

Energieeffizienter, adaptiver Sauggreifer für medizintechnische und pharmazeutische Produkte

Griebel, Stefan*; Keller, Christian**; Zentner, Lena*

* TU Ilmenau, Fakultät Maschinenbau, Fachgebiet Mechanismentechnik

Stefan.Griebel@tu-ilmenau.de

Lena.Zentner@tu-ilmenau.de

** ZF Friedrichshafen AG, Nutzfahrzeugtechnik, Geschäftsfeld Nkw-

Antriebsstrangmodule, Entwicklung Kupplungsscheibe & ZMS

Christian.Keller2@zf.com

Kurzfassung

Beim Sauggreifen von medizintechnischen und pharmazeutischen Produkten wird das Hygienierisiko verringert, wenn das Saugmittel vom Umgebungsmittel getrennt ist. Hierzu wurde ein geschlossener Sauggreifer mit instabilem Verformungsverhalten entwickelt. Der Sauggreifer hat einen Durchmesser von 21 mm und eine Höhe von 28 mm. Er kann u. a. eine ungenaue Greifobjektposition ausgleichen und einen erfolgreichen Greifprozess anzeigen. Zehn spritzgegossene Funktionsmuster wurden hergestellt und untersucht. Bei einem Unterdruck von 600 mbar wird eine Saugkraft von $9.85 \text{ N} \pm 0.06 \text{ N}$ bei ebenen und $9.44 \text{ N} \pm 0.11 \text{ N}$ bei zylindrischen Objekten ($R = 25 \text{ mm}$) erreicht.

Abstract

During suction gripping process of medical and pharmaceutical products, the risk of contamination is reduced if the suction medium is separated from the surrounding medium. For this purpose a closed suction gripper with unstable deformation behavior was developed. The suction gripper has a diameter of 21 mm and a height of 28 mm. It may,

inter alia, compensate an inaccurate position of the gripping object and signalize a successful gripping process. Ten functional models were manufactured by injection molding and then tested. At a negative pressure of 600 mbar, a suction force of $9.85 \text{ N} \pm 0.06 \text{ N}$ for flat and $9.44 \text{ N} \pm 0.11 \text{ N}$ for cylindrical objects ($R = 25 \text{ mm}$) is reached.

1 Einführung

Bei herkömmlichen Sauggreifern wird das Medium zur Unter- sowie Überdruckerzeugung im Maschinenraum (Saugmittel) nicht von dem das Greifobjekt umgebenden Medium im Prozessraum (Umgebungsmittel) getrennt. Hierdurch kann sich das unter Umständen kontaminierte Saugmittel mit dem Umgebungsmittel vermischen und mit dem Greifobjekt in Berührung kommen. Dies stellt in der Verpackungsindustrie von medizintechnischen und pharmazeutischen Produkten (wie bspw. Spritzen nach DIN ISO 11040-4, Pen-Gläsern nach DIN ISO 13926-1, Vials nach DIN EN ISO 8362-4, Injektionsflasche nach DIN EN ISO 8362-1, Infusionsflaschen nach DIN EN ISO 8536-1) ein Hygienerisiko dar.

Die aus dem Stand der Technik bekannten Sauggreifer sind monolithisch oder hybrid (mehrteilig) aufgebaut. Weiterhin können Sauggreifer in offene und einseitig geschlossene Sauggreifer eingeteilt werden. Die in der Verpackungsindustrie favorisierten Lösungen sind offene Sauggreifer. Bei diesen wird ein Saugmittelstrom verwendet, der z. T. kontinuierlich oder über zusätzliche Taster oder anderweitige zusätzliche Sensorik gesteuert und erzeugt wird. Vorteil dieser offenen Sauggreiferlösungen ist, dass auftretende Leckvolumenströme über das Steuern des absaugenden Volumenstromes kompensiert werden und so eine genügend große Saugwirkung zwischen Sauggreifer und Greifobjekt erhalten bleibt. Diese Betriebsweise ist weniger energieeffizient, dennoch können hierdurch Taktzeiten reduziert werden, da weniger Präzision im Ablauf notwendig ist. Im Gegensatz dazu weisen einseitig geschlossene Sauggreifer eine zum Greifobjekt gerichtete Membran auf oder sie sind kappenartig ausgeformt. Durch das Aufsetzen auf ein Greifobjekt entsteht ein Ausgangsvolumen im Zwischenraum zwischen Sauggreifer und Greifobjekt, welches für einen erfolgreichen Greifvorgang abgeschlossen sein muss. Wirkt anschließend eine Kraft mittig oder flächig auf die Kappe bzw. Membran, die dieses Volumen im Zwischenraum vergrößert, so

entfaltet sich die Saugwirkung. Diese Volumenvergrößerung kann passiv über die Eigensteifigkeit des Sauggreifers, aktiv mittels eines zweiten Unterdruckraumes (Maschinenraum) oder ebenfalls aktiv mittels Antriebe an der Membran bzw. Kappe erfolgen. Vorteil einer derartigen Lösung ist, dass der Prozessraum vom Maschinenraum getrennt ist. Gibt es jedoch einen Leckvolumenstrom, führt dies prinzipbedingt zum Verlust der Saugkraft und somit zum Verlust der Hauptfunktion des Sauggreifers. Aus diesem Grund muss der Sauggreifer auf das Greifobjekt abgestimmt sein bzw. kann Dichtkanten oder Dichtlippen oder auch äquatoriale bzw. radiale/meridionale Versteifungen aufweisen.

Heutige Sauggreifer sollen weitere Nebenfunktionen, wie das Ausgleichen einer ungenauen Position zwischen Sauggreifer und dem Greifobjekt, das aktive und gezielte Ablegen eines gegriffenen Saugobjektes bzw., im Fall von wirkenden Adhäsionskräften zwischen Sauggreifer und Greifobjekt, das aktive Überwinden dieser sowie das Anzeigen des Greifstatus, erfüllen.

Ziel des Beitrages ist es, einen monolithischen Sauggreifer zu entwickeln und zu untersuchen, der neben der Hauptfunktion des Sauggreifens ebenfalls alle Nebenfunktion erfüllt.

