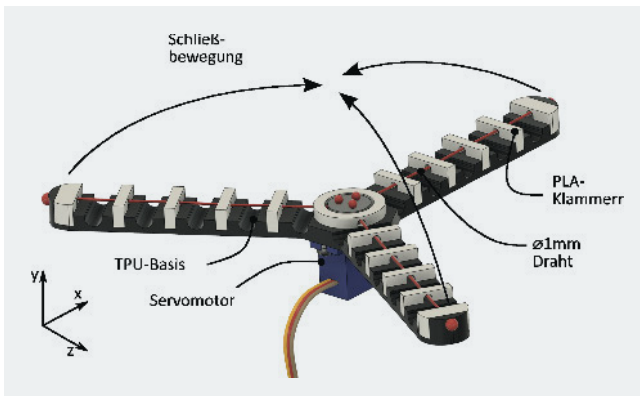
Da die Verarbeitung des Silikons nach **Bild 8** und *Miriyev et al.* grundsätzlich mittels MEX möglich ist, dies jedoch mit der aufwendigen Umrüstung eines FLM-Druckers einhergeht, wurde die in **Bild 9** dargestellte dreiteilige Form konstruiert. Das verwendete Fertigungsverfahren für die Form ist weiterhin additiv, wohingegen der Greifer



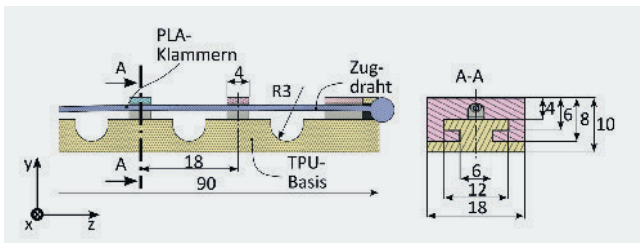
**Bild 8.** Verfahrensanweisung zu Herstellung eines Pseudo-EAPs nach [23]. Grafik: KTMfk



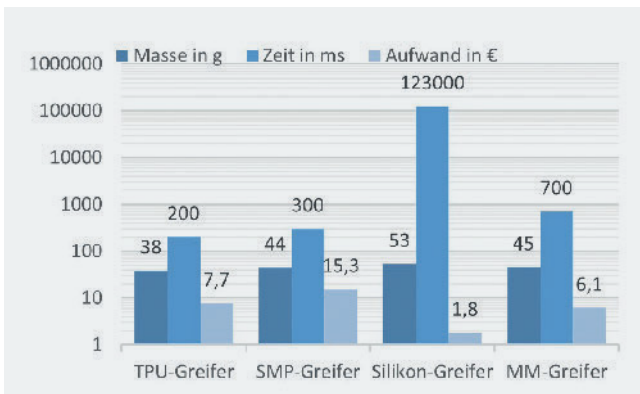
**Bild 9.** Entformungsprozess des Silikongreifers mit Wärme als treibenden Stimulus. Grafik: KTMfk



**Bild 10.** Polymerverbund-Greifer in Ruhelage mit elektrischer Energie als treibenden Stimulus. Grafik: KTMfk



**Bild 11.** Schnitt durch den MM-Greifer. Grafik: KTMfk



**Bild 12.** Konstruktions- und Prozessgrößen der verschiedenen Greifer. Grafik: KTMfk

aus pragmatischen Gründen formativ gefertigt wird. Damit sich die Widerstandsdrähte beim Ein- und Auslass der Gussform nicht berühren, wurden auf der Unterseite der Gussform mittig sechs Bohrungen platziert. Da die Schließbewegung der Greiferarme ebenfalls über die Ausdehnung der Kammern funktioniert, müssen in dieser Variante die Dehnungsnuten ebenfalls erhalten bleiben. Das Gemisch kann zur Fertigung in einen modifizierten FLM-Drucker geladen und konventionell gedruckt werden. Hierfür wird unter anderem ein klimatisierter Tank benötigt, welcher das Gemisch bei  $-10^{\circ}\text{C}$  hält, damit zwischen Silikon und Katalysator keine Vernetzung stattfinden kann. Nach dem Eingießen des Gemisches in die Kammern der Greiferarme wurde eine dünne passive Schicht aus reinem Silikon ohne Ethanol in die Form gegossen. Diese soll sich nicht ausdehnen und lediglich eine Verbindung zwischen den einzelnen Kammern herstellen. Eine Variante, welche komplett auf Expansionskammern verzichtet, wird im folgenden Kapitel vorgestellt, um neben den verschiedenen Energieinputs auch das Greiferdesign zu evaluieren.

### 3.4 Konzept 4: SR-Greifer aus einem Polymerverbund mit elektrischer Energie als treibenden Stimulus

Zuletzt wird das Konzept eines Multi-Material-(MM-)Greifers untersucht, welcher mit partiellen Nachgiebigkeiten in Form eines Werkstoffverbundes ausgestattet ist. **Bild 10** zeigt den MM-Greifer in Ruhelage.

