

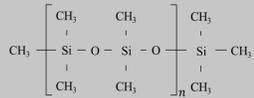
Forschungsbereich LSR

Einführung

Liquid Silicone Rubber (LSR)

Material

- 2 Komponenten bestehend aus
 - Komponente A: Grundpolymer, Füllstoff und Platin-Katalysator
 - Komponente B: Grundpolymer, Füllstoff, Vernetzer und Inhibitor
- Pastöse Form der Ausgangskomponenten
- Exotherme, irreversible Vernetzungsreaktion
- Topfzeit rund drei Tage



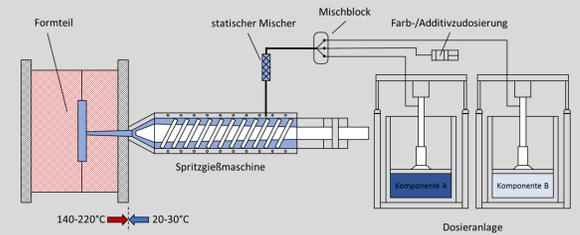
Chemischer Aufbau des Grundpolymers Polydimethylsiloxan (PDMS)

Verarbeitung

- Umgekehrte Temperaturführung verglichen mit Thermoplast Verarbeitung
 - Material wird in Schnecke auf RT gekühlt
 - Werkzeug ist beheizt (120 °C - 220 °C)
- Spezielle Dosiertechnik zur Förderung der pastösen Masse
- Kaltkanal zur Vermeidung von Ausschuss
- Aufgrund der hohen Temperaturen: stark beschleunigte Vernetzungsreaktion im heißen Werkzeug
- Wärmeausdehnung im Werkzeug: Auf Nachdruck kann u. U. verzichtet werden

Herausforderungen

- Vergleichsweise neues Verfahren
- Chargenschwankungen
- Simulationsergebnisse oft nicht zuverlässig



Schematischer Aufbau einer Spritzgießmaschine mit Dosieranlage zur Verarbeitung von LSR

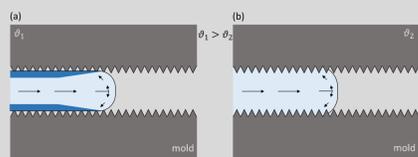
Abformung von Nano- und Mikrostrukturen

Funktionalisieren von Oberflächen, z. B. nach Vorbildern aus der Natur

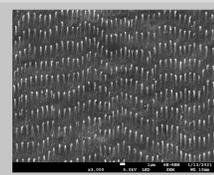
- Schlangenhaut mit anisotrope Reibeigenschaften^[1]
- Zikadenflügel mit antibakteriellen Eigenschaften^[2]
- Lotusblüte mit selbstreinigenden, superhydrophoben Oberflächen^[3]



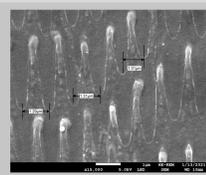
Haut der Kettennatter (engl. California King Snake) *Lampropeltis californicae*



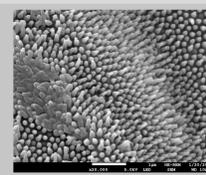
Herausforderung bei der Abformung von Nano- und Mikrostrukturen: Bei zu hoher Temperatur der Werkzeuoberfläche und langsamer Einspritzzeit werden die feinen Strukturen nicht mehr vollständig abgeformt



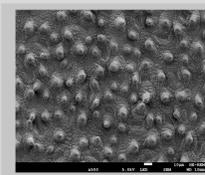
Rasterelektronenmikroskop- (REM) Aufnahme der gehärteten Bauchhaut einer Kettennatter, 3.000x Vergrößerung



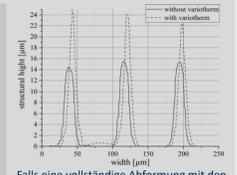
REM-Aufnahme der gehärteten Bauchhaut einer Kettennatter, 15.000x Vergrößerung