2 Design des Sauggreifers

2.1 Anforderungen

Der zu entwickelnde Sauggreifer soll alle unter Kap. 1 genannten Nebenfunktionen erfüllen und somit multifunktionell sein. Weiterhin soll er einer Druckdifferenz zwischen Umgebungsmittel und Saugmittel von 600 mbar standhalten und einen zylindrischen Glaskörper mit einem Durchmesser von 50 mm sauggreifen können. Der Sauggreifer soll so nachgiebig sein, dass die Schattenfläche des Sauggreifers vom kreisförmigen Zylinderquerschnitt einen Mittelpunktwinkel von 50° abdeckt. Darüber hinaus soll die geometrische Form möglichst einfach sein und somit eine minimale Anzahl von geometrischen Parametern aufweisen. Ferner soll der Sauggreifer monolithisch und somit einteilig sein.

2.2 Geometrischer Aufbau des Sauggreifers

Das Design des entworfenen Sauggreifers ist in der Abbildung 1 dargestellt. Der Sauggreifer ist monolithisch ausgeführt und befindet sich fertigungsbedingt im Grund- bzw. Ausgangszustand im mechanisch spannungslosen Zustand und ist somit frei von plastischer Verformung. Es handelt sich um ein einseitig offenes, zylindrisches Hohlraumelement mit der Höhe h_s und dem Außendurchmesser D_{Sa} .

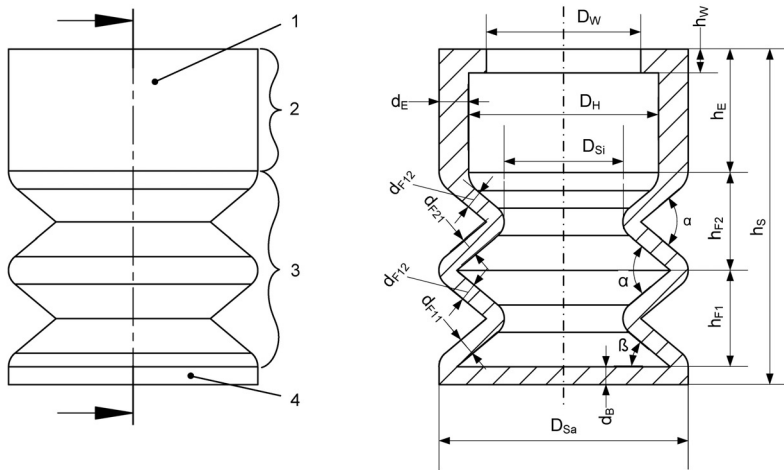


Abb. 1: Sauggreifer in der Seiten- und Schnittansicht: (1) Sauggreifer; (2) obere, offene Teilstruktur; (3) mittlere, faltenbalgförmige Teilstruktur; (4) Sauggreiferboden

Die Mantelstruktur besteht aus einer oberen, offenen Teilstruktur, einer mittleren, faltenbalgförmigen Teilstruktur und einem Sauggreiferboden. Die obere, offene Teilstruktur mit der Höhe h_E und der Wandstärke d_E dient der Befestigung des Sauggreifers an einer kommerziell verfügbaren Halterung mit dem Durchmesser D_H . Für eine formschlüssige Verbindung weist die obere Teilstruktur zusätzlich eine umlaufende Wulst mit dem Durchmesser D_W und der Höhe h_W auf. Die mittlere Teilstruktur besteht aus zwei Falten der Höhe h_{F1} und h_{F2} , mit den Faltenwinkeln α sowie den Dicken der ersten Falte d_{F11} und d_{F12} und den Dicken der zweiten Falte d_{F21} und d_{F22} . Weiterhin werden die Falten über den inneren und äußeren Durchmesser des Sauggreifers, D_{Si} und D_{Sa} , begrenzt. Ferner gibt es abgerundete Übergänge zwischen

den Falten und Teilstrukturen des Sauggreifers. Der Sauggreifer ist über einen kreisrunden, ebenen Sauggreiferboden, der sich stoffschlüssig an die mittlere Teilstruktur anschließt und gemeinsam mit dieser den Fußwinkel β bildet, einseitig verschlossen. Der Sauggreiferboden weist eine Dicke d_B auf.

Abgeleitet aus der Anforderung für die gewünschte Nachgiebigkeit (vgl. Kap. 2.1) wird der äußere Durchmesser des Sauggreifers D_{Sa} mit Hilfe der Formel (1) zur Berechnung der Kreissehne ermittelt:

$$D_{Sa} = 2R \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (1)$$

Bei einem Mittelpunktwinkel φ von 50° und einem Greifobjektradius R von 25 mm ergibt sich somit ein äußerer Durchmesser D_{Sa} von 21 mm. Alle weiteren geometrischen Parameter werden mit Hilfe modellbasierter Untersuchungen ermittelt (siehe Kap. 3.2).

Durch das vorgeschlagene Design des Sauggreifers wird das Umgebungsmittel vom Saugmittel getrennt.

3 Simulation des nachgiebigen Sauggreifers

3.1 Modellbildung

Für die Simulation wurde in SolidWorks 2014 ein parametrisiertes Modell entworfen, welches in Ansys® 15.07 eingelesen wurde. Es wurde für das später verwendete Silikon (Elastosil® M 4644, Wacker Chemie AG, München, Deutschland) im Modell das nichtlineare Materialgesetz, Ogden 2. Ordnung gewählt. Diesem lagen Messdaten aus einem durchgeführten uniaxialen Zugversuch und einem pure shear Versuch jeweils mit einer Maximaldehnung von 50% zugrunde [1]. Die verwendeten Materialkonstanten sind in der Tabelle 1 aufgelistet.

