

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | EINLEITUNG..... | 1 |
| 2 | STAND DER TECHNIK | 4 |
| 2.1 | Mikrostrukturen und ihr Anwendungspotenzial | 4 |
| 2.1.1 | Funktionale Oberflächen mit strömungstechnischen Eigenschaften..... | 4 |
| 2.1.1.1 | Physikalischer Wirkmechanismus | 5 |
| 2.1.1.2 | Industrielle Umsetzung und bestehende Produkte..... | 6 |
| 2.1.2 | Funktionale Oberflächen mit adhäsiven Eigenschaften | 7 |
| 2.1.2.1 | Physikalischer Wirkmechanismus | 8 |
| 2.1.2.2 | Industrielle Umsetzung und bestehende Produkte..... | 10 |
| 2.1.3 | Funktionale Oberflächen mit wasserabweisenden Eigenschaften | 11 |
| 2.1.3.1 | Physikalische Grundlagen | 12 |
| 2.1.3.2 | Benetzung strukturierter hydrophober Oberflächen | 15 |
| 2.1.4 | Historie und industrielle Umsetzung wasserabweisender Oberflächen | 17 |
| 2.2 | Verfahrens- und Prozesstechnik zur Herstellung mikrostrukturierter Formteile | 20 |
| 2.2.1 | Verfahren zur dynamischen Werkzeugtemperierung | 23 |
| 2.3 | Zusammenfassung und Zielsetzung | 27 |
| 3 | ENTWICKLUNG EINES SYSTEMS ZUR EXTERNEN INDUKTIVEN ERWÄRMUNG | 30 |
| 3.1 | Anforderungen an ein System | 31 |
| 3.2 | Konstruktive Umsetzung | 32 |
| 3.2.1 | Roboter | 33 |
| 3.2.1.1 | Achsen und Fahrwege | 33 |
| 3.2.1.2 | Roboter-Programmierung | 34 |
| 3.2.2 | Induktionssystem | 36 |
| 3.3 | Das Roboter-Induktor System | 37 |
| 3.4 | Integration des Systems zur induktiven Erwärmung in die Steuerung der Spritzgießmaschine | 38 |
| 3.4.1 | Mechanisch / konstruktive Schnittstelle | 38 |
| 3.4.2 | Leistungssteuerung | 39 |
| 3.4.3 | Schnittstelle Roboter – Spritzgießmaschine | 39 |
| 3.4.4 | Kabelführung der Induktorkabel..... | 40 |
| 3.5 | Untersuchungen zur Prozessführung und Steuerung der Induktorleistung | 41 |
| 3.5.1 | Verfahrensgenauigkeit..... | 41 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 3.5.2 | Einkoppelbare Leistung | 41 |
| 3.6 | Modellierung der Erwärmungsphase | 42 |
| 3.7 | Funktionsevaluierung im Spritzgießzyklus | 44 |
| 3.7.1 | Spritzgießwerkzeug und Sensoren zur Evaluierung des externen Induktionssystems.... | 44 |
| 3.7.2 | Messdatenerfassung | 47 |
| 3.7.3 | Eingesetztes Material und Materialtrocknung..... | 47 |
| 3.7.4 | Erste Vorversuche zu Prozessführung und Prozessfenster..... | 48 |
| 3.7.5 | Versuchsplan für die Vorversuche..... | 49 |
| 3.7.6 | Prozessanalyse..... | 50 |
| 3.7.6.1 | Druck- und Temperaturkurven..... | 51 |
| 3.7.7 | Beurteilung des Erwärmungsmodells | 53 |
| 3.7.8 | Beurteilung der Formteilqualität..... | 54 |
| 3.8 | Integration eines Strahlungsthermometers in die Anlage..... | 56 |
| 3.9 | Simulation der Regelstrecke..... | 59 |
| 3.10 | Thermische Homogenität der Induktionsheizung | 64 |
| 3.11 | Zwischenfazit..... | 67 |
| 4 | VERSUCHSAUFBAU UND DURCHFÜHRUNG | 68 |
| 4.1 | Anlagentechnik und Systemkomponenten | 68 |
| 4.2 | Spritzgießwerkzeug | 68 |
| 4.3 | Mikrostrukturierter Konturkern..... | 69 |