Für den Greifer wird als Werkstoff wieder das in Kapitel 3.1 beschriebene TPU verwendet, welches durch zusätzliche Querschnittsverkleinerungen an definierten Stellen zwischen den steifen Bereichen aus PLA, für gezielte Biegeachsen sorgt (UF1.2). Diese sind als runde Freistriche mit einem Radius von 3 mm in der TPU-Basis gestaltet und sorgen innerhalb der Greiferarme für die eigentliche partielle Biegung. Die steifen PLA-Klammern haben Hinterschnidungen, welche die Fläche für eine stoffschlüssige Verbindung erhöhen und gleichzeitig einen Sicherungsanker für den Formschluss darstellen (**Bild 11**). Die Klammern halten die Zugdrähte während der Zugphase an den Greiferarmen und verhelfen so der TPU-Basis an den Nuten zur Biegung. Durch die geringe Biegesteifigkeit (aufgrund des niedrigen E-Modul im verringerten Querschnitt) wird dann die widerstandsarme Biegung der Greiferarme gewährleistet.

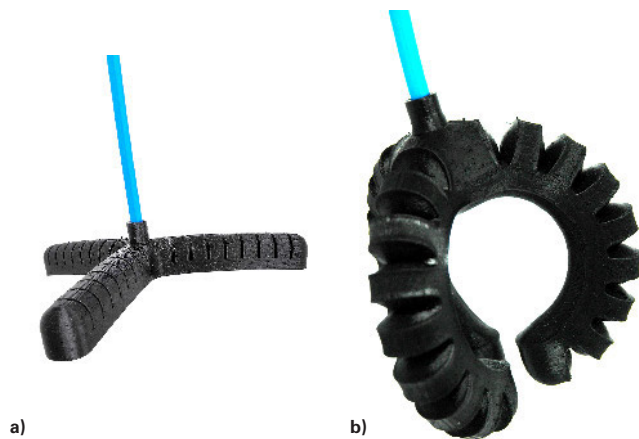
Durch Zugdrähte, welche an einem Ende mit den Greiferarmen und am anderen Ende mit einem 4-poligen Servomotor verbunden sind, wird das Moment des Servomotors über die einzelnen Klammern geleitet (UF2.1). Wird der Servomotor SG-90 (5V/0,19A) [35] aktiviert, werden die Drähte auf die mit einem Adapter ausgestattete Motorachse gewickelt. Weiterhin wurde ein einfacher Mikrocontroller (ESP8266) [36] zwischen der Gleichspannungsquelle und den Motor installiert, um die Schließ- bzw. Öffnungsbewegung des Servomotors steuern zu können (UF2.2). Die Verarbeitung zweier Filamente mit sehr unterschiedlichen Elastizitätseigenschaften stellt hierbei die größte Herausforderung dar. In diesem Beitrag wurde deshalb ein Prusa MKS3+ mit einer MMU (Multi-Material Unit) vom gleichnamigen Hersteller verwendet. Diese hat den Vorteil, dass keine zweite Druckdüse verwendet werden muss, sondern lediglich der Filamentladezyklus automatisiert wird. Dabei müssen initial im Preprocessing die Werkstoffe den definierten Bereichen im Bauteil zugeteilt werden. Im Anschluss werden innerhalb einer Schicht zunächst die Bereiche eines Materials gedruckt und danach mithilfe eines sogenannten Reinigungsturms die Düse nach erfolgreichem Materialwechsel gereinigt. Das zweite Material kann dann ohne Lunker oder Fremdmaterialeinschlüsse in die verbliebenen Bereiche des Bauteils gedruckt werden.

## 4 Fertigungsergebnisse der Greifer und Diskussion der Bewegungsstudien

Da alle verwendeten Werkstoffe mit der in Kapitel 3 beschriebenen Anforderungen 4–6 ausgewählt wurden, werden im Folgenden nur die geometrieabhängigen Anforderungen 1–3 verglichen. **Bild 12** zeigt hierfür einen Vergleich der gemessenen bzw. berechneten Anforderungsgrößen der verschiedenen Greifervarianten.

Der TPU-Greifer aus Konzept 1 erfüllt mit einem Gewicht von 38 g und einer Schließgeschwindigkeit von 200 ms die Greiferanforderungen aus Kapitel 3 am besten. Der zweitschnellste Greifer ist der SMP-Greifer, welcher ebenfalls aus einem auf TPU basierenden Werkstoff gefertigt wurde. Der Beschaffungspreis für





**Bild 13.** FLM-gefertigter TPU-Greifer: a) in Ruhelage b) mit  $p_e=2$  bar beaufschlagt. Grafik: KTMfk

das SMP-Filament ist jedoch etwa doppelt so hoch wie handelsübliches TPU. Der schwerste Greifer ist mit 44 g der aus Silikon00, da dieser nicht wie die anderen pneumatisch aktivierten Greifer hohl ausgeführt werden konnte. Der Multi-Material-Greifer ist in allen Disziplinen vergleichbar mit dem pneumatischen TPU-Greifer.