Tab. 1: Ermittelte Materialkonstanten für das Materialgesetz Ogden 2. Ordnung zur Simulation des verwendeten Silikons Elastosil® M 4644

Materialkonstante	μ_1	α_1	μ_2	α_2
Wert	0.00176 MPa	11.915	0.8285 MPa	0.9777

Als Modell diente ein 3D-Viertelmodell eines Sauggreifers und eines Greifobjektes, welches aus ca. 22000 Solid 187 Tetraeder Elementen ohne Mittenknoten aufgebaut wurde. Es wurde jeweils eine quasistatische Analyse durchgeführt, wobei die obere Teilstruktur des Sauggreifers fest eingespannt wurde. Alle Symmetrieflächen wurden mit einer reibungslosen Einspannung versehen. Um die passive Kennlinie des Sauggreifers beim Zusammendrücken zu ermitteln, wurde eine zur Greiferlängsachse senkrecht liegende ebene Platte bzw. ein Ausschnitt aus einer zylindrisch geformten Platte ($R = 25 \text{ mm}$), der als Material Stahl zugewiesen wurde, gegen die Unterseite des Greiferbodens bewegt und der Sauggreifer zusammengefaltet. Es wurde ein reibungsbehafteter Kontakt mit einem Reibkoeffizienten μ_r von 2.2 gewählt, der die Reibpaarung zwischen Glas und Silikon beschreibt [2]. Der Kontakt des Sauggreifers mit sich selbst wurde vereinfacht als reibungsloser Kontakt behandelt. Ausgewertet wurden der Kontaktstatus zwischen Sauggreifer und Greifobjekt, die Spaltbreite am Rand des Sauggreiferbodens zwischen einem zylindrisch gewölbten Greifobjekt und dem Greiferboden, das Verformungsverhalten des Sauggreifers und die maximale Hauptdehnung. Um eine passende Stelle für die Sensorisierung des Sauggreifers zu finden, wurde zum einen der Sauggreifer ohne Greifobjekt simuliert. Hierbei wurden alle innenliegenden Flächen mit einem Unterdruck von 600 mbar belastet. Zum anderen wurde der Sauggreifer mit Greifobjekt und einem Unterdruck auf allen innenliegenden Flächen simuliert. Weiterhin wurde die vom Kontaktring begrenzte, innenliegende Fläche auf dem Sauggreiferboden und dem Greifobjekt in einer Vorabsimulation bestimmt, im entsprechendem CAD-Modell hinterlegt und ebenfalls mit dem Unterdruck von 600 mbar belastet.

3.2 Festlegung der konkreten Geometrieparameter

Um den Faltenwinkel α , den Winkel β zwischen Greiferboden und der ersten Falte (Fußwinkel), den Innendurchmesser des Sauggreifers D_{Si} , die Dicke d_B des Greiferbodens sowie die Faltendicke d_{F11} , d_{F12} , d_{F21} und d_{F22} festzulegen, wurden diese geometrischen Parameter des Sauggreifers systematisch in einer Parameterstudie variiert. Ausgewertet wurden die Spaltbreite b_s am Rand des Greiferbodens zwischen einem zylindrisch gewölbten Greifobjekt und dem

Greiferboden mit dem Ziel der Minimierung (vgl. Abbildung 2a), die wirksame Saugfläche innerhalb des sich bei Kontakt ausbildenden Kontakttrings zwischen zylindrischem Greifobjekt und dem Greiferboden mit dem Ziel der Maximierung (Auswertung des Kontaktstatus, vgl. Abbildung 2b und 2c) und das charakteristische Verformungsverhalten des Sauggreifers mit dem Ziel einer monostabilen Kennlinie mit Durchschlag (vgl. Abbildung 2d).

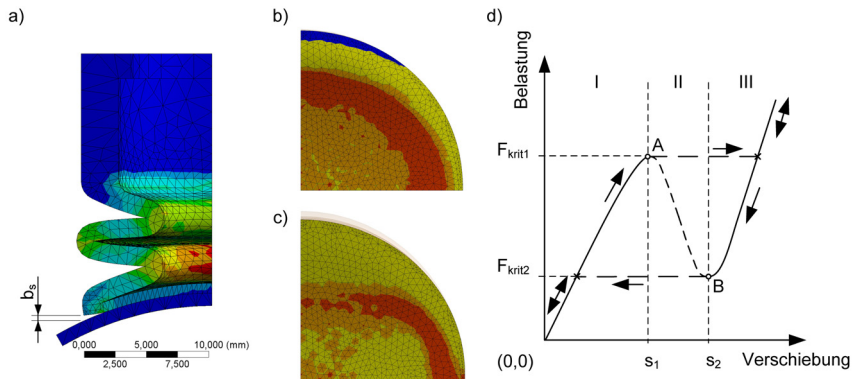


Abb. 2: Auswertungsgrößen: a) Spaltbreite b_s zwischen Rand des Greiferbodens und einem zylindrisch gewölbten Greifobjekt; Kontaktstatus des Greiferbodens beim Saugprozess eines zylindrischen Greifobjektes: b) vollständig ausgebildeter, elliptischer Kontakttring (erfolgreiches Ansaugen); c) abreißender Saugkontakt (unterbrochener Kontakttring); d) monostabile Durchschlag-Kennlinie mit Kennzeichnung der charakteristischen Durchschlagpunkte A (s_1 ; F_{krit1}) und B (s_2 ; F_{krit2}) sowie der stabilen Bereiche I und III und des instabilen Bereiches II

Die geometrischen Parameter wurden wie folgt modellbasiert festgelegt:

- $D_{Si} = 10$ mm (innerhalb der betrachteten Grenzen von 5 bis 10 mm stellte sich im Vergleich die meisten haftenden Kontakte ein, ebenso erleichtert ein großer Innendurchmesser die Entformbarkeit des Sauggreifers vom Formkern)
- der Fußwinkel β ist mit $\alpha/2$ zu wählen (innerhalb der betrachteten Grenzen von 10° bis 50° führte dies zu der geringsten Spaltbreite und zu einem günstigen Zusammenfallen des Sauggreifers bei Unterdruckbeaufschlagung; größere Winkel begünstigen zudem das spätere Entformen vom Formkern)