| 4.4 | Auswahl der Kunststoffe für die Abformungen | 72 |
| 4.5 | Messtechnik zur qualitativen Charakterisierung von Mikrostrukturen | 73 |
| 4.5.1 | Lichtmikroskop..... | 73 |
| 4.5.2 | Rasterelektronenmikroskop | 74 |
| 4.6 | Messtechnik zur quantitativen Charakterisierung von Mikrostrukturen..... | 74 |
| 4.6.1 | Kontaktwinkelmessung | 75 |
| 5 | VERGLEICHENDE SPRITZGIEßVERSUCHE MIT VARIOTHERMER TEMPERIERUNG | 77 |
| 5.1 | Verfahrensvarianten im Spritzgießprozess zur Abformung des in Kapitel 4.3 vorgestellten mikrostrukturierten Formeinsatzes | 77 |
| 5.1.1 | Spritzgießen (konventionell) | 77 |
| 5.1.2 | Spritzgießen mit Induktionsheizung (variotherm)..... | 78 |
| 5.2 | Ermittlung eines Prozessfensters für das Spritzgießen | 78 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.3 | Analyse der Kontaktwinkel bei Verarbeitung von PP 513MNK40 (PP) | 80 |
| 5.4 | Analyse der Kontaktwinkel bei Verarbeitung von LLDPE M500026 (PE) | 85 |
| 5.5 | Diskussion der Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung | 90 |
| 5.6 | Auswertung der Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahmen | 91 |
| 5.7 | Zusammenfassung der Untersuchungen | 100 |
| 6 | ANALYSE UND BESCHREIBUNG DER OBERFLÄCHENENTSTEHUNG | 102 |
| 6.1 | Schematische Darstellung des Abformungsvorganges | 102 |
| 6.1.1 | Vereinfachte Darstellung der Mikrostruktur | 102 |
| 6.1.2 | Abformung bei konventioneller Prozessführung | 103 |
| 6.1.3 | Abformung bei variothermer Prozessführung | 104 |
| 6.1.4 | Querkontraktion | 106 |
| 6.2 | Tempern der Versuchsteile zur Verifizierung der Verstreckungshypothese | 106 |
| 6.2.1 | Untersuchung des Materials PP 513MNK40 | 106 |
| 6.2.2 | Untersuchung des Materials LLDPE M500026 auf Verstreckung | 109 |
| 6.3 | Variation der globalen Werkzeugtemperatur | 110 |
| 7 | FAZIT UND AUSBLICK | 112 |
| 8 | ZUSAMMENFASSUNG UND SUMMARY | 119 |
| 8.1 | Zusammenfassung | 119 |
| 8.2 | Summary | 121 |
| 9 | ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES | 123 |
| 9.1 | Abkürzungen | 123 |
| 9.2 | Formelzeichen | 124 |
| 10 | LITERATUR | 126 |
| 11 | ANHANG | 131 |
| 11.1 | Roboter-Programm | 131 |
| 11.2 | Aufbau der Leistungssteuerung aus Kapitel 3.4.2 | 132 |
| 11.3 | Erweiterte Temperaturprofile aus Kapitel 3.7.6.1.1 | 133 |
| 11.4 | Darstellung des Simulink-Modells aus Kapitel 3.9 | 135 |
| 11.5 | Maschineneinstellung der Spritzgießversuche in Kapitel 5 für das Material PP 513MNK40 | 136 |
| 11.6 | Maschineneinstellung der Spritzgießversuche in Kapitel 5 für das Material LLDPE M500026 | 139 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 11.7 | Ergebnisse der Effektanalyse für das Material PP 513MNK40 zu Abschnitt 5.3 | 142 |
| 11.8 | Ergebnisse der Effektanalyse für das Material LLDPE M500026 zu Abschnitt 5.4 ... | 144 |
| 11.9 | Datenblatt Sabic PP 513MNK40 | 146 |
| 11.10 | Datenblatt Sabic LLDPE M500026 | 147 |
| 11.11 | Planmatrix des statistischen Versuchsplans aus Kapitel 5 | 148 |