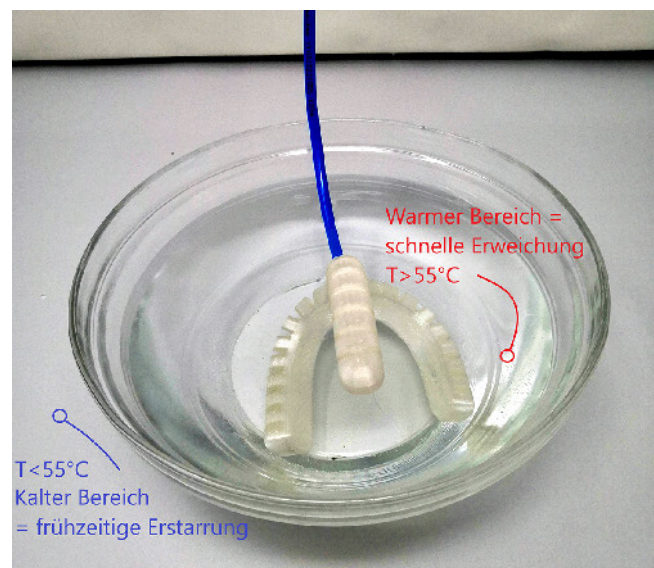
Nach der Fertigung wurde der TPU-Greifer an die Druckluftversorgung angeschlossen und durch Betätigung eines Ventils aktiviert (siehe **Bild 13**). Wie zu erkennen ist, bewegten sich die Greiferarme in die vorhergesagte Richtung. Die Deckschicht auf der Unterseite des TPU-Greifers verformte sich in der Mitte der Greiferarme stärker als an den Rändern. Die starke Expansion der Kammern führte durch die kleinere Fläche der Deckschicht zur Stauchung der selbigen. Weiterhin sorgte die größere Werkstoffkonzentration an den Rändern für eine erhöhte Biegesteifigkeit. Die Stetigkeit der Kammerinnenwandflächen führte zu einem Ausbeulen und in der Folge zur Verschiebung der Greiferarme in die bevorzugte Richtung.

Da der SMP-Greifer mit demselben CAD-Modell wie der TPU-Greifer gefertigt wurde, zeigte er nach der Aktivierung ein ähnliches Verformungsverhalten (siehe **Bild 14**). Der SMP-Werkstoff ist jedoch – anders als das TPU – transparent, weshalb die äußeren Lagen nur schwer per Sichtprüfung auf eventuelle Leckagen untersucht werden konnten. Um den Greifer zu testen, wurde dieser mit einem 4 mm Druckluftschlauch ausgestattet und in ein Wasserbad mit 55 °C gelegt. Nach kurzer Verweilzeit wurde ein Taster betätigt, welcher ein Ventil schaltete und so einen Überdruck mit 2 bar im Greifer einstellte. Der Greifer verformte sich ähnlich schnell wie der TPU-Greifer. Die vorderen 45 mm der Greiferarme bogen sich jedoch weniger durch als beim TPU-Greifer.

Grund hierfür ist die kalte Druckluft im Inneren des Greifers, welche dafür sorgte, dass der Phasenübergang schneller erreicht wurde und der Greifer in seiner verformten Lage schnell erstarrte. Nach der Schließbewegung wurde der Greifer aus dem Medium genommen und die Druckluft deaktiviert. Nach erneutem Erwärmen des Greifers über 55 °C bewegten sich die Arme ohne Kraftwirkung von außen zurück in ihre initiale Form. Der Vorgang wurde dreimal wiederholt, um den Formgedächtniseffekt zu evaluieren. Dieser zeigte bei jedem Durchgang eine vollständige Reversibilität. Obgleich die Schließgeschwindigkeit der des TPU-Greifers gleicht, ist die Taktrate eines Greifzyklus geringer, da der rückführende und thermisch aktivierte Phasenübergang des SMP mehr Zeit für die Rückstellung benötigt als das TPU.