- $\alpha = 80^\circ$ (innerhalb der betrachteten Grenzen von 30° bis 90° bietet dieser Wert einen Kompromiss aus Stabilität der Struktur bei Unterdruckbelastung, günstigem Anschmiege- und Verformungsverhalten; im Allgemeinen begünstigen größere Winkel das Entformen vom Formkern)
- alle Wandstärken d_B und d_{Fij} mit $i = 1, 2$ und $j = 1, 2$ werden aufgrund der vorhandenen Laborbedingungen und der zu erwartenden Fertigungstoleranz von ± 0.1 mm größer gleich 1 mm gewählt
- das Verhältnis der Strukturdicken $d_B : d_{F11} : d_{F12} : d_{F21} : d_{F22}$ ist mit $2 : 3 : 2 : 4 : 4$ zu wählen (dies führt zu einer ausgeprägten monostabilen Kraft-Verschiebung-Kennlinie)
- h_S ergibt sich zu 28 mm bei Verwendung einer skalierten, kommerziell verfügbaren Sauggreifer-Halterung

4 Herstellung der Funktionsmuster

4.1 Anforderungen

Um die Funktionsmuster des ausgewählten Designs herzustellen, soll das Spritzgießen verwendet werden. Hierzu ist ein Formwerkzeug zu entwickeln. Als Material soll ein handelsübliches 2-Komponenten-Silikon mit einer Shore-Härte A von 40 verwendet werden. Es sollen mindestens zehn Funktionsmuster hergestellt werden.

4.2 Formwerkzeug

Für die Herstellung der Funktionsmuster wurde ein Formwerkzeug entworfen, welches in Abbildung 3 dargestellt ist.

Die beiden Formwerkzeugeinsätze, die die Außenform der Funktionsmuster bilden, wurden mittels Rapid Prototyping im Schmelzschichtungsverfahren (Dimension Elite, alphacam GmbH, Schorndorf, Deutschland) hergestellt.

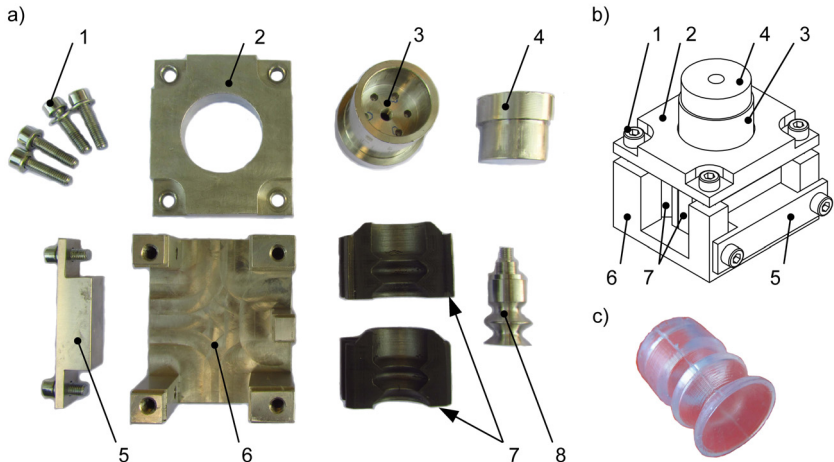


Abb. 3: a) Einzelteile des Formwerkzeuges: (1) Innensechskantschrauben, (2) Deckel, (3) Formwerkzeugeinsatz mit Reservoir, (4) Stempel, (5) Fixierblock, (6) Rahmen, (7) Formwerkzeugeinsätze (Außenkontur des Sauggreifers), (8) Formkern (Innenkontur des Sauggreifers); b) Isometrische Ansicht des zusammengebauten Formwerkzeuges; c) entformtes Funktionsmuster

Um ein starkes Anhaften des Silikons an den Formwerkzeugeinsätzen zu verhindern, wurden diese Bauteile nachbearbeitet. Hierfür wurden die Innenseiten, die die Außenkontur der Funktionsmuster abbilden, mit handelsüblichem Klarlack lackiert. Dies trug u. a. zu einer Glättung der schichtweise aufgebauten Formwerkzeugeinsätze bei. Alle anderen Bestandteile des Formwerkzeuges wurden aus Aluminium gefertigt.

4.3 Spritzgießen

Zur Herstellung der Funktionsmuster wurde das Formwerkzeug zusammengebaut und das gemischte und anschließend entlüftete 2-Komponenten-Silikon in den Formwerkzeugeinsatz mit Reservoir gefüllt. Anschließend wurde mit Hilfe einer Druckkraft auf den Stempel das Silikon in das Formwerkzeug eingespritzt. Nach einer Vulkanisationszeit von 12 h wurden die Funktionsmuster entformt.

Um die Funktionsmuster zu entformen, mussten diese vom einteiligen Formkern durch Umlegen auf die linke Seite abgezogen werden. Hierdurch war es nicht zu verhindern, dass die Funktionsmuster

vorgedehnt wurden. Nach der Entformung wurden alle Angüsse mittels eines Cuttermessers entfernt.

Mit dem gewählten Herstellungsverfahren konnten zehn Funktionsmuster hergestellt werden. Das Spritzgießen erwies sich somit als geeignetes Herstellungsverfahren.

5 Untersuchung der Funktionsmuster

5.1 Versuchsaufbau

Um die Saugkraft der Funktionsmuster für ein ebenes und ein zylindrisch gewölbtes ($R = 25 \text{ mm}$) Greifobjekt zu bestimmen, wurde die in Abbildung 4 dargestellte Versuchsanordnung verwendet. Mit dieser Anordnung konnten ebenfalls die notwendige Andruckkraft sowie die passive Kennlinie der Funktionsmuster bestimmt werden.

