

Entformungskraftmessung an Polypropylen, Polyoxymethylen und Ionomeren

Masterarbeit

eingereicht am Lehrstuhl für Spritzgießen von Kunststoffen
Montanuniversität Leoben

unter Mithilfe der
Polymer Competence Center Leoben GmbH



Berthold Lorenz

18. Oktober 2010

Begutachtung: Univ.-Prof.Dipl.-Ing.Dr.mont. W. Friesenbichler
Montanuniversität Leoben

Betreuung: Dipl.-Ing. Dr.mont. Gerald R. Berger
Polymer Competence Center Leoben GmbH

Eidesstattliche Erklärung

Eidesstattliche Erklärung:

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Danksagung

Die vorliegende Forschungsarbeit ist Teil des bilateralen Projektes III-2.02 „Surface Structures in Injection Molding“ der **Polymer Competence Center Leoben GmbH**. Das Projekt wird mit wesentlicher Beteiligung des Instituts für Kunststoffverarbeitung der MU Leoben und mit den Partnerunternehmen Oerlikon Balzers AG, 9496 Balzers (Liechtenstein), Wittmann Battenfeld GmbH, 2542 Kottlingbrunn, Böhler Edelstahl GmbH & Co.KG, 8605 Kapfenberg und Jutz GmbH, 1190 Wien durchgeführt.

Die Abwicklung des Projektes erfolgt im Rahmen des Kompetenzzentren-Programms **COMET** des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie unter Beteiligung der Montanuniversität Leoben und wird mit Mitteln des Bundes und der Länder Steiermark und Oberösterreich gefördert.

Mein Dank gilt Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. W. Friesenbichler für die einführende Erläuterung des Arbeitsthemas, der Zielsetzung und sämtlicher Problematiken, auf die bei der Umsetzung zu achten war und letztendlich für die Beurteilung der Arbeit.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Gerald R. Berger vom Polymer Competence Center Leoben bedanken, der mir stets mit seiner fachlichen Kompetenz und Motivation zur Seite stand. Er hat viel Zeit zur Einführung in die Problematik sowie zur Einschulung an sämtlichen Gerätschaften investiert und stand mir immer bei auftretenden Problemen in der praktischen Durchführung der Messungen im Technikum bereit. Schlussendlich war sein Korrekturlesen wichtig, damit die Arbeit formal und inhaltlich ihre Richtigkeit aufweist.

Weiters bedanke ich mich gerne bei Herrn DI Günther Freudenschuß, der mir durch seine große Erfahrung im Bedienen der Spritzgießmaschine und der Messapparatur sehr geholfen hat, sämtliche Abläufe zu verstehen und auf spezifische Probleme richtig zu reagieren.

Schlussendlich gilt mein Dank natürlich meinen Eltern, die mir überhaupt ein Studium an der Montanuniversität ermöglicht haben.

Leoben, 18. Oktober 2010

Berthold Lorenz

Kurzfassung

Im Spritzgießprozess wirken beim Entformen des Formteils so genannte Entformungskräfte, die durch das Reibungs- und Adhäsionsverhalten zwischen Kunststoff- und Werkzeugoberfläche beeinflusst werden.

Mit einem im Rahmen des PCCL-multifirm-Projektes 3.2 speziell entwickelten Messwerkzeug können diese Entformungskräfte direkt während des Spritzgießprozesses und somit unter realen Bedingungen erfasst werden.

In dieser Arbeit wurden für 4 Polypropylentypen, 2 thermoplastische Elastomere und ein Polyoxymethylen die Entformungskräfte gemessen und aus dem Quotienten von maximaler Entformungskraft und wirkender Normalkraft die Haftreibwerte μ_0 bestimmt. Die Einflussgrößen waren die Oberflächenstruktur der Werkzeug-Probekörper, die Vorlauftemperatur und verschiedene Normalkraftbelastungsstufen.