Der Silikon/Ethanol-Greifer benötigte die meiste Zeit für die Ausführung der Schließbewegung. **Bild 15** zeigt einen Arm des SR-Greifers in verformter Lage. Um das Wirkprinzip untersuchen zu können, wurde der Greifer auf eine Tischplatte gelegt und an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen. Danach wurde die Stromstärke angefangen bei den von *Miriyev et al.* vorgeschlagenen 1 Ampere ( $1A \cdot 15V = 15W$ ) sukzessive erhöht, bis schließlich die Struktur bei 2 Ampere ( $2A \cdot 15V = 30W$ ) keine weitere Verformungsarbeit mehr leistete (siehe **Bild 15**). Durch die Phasenumwandlung expandierte das Ethanol stark, kondensierte jedoch an der Blaseninnenwand, sobald die Umgebungstemperatur der Blaseninnentemperatur entsprach. In Folge der Expansion des Ethanols verformte sich das umgebende Silikon, welches durch die gezielte Formgebung in die definierte Richtung gelenkt wurde. Die Verformung des Greiferarms dauerte insgesamt 1 Minute und 55 Sekunden. In dieser Zeit verformte sich die einzelnen Kammern merklich und stützten sich gegenseitig ab, um letztlich den Greiferarm in negative z-Richtung zu bewegen.

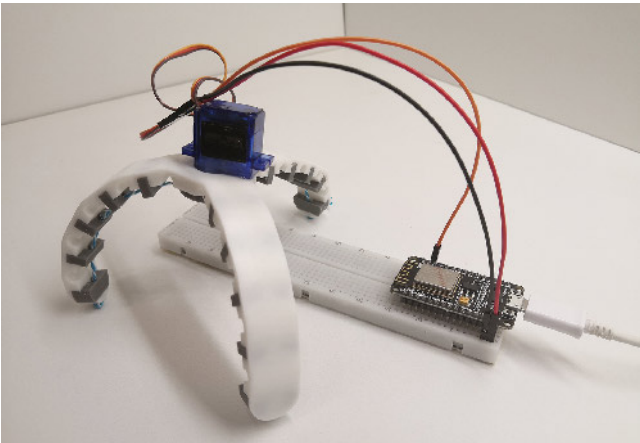
Zum Schluss wurde der MM-Greifer gefertigt (siehe **Bild 16**). Dieser benötigt Bereiche mit verschiedenen Werkstoffen (PLA/TPU), welche unterschiedliche Elastizitätsmoduln aufweisen und wenigstens formschlüssig miteinander verbunden



**Bild 14.** Verformung des SMP-Greifers. Grafik: KTMfk



**Bild 15.** Verformung des EAP-Greifers. Grafik: KTMfk



**Bild 16.** Verformung des MM-Greifers. Grafik: K Tmfk

sind. Nach der Fertigung des Greifers und der anschließenden Montage des Servomotors mit den Zugdrähten wurde der Befehl zum Verfahren des Servomotors an den Mikrocontroller gesendet. Die Zugdrähte zogen die Greiferarme in die vorhergesagte Richtung und zeigten so die allgemeine Funktionstüchtigkeit des SR-Greifers.

Da der E-Modul des TPU im Verhältnis zum verwendeten PLA sehr viel geringer ist, wurde nahezu die komplette Formänderungsarbeit von der TPU-Basis geleistet. Die PLA-Brackets zeigten weder in Ruhelage noch in verformter Position ein merkliches Spiel. Dies lässt den Schluss zu, dass wenigstens eine formschlüssige Verbindung zwischen TPU und PLA herrschen muss. Ob weiterhin ein Stoffschluss vorliegt, kann künftig mittels Dünnschnitt unter einem Durchlichtmikroskop geprüft werden.

## 5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein Ansatz zur Konzeptionierung von Soft Robots vorgestellt. Dieser Ansatz basiert auf einer Kombination aus der Konstruktionsmethodik nach *Pahl/Beitz* und einer Werkstoffauswahlmethode für Nachgiebige Mechanismen. Mittels dieses Ansatzes wurden vier Greiferkonzepte entwickelt und gefertigt. Zunächst wurde ein pneumatisch aktivierter Greifer aus thermoplastischem Polyurethan (TPU) der Marke *Recreus* hergestellt. Dieses weist eine geringe Shore-Härte von 60A auf, womit die Flexibilität des Greifers gewährleistet werden soll. Ein weiterer Wärme/Pneumatik-Greifer wurde aus einem Shape Memory Polymer (SMP) von der Firma *SMP Technologies* hergestellt. Das SMP55 ist ein Polymer mit einem 2-Phasen Formgedächtniseffekt und hat einen Phasenübergangspunkt bei 55 °C. Danach wurde ein Greifer aus dem von *Miriyev et al.* in [23] entwickelten Silikon gefertigt, welcher mithilfe einer Gleichspannungsquelle gesteuert werden konnte. Zum Schluss wurde ein Konzept des Greifers gedruckt, welches auf Basis zweier Thermoplaste mit unterschiedlichen Steifigkeiten die Schließbewegung durch einen Servomotor realisiert.