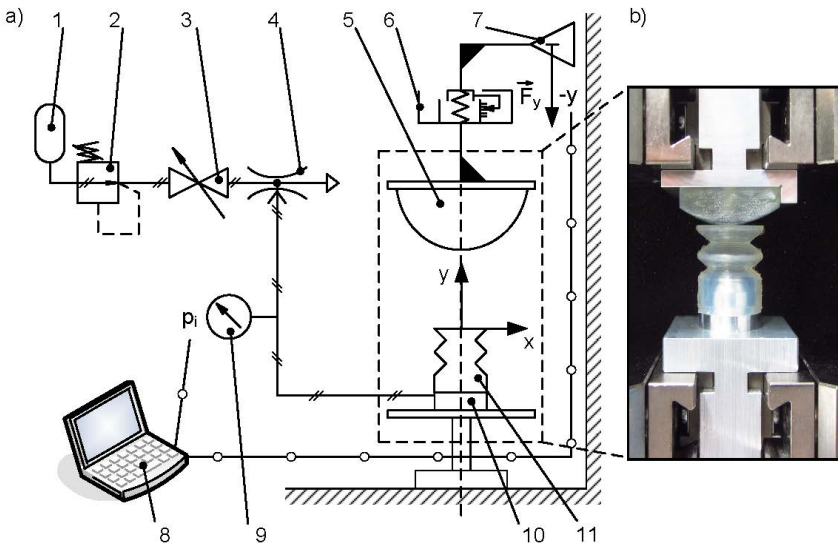


Abb. 4: a) Prinzipdarstellung der Versuchsanordnung: (1) Druckluftversorgung, (2) manueller Druckminderer, (3) Absperrventil, (4) Vakuumsaugdüse, (5) Dummy-Greifobjekt, (6) Kraftsensor, (7) Material-Prüfmaschine, (8) PC, (9) Drucksensor, (10) Sauggreifer-Halterung mit Druckluftanschluss, (11) Sauggreifer; b) Ausschnitt der realen Versuchsanordnung

Das Greifobjekt wurde mit Hilfe der pneumatischen Spannbacken fixiert. Als ebenes Greifobjekt diente ein polierter Halter aus Aluminium. Als zylindrisch gewölbtes Greifobjekt diente ein im Stereolithografie Verfahren aus klarem Kunstharz (Form1+, Formlabs Inc., Sommerville, Vereinigte Staaten) hergestellter und anschließend polierter Probekörper (Zylindersegment) mit einem Radius R von 25 mm. Die Funktionsmuster der Sauggreifer wurden auf einer Sauggreifer-Halterung mit Druckluftanschluss befestigt, welche mit dem zweiten Satz Spannbacken der Material-Prüfmaschine (ProLine Tisch-Prüfmaschine Z005, Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland) fixiert wurden. Der von der Druckversorgung bereitgestellte Überdruck wurde manuell vom Bediener über einen handelsüblichen Druckminderer derart eingestellt, dass über die verwendete Vakuumsaugdüse (VAD – 1/8, Festo AG & Co. KG, Esslingen, Deutschland) gezielt der gewünschte Unterdruck von 600 mbar erzeugt werden konnte. Der vorhandene Unterdruck im Sauggreifer wurde mit einem Drucksensor (MPX5100AP, Freescale Halbleiter Deutschland GmbH, München, Deutschland) gemessen. Die Verschiebung in Richtung negativer y -Achse, die dazugehörige Kraft F_y und der Unterdruckwert p_i wurden mit der Material-Prüfmaschine aufgezeichnet. Am Anfang jedes Versuches wurde der Abstand zwischen Greifobjekt und Sauggreifer bis auf null reduziert. Anschließend wurde die Kraftanzeige genullt. Im Falle der Bestimmung der passiven Kennlinie wurde das Greifobjekt in negativer y -Richtung und somit in Richtung des Sauggreifers um den Weg $s_y = 7$ mm mit einer Geschwindigkeit von 25 mm/min verschoben. Im Falle der Bestimmung der notwendigen Andruckkraft (für die Ausbildung eines geschlossenen Kontaktringes, vgl. Abb. 2b) wurde eine Schrittweite von 0.5 mm gewählt. Nach jedem Schritt wurde das Absperrventil betätigt, hierdurch der Sauggreifer mit einem eingestellten Unterdruck von 600 mbar belastet und anschließend geprüft, ob sich eine Saugkraft zwischen Sauggreifer und Greifobjekt einstellt. Nach dem letzten Schritt wurde unter Beibehaltung des Unterdruckes die Ausgangsposition mit einer Geschwindigkeit von 25 mm/min angefahren. Im Falle der Bestimmung der Saugkraft wurde ein Weg s_y von 8 mm gewählt, da in dieser Position der Sauggreifer zusammengefaltet ist und sich eine Saugkraft bei dem ebenen und auch bei dem zylindrisch gekrümmten Greifobjekt sicher einstellt. Diese Position wurde für 5 s gehalten, um anschließend den Kraftwert zu ermitteln. Kurz darauf wurde das Absperrventil geöffnet, der Unterdruck

konnte sich einstellen und nach weiteren 5 s wurde erneut der Kraftwert ermittelt. Die Differenz der beiden Kraftwerte wurde als Saugkraft interpretiert. Anschließend wurde die Ausgangsstellung des Greifobjektes und des Sauggreifers mit anliegendem Unterdruck mit einer Geschwindigkeit von 25 mm/min angefahren und die Kraft-Verschiebung-Kennlinie ermittelt.

5.2 Bestimmung der passiven Kennlinie

Um die passive Kennlinie (ohne Unterdruck) des Sauggreifers zu bestimmen wurden zehn Funktionsmuster mit der in Abbildung 4 dargestellten Versuchsanordnung und der in Kapitel 5.1 beschriebenen Versuchsdurchführung untersucht. Die Abbildung 5 zeigt die Grenzen der passiven Kraft-Verschiebung-Kennlinie, und somit das Toleranzband in dem sich alle Kraft-Verschiebungs-Kennlinien der hergestellten Funktionsmuster bewegen, und die gemittelte charakteristische Kraft-Verschiebung-Kennlinie der Funktionsmuster.