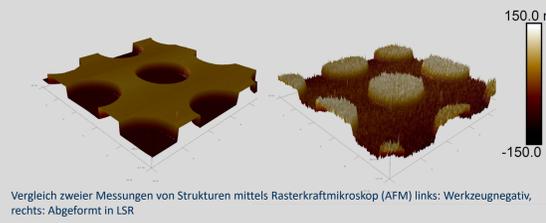
REM-Aufnahme eines Zikadenflügels, 20.000x Vergrößerung



REM-Aufnahme eines Lotusblattes, 500x Vergrößerung



Falls eine vollständige Abformung mit den gewählten Prozesseinstellungen nicht möglich ist, kann durch variierende Temperaturerhöhung Abhilfe geschaffen werden. Dabei wird die Werkzeuoberfläche vor dem Einspritzen gezielt gekühlt.



Vergleich zweier Messungen von Strukturen mittels Rasterkraftmikroskop (AFM) links: Werkzeugnegativ, rechts: Abgeformt in LSR



Wassertropfen auf einem Silikonbauteil mit Lotusstruktur: Mit einem Kontaktwinkel von etwa 155° handelt es sich um eine superhydrophobe Oberfläche



Versuchswerkzeug zur Abformung von Nano- und Mikrostrukturen in LSR. Die zwei AS-Einsätze sind einfach wechselbar.

Auswahl der Forschungsaktivitäten

Haftung zwischen optischen LSR und Thermoplast

Motivation

- Optisches LSR wird für Anwendungen wie Linsen, Mikrolinsensysteme und Lichtleiter eingesetzt.
- Mehrkomponentenbauteile sind problematisch wegen mangelnder Haftung



Linsen für LED-Scheinwerfer (Quelle: Engel, ACH)

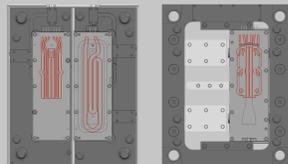


Linsensystem (Quelle: Protolabs)

Vorgehen

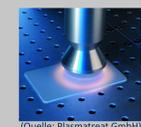
2-Komponentenspritzgießwerkzeug für LSR und Thermoplast

- 7 individuelle Dickschichtheizelemente
- 3 Drucksensoren

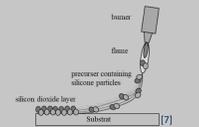


Oberflächenaktivierung mittels:

- Plasma
- Silikatisierung



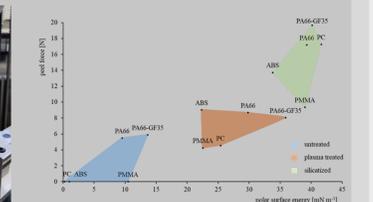
(Quelle: Plasmatreat GmbH)



[7]

Ergebnis

- Initiierung / Steigerung von Haftung
- Vorhersagemodell für TP-LSR Haftung in Abhängigkeit der Oberflächenaktivierung



Simulation vs. Reality

Problem:

- Gängige Simulationssoftware bilden das Materialverhalten von LSR nicht optimal ab
- Große Abweichungen zwischen Simulation und Realität

Lösung:

- Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Messverfahren zur Datengewinnung auf die Simulationsergebnisse
- Modellfreie Reaktionskinetik mit Ansatz nach Kamal-Sourour^[4]

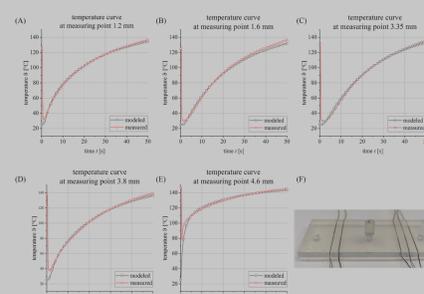
$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1(T) + k_2(T) \cdot \alpha^m) \cdot (1 - \alpha)^n$$

Eingestellte Werkzeugtemperatur 140 °C Material: Silopren 2050						
Heizzeit	230 s	240 s	250 s	260 s	270 s	280 s
Dicke	9 mm	8,5 mm	7,5 mm	5,5 mm	4 mm	0 mm