## 6 Fazit

Um verschiedene Möglichkeiten der Energieumwandlung bei SR untersuchen zu können, wurden bei der funktionsgerechten Konstruktion von SR nicht die festigkeitsbestimmenden Parameter, sondern die verwendete Energieform fokussiert. Dies hat sich

als vorteilhaft erwiesen, da letztendlich die erforderliche Verschiebung der SR-Strukturen weniger von den Materialkennwerten als mehr von der Art und Größe des Energieinputs abhing. Vergleicht man die unterschiedlichen Energieformen, lässt sich ein Vorteil der pneumatisch aktivierbaren, gegenüber der thermisch aktivierbaren Greifer feststellen. Sowohl die Rückstellzeit des SMP als auch die generelle Taktrate des Silikon-Greifers waren signifikant geringer als die der anderen Demonstratoren. Aus diesem Grund ist die Verwendung von Wärme als Energieform für konventionelle SR aus ökonomischen Gesichtspunkten nicht sinnvoll. Darüber hinaus zeigte der Werkstoffverbund aus verschiedenen FLM-fertigbaren Materialien mit unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften eine einfache Möglichkeit, um definierten Bereichen innerhalb einer Struktur bestimmte Aufgaben zukommen zu lassen. Als Handlungsempfehlung in der Planungsphase von SR wird daher in erster Linie empfohlen TPU als Konstruktionswerkstoff zu verwenden. Je nach Anwendungsfall sollte als Energieform Luftdruck oder Servomotoren genutzt werden. Innerhalb der Konzeptphase sollte bei der Anwendung der Konstruktionsmethodik gerade bezüglich innovativer Ideen ein Open-Mind-Set verfolgt werden. Bereits bei der Identifikation unterschiedlicher Funktionsausprägungen können hier vorzeitig, konkurrierende oder sich ergänzende Lösungen gefunden werden. In der Entwurfs- und Ausarbeitungsphase sollte dann bei der Verwendung von Servomotoren darauf geachtet werden, dass diese ausreichend dimensioniert sind, um die erforderliche Verformung der Greiferarme zu gewährleisten. Wird sich bei der Fertigungstechnologie für FLM entschieden, sollte auf eine perfekte Haftung der einzelnen Schichten geachtet werden. Hier empfiehlt es sich die Herstellerangaben für die Verarbeitung des verwendeten Kunststoffes exakt einzuhalten. Gerade bei Nachgiebigen Systemen ist im Bereich der Querschnittsverjüngung Vorsicht geboten, da hier durch die geringere Schichtzahl oder Unterbrechungen der Lagen durch Freistriche sehr hohe zulässige Dehnungen resultieren und gleichzeitig die Zwischenschichthaftung reduziert.

## 7 Ausblick

Aus der bisherigen Forschung konnten folgende Defizite identifiziert werden: Aktuell fehlt es am Markt an Werkstoffen, welche intelligente oder reaktive Aufgaben erfüllen können. Gleichwohl zeigen Anstrengungen in der jüngsten Forschungsgeschichte, dass mit konventionellen Werkstoffen aufwendige SR-Strukturen durch additive Fertigungsmethoden gefertigt werden können. Im Rahmen dieses Beitrags erwies sich der Werkstoff TPU als potentiell wichtigster Werkstoff zur Realisierung von SR. Greifer aus diesem Werkstoff werden bereits heute in der Lebensmittelindustrie, z. B. als Handlinginstrument zum Transport von Eiern, erfolgreich eingesetzt. Für weitere Forschung an SR aus diesen Werkstoffen, kann zusätzlich zur Geometrienichtlinearität durch die reversible Volumenänderung bzw. -neuverteilung die hyperelastische Verformung von TPU genauer untersucht werden. Dieses sorgt für ein weiteres nichtlineares Verformungsverhalten. Durch Superpositionierung der degressiven und progressiven Nichtlinearitäten kann dann näherungsweise ein linearer Kraft-/ Verformungsverlauf entstehen, was die numerische Berechnung auch ohne exaktes Wissen über den Spannungs-Dehnungsverlauf eines Werkstoffes mit nichtlinearem Materialverhalten möglich machen kann. Hier sollte mittels simulativer Analyse ein entsprechendes Modell untersucht werden. Daneben erwies sich das ver-



wendete SMP als eine innovative Lösung zur Bewältigung von Fail-Safe-Problemen bei Handhabungsmaschinen. Um jedoch die Taktzeiten weiter zu verkürzen und den Wechsel der stabilen Zustände zu beschleunigen, sollte die Möglichkeit von eingebetteten Heiz- bzw. Kühlkanäle weiterverfolgt werden. Darüber hinaus wurden durch die Verbindung zwischen PLA und TPU Erkenntnisse zur Kontaktfestigkeit gewonnen. Um auch für dynamische Lastfälle belastbare Ergebnisse zu erhalten, sollten jedoch erweiterte fertigungsabhängige Variablen, wie Dämpfungskonstanten und Kontaktfestigkeit für die verwendeten Werkstoffe experimentell ermittelt werden. Weiterhin sollte der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz zur Konzipierung von additiv gefertigten SR durch erweiterte Studien mit anderen SR-Strukturen validiert und verglichen werden. ■