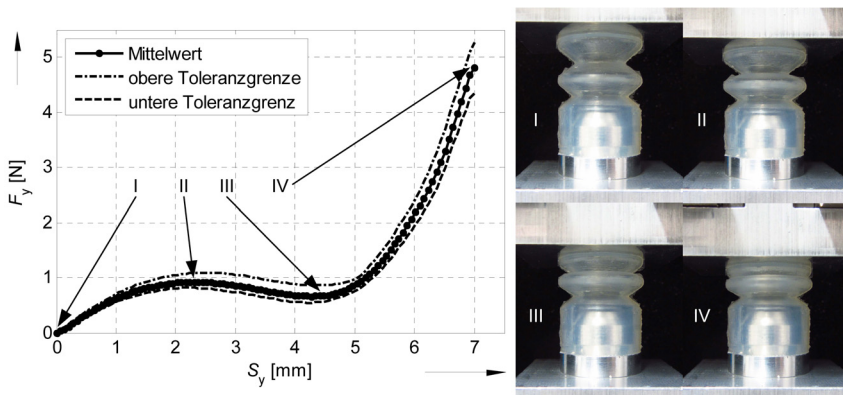


Abb. 5: Toleranzband und mittlere passive Kraft-Verschiebung-Kennlinie der zehn Funktionsmuster; I Ausgangsverformung ($s_y = 0$ mm); II Verformungsbild beim Erreichen des oberen Durchschlagpunktes; III Verformungsbild beim Erreichen des unteren Durchschlagpunktes; IV Endverformung ($s_y = 7$ mm)

Zu sehen ist, dass die gemittelte Kraft-Verschiebung-Kennlinie bis zu einem Verschiebungswert von ca. 2.3 mm auf den kritischen Kraftwert von 0.9 N ansteigt (oberer Durchschlagpunkt), anschließend fällt die Kennlinie bis zu einem Verschiebungswert von 4.3 mm und einem zweiten kritischen Kraftwert von 0.7 N ab (unterer Durchschlagpunkt),

um anschließend weiter streng monoton bis zu einem Verschiebungswert von 7 mm auf ein Kraftmaximum von ca. 4.8 N anzusteigen. Die Kennlinie weist somit ein instabiles Verformungsverhalten mit Durchschlag auf. Dies bedeutet, dass es bestimmte Belastungen gibt, denen mehrere Gleichgewichtslagen entsprechen [3], [4].

5.3 Bestimmung des notwendigen Andruckweges

Um den notwendigen Andruckweg und somit die notwendige Andruckkraft zwischen dem Sauggreifer und dem Greifobjekt in Abhängigkeit der Wölbung des Greifobjektes zu bestimmen, wurde ein Funktionsmuster mit der in Abbildung 4 dargestellten Versuchsanordnung und der in Kapitel 5.1 beschriebenen Versuchsdurchführung mehrfach untersucht.

Bei der Bestimmung des notwendigen Andruckweges bei ebenen Greifobjekten konnte Folgendes festgestellt werden:

- bei einem geringen Andruckweg von 0.5 mm und einer damit verbundenen geringen Andruckkraft unter 0.5 N konnte sich immer ein geschlossener Kontaktring ausbilden und bei Unterdruck von 600 mbar eine Saugwirkung entfalten;
- bei einem Andruckweg unter 2 mm kollabiert der Sauggreifer bei Unterdruck während sich dennoch eine Saugwirkung einstellt;
- bei einem Andruckweg ab 2 mm und ab einer Andruckkraft von ca. 1 N kann mit einem stabilem Verhalten des Sauggreifers bei Unterdruck von 600 mbar gerechnet werden;

Bei der Bestimmung des notwendigen Andruckweges bei einem gekrümmten Greifobjekt ($R = 25\text{mm}$) konnte Folgendes festgestellt werden:

- ab einen Andruckweg von 7.5 mm kann sich zuverlässig ein geschlossener Kontaktring ausbilden und eine Saugkraft bei Unterdruck entfalten;
- für ein zuverlässiges Sauggreifen sollte die Andruckkraft vor dem Sauggreifvorgang einen Wert von über 3 N erreichen;

5.4 Bestimmung der Saugkraft

Um die statische Saugkraft F_y des Sauggreifers bei einer Unterdruckbelastung von 600 mbar nach einem Kontakt zwischen Sauggreifer und Greifobjekt und einer anschließenden Verschiebung von 8 mm bei einem ebenen und einem zylindrisch geformten ($R = 25$ mm) Greifobjekt zu bestimmen, wurden zehn Funktionsmuster mit der in Abbildung 4 dargestellten Versuchsanordnung und der in Kapitel 5.1 beschriebenen Versuchsdurchführung untersucht.