Versuchsserie mit verschiedenen Heizzeiten und Untersuchung der Dicke des unvernetzten Bereichs am Keil-Bauteil

Ansatz 1

- Eindimensionales, instationäres Wärmeleitproblem mit Wärmequelle (exotherme Vernetzung)^[5]
- Mathematische Modellierung der Vernetzung bei unterschiedlichen Prozessparametern
- Sehr gute Übereinstimmung der simulierten und gemessenen Temperaturdaten
- Zykluszeitvorhersage abhängig von Bauteildicke und Werkzeugwandtemperatur



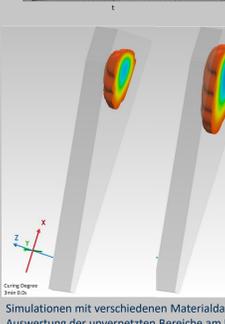
A-E, Temperaturverlauf an den einzelnen Messpunkten, gemessen und simuliert in fünf verschiedenen Höhenlagen (1,2 mm, 1,6 mm, 3,35 mm, 3,8 mm, 4,6 mm). F, LSR-Bauteil mit umspritzten Thermoelementen^[6]

Ansatz 2

- Optimierung von Materialkarten für Simulationssoftware
- RPA-Analyse, DSC-Analyse, Rheometer-Messungen
- Vergleich der Simulationsergebnisse mit hergestellten LSR-Bauteilen



Prinzipielle Ermittlung des Aushärtgrades $\alpha(t)$ mittels DSC-Messung: Vergleich der Zeitpunkt t freigesetzten Reaktionsenthalpie $\Delta h(t)$ mit der gesamte Reaktionsenthalpie der Vernetzungsreaktion Δh_r



Simulationen mit verschiedenen Materialdatensätzen und Auswertung der unvernetzten Bereiche am Keil-Bauteil



Ausblick

- Recycling von LSR-Bauteilen
- Einfluss auf Verarbeitung und Bauteileigenschaften
- Haftung [LSR-LSR]
- Untersuchungen zur Abdichtung mit LSR
- Feststellen von Chargenschwankungen

Quellen

- [1] Baum MJ, Heepe J, Fadeeva E, Gorb SN. Dry friction of microstructured polymer surfaces inspired by snake skin. *Bellstein J Nanotechnol.* 2014;5:1091-1103. doi:10.3762/bjnano.5.122.
- [2] Ivanova EP, Hasan J, Webb HK, et al. Natural bactericidal surfaces: mechanical rupture of *Pseudomonas aeruginosa* cells by cicada wings. *Small.* 2012;8(16):2489-2494. doi:10.1002/smll.201200528.
- [3] Enslkat HJ, Diltsche-Kura P, Neinhuis C, Barthlott W. Superhydrophobicity in perfection: the outstanding properties of the lotus leaf. *Bellstein J Nanotechnol.* 2011;2:152-161. doi:10.3762/bjnano.2.19.
- [4] Kamal MR, Sourour S. Kinetics and thermal characterization of thermoset cure. *Polym Eng Sci.* 1973;13(1):59-64. doi:10.1002/pen.760130110.
- [5] Baehr HD. Wärme- und Stoffübertragung. 10th ed. Berlin [Heidelberg]: Springer Vieweg; 2019. Springer eBooks Computer Science and Engineering.
- [6] Weißer DF, Walz D, Schmid J, Mayer D, Deckert MH. Calculating the temperature and degree of cross-linking for liquid silicone rubber processing in injection molding. *Jni Adv Manuf & Process.* 2020. doi:10.1002/jamp.2.10072.
- [7] Seitz V, Arzt K, Mahnel S, Rapp C, Schwaminger S, Hoffstetter M, Wintermantel E. Improvement of adhesion strength of self-adhesive silicone rubber on thermoplastic substrates – Comparison of an atmospheric pressure plasma jet (APPJ) and a Pyrosil® flame. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 66, 65–72. doi:10.1016/j.ijadhadh.2015.12.009.