## Literatur

- [1] Thompson, M. K. et al.: Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals* Bd. 65 (2016) Nr. 2, S. 737–760.
- [2] Zolfagharian, A.; Kaynak, A.; Kouzani, A.: Closed-loop 4D-printed soft robots. *Materials & Design* (2020) Nr. 188.
- [3] Tondou, B.: Modelling of the McKibben artificial muscle: A review. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* Bd. 23 (2012) Nr. 3, S. 225–253.
- [4] Wickramatunge, K. C.; Leephakpreeda, T.: Study on mechanical behaviors of pneumatic artificial muscle. *International Journal of Engineering Science* Bd. 48 (2010) Nr. 2, S. 188–198.
- [5] Bruschi, A.; Donati, D. M.; Choong, P.; Lucarelli, E.; Wallace, G.: Dielectric Elastomer Actuators, Neuromuscular Interfaces, and Foreign Body Response in Artificial Neuromuscular Prostheses: A Review of the Literature for an In Vivo Application. *Advanced healthcare materials* Bd. 10 (2021) Nr. 13, e2100041.
- [6] Leng, X.; Hu, X.; Zhao, W.; An, B.; Zhou, X.; Liu, Z.: Recent Advances in Twisted-Fiber Artificial Muscles. *Advanced Intelligent Systems* Bd. 3 (2021) Nr. 5.
- [7] Landgraf, M.; Ollech, J.; Klemm, T.; Schauder, J.; Reitelshofer, S.; Franke, J.: Lightweight Control Method for Dielectric Elastomer Actuators as Self-Sensing Artificial Muscles. In: *IEEE-CBS 2018. 2018 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems*: October 25–27, 2018, Shenzhen, China. 10/25/2018 – 10/27/2018, Shenzhen, China. Piscataway, NJ: IEEE, 2018, S. 65–70.
- [8] Schlögl, T.; Leyendecker, S.: Dynamic Simulation of Dielectric Elastomer Actuated Multibody Systems. In: *Proceedings of the ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems – 2016. Presented at ASME 2016 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, September 28–30, 2016, Stowe, Vermont, USA. 9/28/2016 – 9/30/2016, Stowe, Vermont, USA. New York, N.Y.: The American Society of Mechanical Engineers, 2016.*
- [9] Pei, Z.; Xiong, X.; He, J.; Zhang, Y.: Highly Stretchable and Durable Conductive Knitted Fabrics for the Skins of Soft Robots. *Soft robotics* Bd. 6 (2019) Nr. 6, S. 687–700.
- [10] Lin, H.-T.; Leisk, G. G.; Trimmer, B. A.: Soft Robots in Space: A Perspective for Soft Robotics. *Acta Futura* (2013) Nr. 06, S. 69–79.
- [11] Amend, J.; Cheng, N.; Fakhouri, S.; Culley, B.: Soft Robotics Commercialization: Jamming Grippers from Research to Product. *Soft robotics* Bd. 3 (2016) Nr. 4, S. 213–222.
- [12] Rust, W.: *Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen. Kontakt, Geometrie, Material.* SpringerLink Bücher. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011.
- [13] Schmitt, F.; Piccin, O.; Barbé, L.; Bayle, B.: Soft Robots Manufacturing: A Review. *Frontiers in robotics and AI* Bd. 5 (2018), S. 84.
- [14] Maxwell, J. C.: L. On the calculation of the equilibrium and stiffness of frames. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* Bd. 27 (1864) Nr. 182, S. 294–299.
- [15] Calladine, C. R.: Buckminster Fuller's "Tensegrity" structures and Clerk Maxwell's rules for the construction of stiff frames. *International Journal of Solids and Structures* Bd. 14 (1978) Nr. 2, S. 161–172.
- [16] Blanding, D.: *Exact Constraint. Machine Design Using Kinematic Principles*, New York, N.Y.: ASME Press, 1999.
- [17] Raatz, A.: *Stoffschlüssige Gelenke aus pseudo-elastischen Formgedächtnislegierungen in Pararellrobotern. Schriftenreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig, Essen: Vulkan-Verl., 2006.*
- [18] Mayer, J.; Wartzack, S.: Ermittlung eines Skelettierungsverfahrens zur Konvertierung von Topologieoptimierungsergebnissen. In: *Proceedings of the 31st Symposium Design for X (DFX2020). 16–17 December 2020, Bamberg: The Design Society, 2020, S. 111–120.*
- [19] Zirbel, S. A.; Tolman, K. A.; Trease, B. P.; Howell, L. L.: Bistable Mechanisms for Space Applications. *PLOS ONE* Bd. 11 (2016) Nr. 12, e0168218.
- [20] Achleitner, J.; Wehrle, E.: On material selection for topology optimized compliant mechanisms. *Mechanism and Machine Theory* Bd. 167 (2022).
- [21] Tibbits, S.: Design to Self-Assembly. *Architectural Design* Bd. 82 (2012) Nr. 2, S. 68–73.
- [22] Lee, A. Y.; An, J.; Chua, C. K.: Two-Way 4D Printing: A Review on the Reversibility of 3D-Printed Shape Memory Materials. *Engineering* Bd. 3 (2017) Nr. 5, S. 663–674.
- [23] Miriyev, A.; Stack, K.; Lipson, H.: Soft material for soft actuators. *Nature communications* Bd. 8 (2017) Nr. 1.
- [24] DIN EN ISO/ASTM 52900:2021: *Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie*: Beuth Verlag, 2021.
- [25] Skylar-Scott, M. A.; Mueller, J.; Visser, C. W.; Lewis, J. A.: Voxellated soft matter via multimaterial multi-nozzle 3D printing. *Nature* Bd. 575 (2019) Nr. 7782, S. 330–335.
- [26] Watschke, H.; Kuschmitz, S.; Heubach, J.; Lehne, G.; Vietor, T.: A Methodical Approach to Support Conceptual Design for Multi-Material Additive Manufacturing. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design* Bd. 1 (2019) Nr. 1, S. 659–668.
- [27] Beate Bender; Kilian Gericke: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung.* 9. Aufl. 2021, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021.
- [28] MatWeb (30.03.2022): Property Data. Internet: <https://www.matweb.com/index.aspx>. Abgerufen am: 30.03.2022.
- [29] Recreus (15.03.2022): Filaflex 60A Datasheet. Recreus. Internet: <https://drive.google.com/drive/1d1VAb1akoa67MWqMqA0H0Zt3Rm9K5AW>.
- [30] Delacamp AG (30.03.2022): Technical Data Sheet. SMP55, Hamburg. Internet: [https://www.convena-polymers.de/media/public/db/media/1/2021/01/41/tds\\_-\\_smp\\_filament\\_-\\_202101\\_v\\_2\\_1.pdf](https://www.convena-polymers.de/media/public/db/media/1/2021/01/41/tds_-_smp_filament_-_202101_v_2_1.pdf).
- [31] Silikonfabrik (29.03.2022): Produktseite des Herstellers. SF00 – RTV2 Silikon (Silikonkautschuk). Internet: <https://www.silikonfabrik.de/silikon/ne/sf-silikon/sf00-rtv2-silikon-silikonkautschuk.html?number=SF00-000-40000>.
- [32] Eyerer, P.; Dominghaus, H. (Hrsg.): *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften. 6., neu bearb. und erw. Aufl.*, Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch). Internet: <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz/113129734cov.htm>. 2005.
- [33] Scalet, G.: Two-Way and Multiple-Way Shape Memory Polymers for Soft Robotics: An Overview. *Actuators* Bd. 9 (2020) Nr. 1, S. 10.
- [34] Delacamp AG (30.03.2022): Printing Guidelines. SMP55, Hamburg. Internet: [https://www.convena-polymers.de/media/public/db/media/1/2021/01/41/printing\\_guideline\\_-\\_smp\\_filament\\_-\\_202101\\_v\\_1\\_0.pdf](https://www.convena-polymers.de/media/public/db/media/1/2021/01/41/printing_guideline_-_smp_filament_-_202101_v_1_0.pdf).
- [35] Tower Pro (31.03.2022): Servo Motor SG90 Datasheet. Internet: <https://datasheetspdf.com/pdf/791970/TowerPro/SG90/1>.
- [36] AI-Thinker team. (31.03.2022): ESP8266 Datasheet. Internet: <https://components101.com/sites/default/files/2021-09/ESP12E-Datasheet.pdf>.