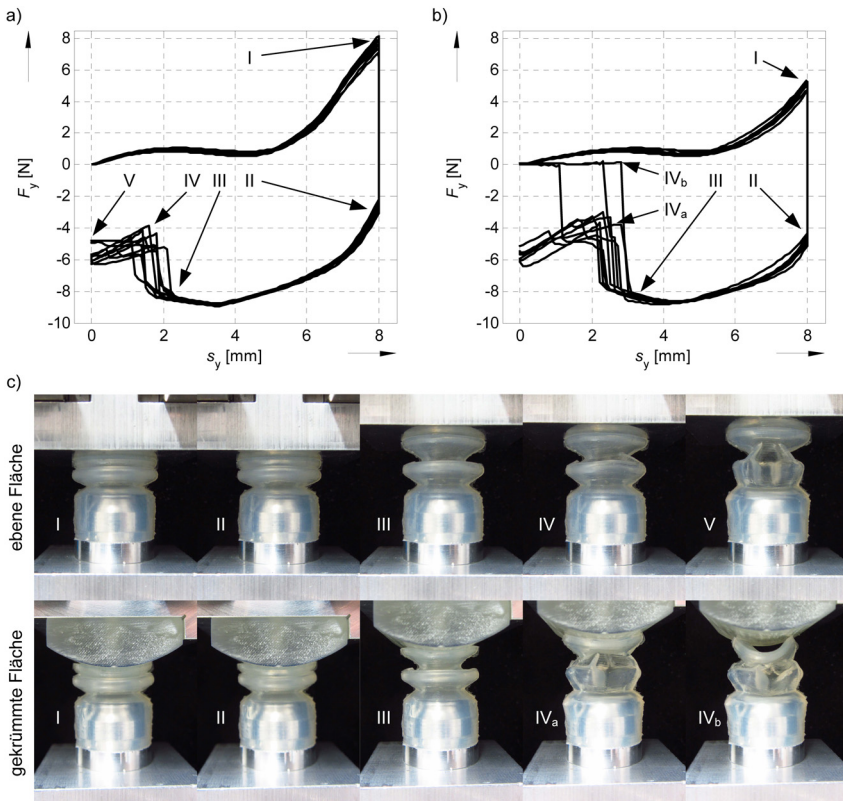


Abb. 6: Kraft-Verschiebung-Kennlinien von zehn Funktionsmustern: a) bei einem ebenen Greifobjekt und b) bei einem zylindrisch gewölbten Greifobjekt ($R = 25$ mm); c) Verformungsbilder des Sauggreifers nach einem Weg von $s_y = 8$ mm: I ohne Unterdruck; II mit Unterdruck von 600 mbar; beim Vergrößern des Abstandes zwischen Halterung des Sauggreifers und Greifobjekt: III im stabilen Bereich; IV-V nach Kollabieren des Sauggreifers

Die Abbildung 6 zeigt die Kraft-Verschiebung-Kennlinien aller zehn Funktionsmuster. In der Abbildung 6a sind die Kraft-Verschiebung-Kennlinien bei einem ebenen Greifobjekt und in Abbildung 6b bei einem zylindrisch gewölbten Greifobjekt zu sehen. Die Abbildung 6c zeigt zu den Kraft-Verschiebung-Kennlinien zugeordnete, charakteristische Verformungsbilder des Sauggreifers.

Die mittlere Saugkraft bei 600 mbar Differenzdruck ($\Delta p = p_{\text{atm}} - p_i$) beträgt bei einem ebenen Greifobjekt $9.85 \text{ N} \pm 0.06 \text{ N}$ und bei einem zylindrischen Objekt ($R = 25 \text{ mm}$) $9.44 \text{ N} \pm 0.11 \text{ N}$. Auf beide Greifobjekte kann somit eine Saugkraft ausgeübt werden, sofern das Greifobjekt und der Sauggreifer nach Kontakt noch 8 mm relativ aufeinander zubewegt werden und somit ein geschlossener Kontakttring ausgebildet werden kann.

Wird im gegriffenen Zustand bei anliegendem Unterdruck der Abstand zwischen Halterung des Sauggreifers und Greifobjekt wieder vergrößert und s_y somit verringert, so wird ein Abreißen bzw. Kollabieren des Sauggreifers erzwungen. Hierbei bleibt über einen weiten Bereich (vgl. Abb. 6c III) die Saugwirkung des Sauggreifers erhalten und der Sauggreifer stabil. Darüber hinaus steigt die Differenzkraft auf die Halterung des Sauggreifers bis zu einem Maximum von $16.10 \text{ N} \pm 0.33 \text{ N}$ bei dem ebenen Greifobjekt und bis auf $13.49 \text{ N} \pm 0.29 \text{ N}$ bei dem zylindrisch gewölbten Greifobjekt an, was als Abreißkraft interpretiert werden kann. Wird der Abstand weiter vergrößert, so kollabiert der Sauggreifer (vgl. Abb. 6c IV) und es kommt zu einem starken Abfall der Saugkraft. Hierbei kann die Saugwirkung gegenüber dem Greifobjekt erhalten bleiben (vgl. Abb. 6c IV_a) oder aber verloren gehen (vgl. Abb. 6c IV_b). Beim Sauggreifen des ebenen Greifobjektes blieb nach Anfahren der Ausgangslage ($s_y = 0 \text{ mm}$) und Beibehaltung des Unterdruckes bei allen zehn Sauggreifern eine Saugkraft erhalten. Diese Saugkraft betrug im Mittel $5.64 \text{ N} \pm 0.49 \text{ N}$ (vgl. Abb. 6c V). Beim Sauggreifen des zylindrisch gekrümmten Greifobjektes blieb bei sieben Sauggreifern eine mittlere Saugkraft von $5.63 \text{ N} \pm 0.32 \text{ N}$ erhalten wohingegen drei Sauggreifer abrissen. Weiterhin ist festzustellen, dass das Kollabieren des Sauggreifers im Falle von zylindrisch gekrümmten Greifobjekten im Vergleich zu einem ebenen Greifobjekt bei größeren Abständen zwischen Halterung des Sauggreifers und Greifobjekt (und somit früher) eintritt.

5.5 Sensorisierung des Sauggreifers

Für die Sensorisierung des Sauggreifers ist es erforderlich, Unterschiede bei der Verformung des Sauggreifers mit und ohne Greifobjekt bei Anlegen eines Unterdruckes zu identifizieren. Die Abbildung 7 zeigt auf der einen Seite des Sauggreifers ein Funktionsmuster und auf der anderen Seite das Simulationsmodell dieser beiden Zustände im Vergleich.

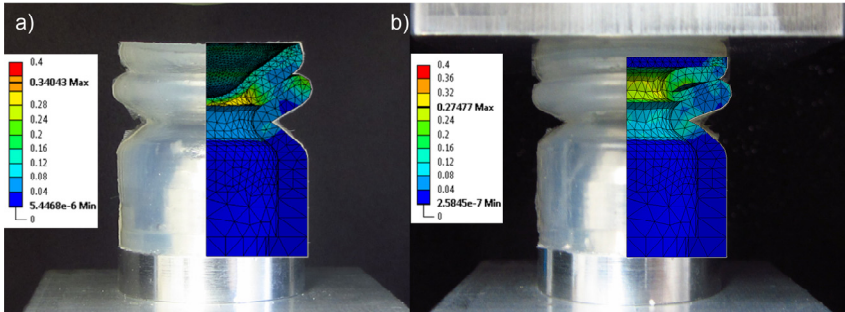


Abb. 7: Funktionsmuster mit überlagerten Simulationsmodell unter Darstellung der maximalen Hauptdehnung im FEM Viertelmodell bei 600 mbar Unterdruck:
a) ohne Greifobjekt, b) mit ebenem Greifobjekt