**Patrick Steck, M.Sc.**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
[steck@mfk.fau.de](mailto:steck@mfk.fau.de)

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik KTmfk  
Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen Nürnberg  
Paul-Gordan-Str. 5, 91052 Erlangen

Prof. Dr.-Ing. **Sandro Wartzack**  
Lehrstuhlinhaber  
[wartzack@mfk.fau.de](mailto:wartzack@mfk.fau.de)

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik KTmfk  
Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg  
Martensstr. 9, 91058 Erlangen



**MACsec Controller IP-Core:** Authentifizierung, Vertraulichkeit und Integrität von Daten zwischen Knoten in einem Ethernet-Netzwerk. (Foto: Fraunhofer IPMS)

## NEUER CONTROLLER IP-CORE FÜR SICHERE DATEN

Die Sicherheit von Daten ist eines der wichtigsten Themen im heutigen digitalen Zeitalter. Zunehmende Systemangriffe und Cyberkriminalität machen es erforderlich, Daten auf neue Arten zu sichern. Dafür entwickelte das Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme IPMS den MACsec Controller IP-Core, welcher die neuesten Ethernet-Sicherheitsstandards implementiert. Er sorgt für Authentifizierung, Integrität und Verschlüsselung von Daten zwischen verschiedenen Knoten eines Local Area Networks (LAN).