Zu sehen ist, dass sich bei Unterdruck der Sauggreifer zusammenfaltet und sich der Sauggreiferboden der Halterung des Sauggreifers annähert. Im Falle des Vorhandenseins eines Greifobjektes treten die innenliegenden Faltenwandungen in Kontakt. Ist kein Greifobjekt vorhanden, so wölbt sich der Sauggreiferboden zusätzlich stark konkav nach innen und tritt mit der unteren Faltenwandung in Kontakt. Besteht nun der monolithische Sauggreifer aus leitfähigen und nicht leitfähigen Strukturabschnitten, so kann über etwaige Kontaktschließung zweier oder mehrerer leitfähiger Abschnitte ein elektrischer Stromkreis geschlossen werden, mit dem der Greifstatus ausgewertet werden kann. Weiterführende Ausführungen zur Sensorisierung des Sauggreifers sind unter [5] zu finden.

Ferner ist zu sehen, dass die maximale Hauptdehnung den Wert 0,34 nicht übersteigt. Diese entspricht einer Ingenieurdehnung von 40,5%. Somit kann das unter Kap. 3.1 vorgeschlagene Materialmodell für die Simulation verwendet werden.

6 Zusammenfassung

Der monolithisch aufgebaute, nachgiebige Sauggreifer weist multifunktionelle Eigenschaften auf, die einerseits durch die unterschiedliche geometrische Ausgestaltung der einzelnen Teilstrukturen und deren Teilbereiche und andererseits durch die Nachgiebigkeit des verwendeten Materials (reversible Verformbarkeit) erreicht werden.

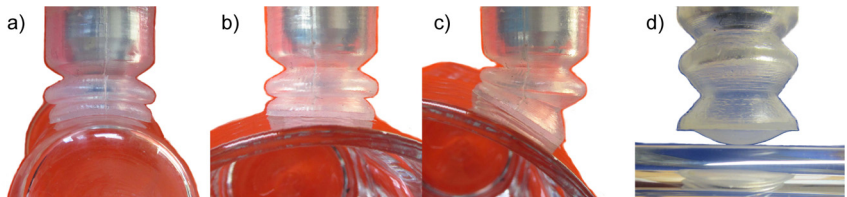


Abb. 8: Anwendung des Sauggreifers bei idealer Greifobjekt - Sauggreifer - Position: a) Sauggreifen eines zylindrischen Glasobjektes mit $R = 25$ mm; b) Sauggreifen eines zylindrischen Glasobjektes mit $R = 42$ mm; und bei nicht idealer Greifobjekt-Sauggreifer-Position: c) Sauggreifen eines zylindrischen Glasobjektes mit $R = 42$ mm; d) beim aktiven Abstoßen eines Greifobjektes

Im Folgenden sollen diese vorteilhaften Eigenschaften zusammenfassend aufgezählt werden:

- Adaptation des Sauggreifers an verschiedenartig gewölbte Greifobjektoberflächen durch die stoffliche Nachgiebigkeit (vgl. Abbildung 8a und 8b);
- Adaptation des Sauggreifers an eine ungenaue Position des Greifobjektes durch die Verwendung des Durchschlageffektes mit monostabiler Kennlinie (vgl. Abbildung 8c);
- Energieeffizienz; im Gegensatz zu konventionellen Sauggreifern geht bei einer Kolben-Zylinder-Anordnung das Saugmittel nicht verloren;
- hohe Querkraftstabilität; sobald ein Greifobjekt gegriffen ist, vergrößert sich durch Faltung die Steifigkeit des Sauggreifers;
- aktiv gesteuertes Ablegen und gezieltes Überwinden von Adhäsionskräften zwischen Sauggreifer und Greifobjekt durch konvexes Wölben des Greiferbodens bei Überdruckbelastung (vgl. Abbildung 8d);

- einfache Herstellbarkeit und minimaler Montage- sowie Wartungsaufwand des Sauggreifers durch eine monolithische (aus einem Bauteil bestehende) Bauweise;
- inhärente Sensorik erlaubt die Regelung des Greifprozesses und erhöht die Prozesssicherheit [5];
- Verringerung des Hygienierisikos durch Trennung des Saugmittels vom Umgebungsmittel;

Folglich eignet sich der Sauggreifer besonders für die Anwendungen in Reinräumen. Ebenfalls ist die Verwendung in der Verpackungsindustrie zum Greifen, Manipulieren und Transportieren von medizinischen und pharmazeutischen Produkten möglich.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter dem Förderkennzeichen ZE 714 / 9 - 1.

Literatur

- [1] Griebel, S., Fiedler, P., Streng, A., Hauelsen, J. und Zentner, L.: *Novel compliant mechanism with a screw motion for adduction of dry EEG electrodes*. In: Biomedizinische Technik 2010, Volume: 55, Pages 246-9, Hrsg. Fachverlag Schiele & Schon GmbH, Germany. ISSN: 0013-5585. doi: 10.1515/BMT.2010.669
- [2] Schallamach, A., Grosch, K.: *Tire traction and wear*. In: Clark, S.K.: *Mechanics of pneumatic tires*. Hrsg. U.S. Department of Commerce, National Highway Traffic Safety Administration. 1.Aufl. 1971, S.365-474
- [3] Zentner, L., Böhm, V.: Zum Verformungsverhalten nachgiebiger Mechanismen. In: Konstruktion, Bd. 60.2008, S. 67-71, Hrsg. Springer-VDI-Verlag, 2008
- [4] Risto, U.: Zur Charakterisierung und Anwendung des Durchschlagverhaltens von nachgiebigen rotationssymmetrischen Strukturen. Ilmenau, TU Ilmenau, Diss., 2013
- [5] Griebel, S., Keller, C., Zentner, L.: *Sauggreifer für Objekte mit glatten Oberflächen sowie dazugehöriges Verfahren und Verwendung desselben*. Deutsches Patent- und Markenamt, Az. 10 2014 011 617.4