Das Fraunhofer IPMS entwickelt und lizenziert seit 20 Jahren IP-Cores an Unternehmen aus verschiedensten Branchen der Welt. Ein Großteil der Kunden kommt aus dem Bereich Automotive, Aerospace und der Fertigungsindustrie. Die zunehmende Digitalisierung und die damit steigende Gefahr von Cyberangriffen machen eine fortwährende Anpassung und Weiterentwicklung von IP-Cores notwendig. Nur so kann auch in Zukunft die Sicherheit von Daten gewährleistet werden.

Der neueste Controller IP-Core Media Access Control Security (MACsec) implementiert den in der IEEE 802.1AE spezifizierten Layer 2 Sicherheitsstandard. „MACsec schützt Ethernet-Verbindungen auf der zweiten Schicht des OSI-Modells, indem es eine Kombination aus Authentifizierung, Verschlüsselung und Integritätsschutz nutzt, um sicherzustellen, dass nur autorisierte Knoten auf dem Netzwerk kommunizieren, der Datenverkehr vertraulich und die Datenintegrität gewahrt bleibt“, erläutert Dr. Frank Deicke, Division Director DCC des Fraunhofer IPMS.

Der MACsec kann sowohl mit dem LLEMAC IP-Core des Fraunhofer IPMS, als auch jedem anderen Ethernet MAC IP-Core sowie im Standalone-Betrieb verwendet werden. Durch die Plattformunabhängigkeit ist eine einfache Systemintegration möglich, so dass der MACsec auf jeden FPGA als auch ASIC integriert werden kann.

Der MAC-SEC Controller IP Core unterstützt Datenraten bis zu 10G und implementiert den IEEE 802.1AE-2018 Layer 2 Sicherheitsstandard für Authentifizierung, Vertraulichkeit und Integrität zwischen LAN-Hosts. MACsec erlaubt autorisierten Knoten die Kommunikation, verschlüsselt übertragene Daten für Vertraulichkeit und bietet kryptografische Mechanismen zur Sicherstellung der Datenintegrität. Er ist kompatibel mit dem LLEMAC-IP-Core des Fraunhofer IPMS, jedem anderen Ethernet-MAC-IP-Core oder kann als eigenständige Lösung betrieben werden.

Der MACsec IP Core kann plattformunabhängig für alle FPGA-Plattformen und jede Foundry-Technologie zur Verfügung gestellt werden. Das Fraunhofer IPMS bietet außerdem Services, um IP-Cores zu erweitern, als auch komplette kundenspezifische Subsysteme zu entwickeln.

[www.ipms.fraunhofer.de](http://www.ipms.fraunhofer.de)

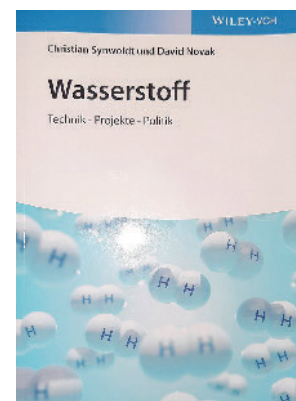
## Wasserstoff

### Technik – Projekte – Politik

Wasserstoff ist nicht nur das häufigste Element im Universum, es etabliert sich zunehmend als zukunftsweisender Energieträger. Spätestens durch die Wasserstoffstrategie der Bundesregierung ist das Thema der breiten Öffentlichkeit ein Begriff. Einen umsetzungsorientierten Überblick über Technologie, Anwendungen und Ökonomie des alternativen Energieträgers liefert das Buch von Christian Synwoldt und David Novak. Beide Autoren sind langjährige Berater im Energiebereich und erfahrene Hochschuldozenten. Ihr Buch bringt technologische, wirtschaftliche und politische Aspekte zusammen. Der Technologie-Teil behandelt die chemischen und physikalischen Eigenschaften, die Herstellung von Wasserstoff im industriellen Maßstab, dessen Transport und Speicherung sowie die Hauptanwendungsfelder Mobilität, Elektrizitätsversorgung und Wärmeversorgung. Der Ökonomie-Teil widmet sich den staatlichen und privatwirtschaftlichen Aktivitäten in Deutschland und Europa, die eine Ausweitung des Wasserstoffanteils am Energiemix zum Ziel haben. Das Buch eignet sich ebenso im Studium der Technik-, Umwelt- und Wirtschaftswissenschaften wie auch in der Nachhaltigkeitsforschung in Wissenschaft und Praxis, der Lehre sowie für Interessierte in Politik und Wirtschaft.

*Christian Synwoldt, David Novak: Wasserstoff. Technik – Projekte – Politik.*

Wiley VCH 2022. 519 Seiten, ISBN 978-3-527-34988-3, 79,90 Euro.



**Wasserstoff** – 519 Seiten – 79,90 Euro. (Foto: Wiley VCH)