Zunehmende Normalkräfte führten bei allen untersuchten Polymeren zu einer Steigerung der Entformungskräfte. Eine Erhöhung der Vorlauftemperatur oder der Oberflächenrauigkeit hingegen bewirkte in den meisten Fällen eine Abnahme dieser. Die absolut niedrigsten Haftreibwerte ($\mu_0 = 0,02$ bis $0,11$) konnten mit POM bei einem DLC-Flex-beschichteten Stahl-Probekörper ($R_a = 0,059 \mu\text{m}$) und einer Vorlauftemperatur von 80°C erzielt werden.

Abstract

Friction as well as adhesion hinder the demolding of injection molded parts. Both are influenced by the polymer and the steel mold surfaces. A practical test device, built as friction tester integrated into an injection mold, enables the analysis of demolding forces and friction coefficients under real injection molding conditions.

Four low-viscous polypropylene grades (PP), one polyoxymethylene grade (POM) and 2 thermoplastic elastomers were analyzed in combination with various mold surface structures, mold temperatures and normal force levels.

The static coefficient of friction μ_0 was calculated as the quotient of maximum measured demolding force and acting normal force.

Increasing normal forces rise the necessary demolding forces for all polymers examined. However, higher mold temperature as well as surface roughness reduce the demolding forces in most cases. The lowest coefficients of static friction ($\mu_0 = 0.02$ to 0.11) were detected for POM and a DLC-Flex coated mold surface ($R_a = 0.059 \mu\text{m}$) at a mold temperature of 80°C .

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung und Zielsetzung	1
2.	Grundlagen.....	2
2.1.	Experimentelle Studie zu Entformungskräften beim Spritzgießen nach Sasaki [14]	2
2.2.	Einfluss von Oberflächenrauigkeit und Kontaktkraft auf Haftreibwert und Ritzverhalten von thermoplastischen Olefinen nach Jiang [15]	3
2.3.	Haftreibwert einiger Kunststoffe mit Reibpartnern aus Stahl und Aluminium unter verschiedenen Kontaktbedingungen nach Benabdallah [16]	5
3.	Experimenteller Teil.....	8
3.1.	Verwendete Maschinen und Geräte.....	8
3.1.1.	Spritzgießmaschine	8
3.1.2.	Hydraulikzusatzaggregat.....	9
3.1.3.	Werkzeugtemperierung	9
3.1.4.	Haft- und Entformungskraft-Messapparatur (Versuchswerkzeug).....	10
3.1.5.	Messsensoren	14
3.1.6.	Messdatenerfassung	16
3.1.7.	Granulattrockner.....	16
3.2.	Verwendete Materialien	16
3.2.1.	Kunststoffe	16
3.2.2.	Stahlprobekörper (Werkzeugeinsätze)	20
3.3.	Versuchsdurchführung.....	21
3.3.1.	Versuchsplanung.....	21
3.4.	Versuchsablauf	23
3.5.	Versuchsauswertung.....	27
4.	Ergebnisse und Diskussion.....	31

4.1.	INSPIRE™ 702 Performance Polymer (PP)	31
4.1.1.	Entformungskraftkurven	31
4.1.2.	Haftreibwert μ_0	34
4.2.	DOW™ C705-44NA Polypropylene	37
4.2.1.	Entformungskraftkurven	37
4.2.2.	Haftreibwert μ_0	42
4.3.	DR7023 Developmental Polypropylene Resin (PP)	44
4.3.1.	Entformungskraftmessung	44
4.3.2.	Haftreibwert μ_0	48
4.4.	DOW C791-30NA Polypropylene	49
4.4.1.	Entformungskraftmessung	49
4.4.2.	Haftreibwert μ_0	52
4.5.	Direkter Vergleich der verschiedenen Polypropylen-Typen	54
4.5.1.	Entformungskraftverläufe der 4 PP-Typen	54
4.5.2.	Haftreibwert μ_0	57
4.5.3.	Maximaler Reibwert μ_{max}	61
4.6.	Hostaform C27021, Polyoxymethylen (POM)	62
4.6.1.	Entformungskraftmessung	62
4.6.2.	Haftreibwert μ_0	65
4.6.3.	Maximaler Reibwert μ_{max}	68
4.7.	DuPont™ Surlyn^R1652 (TPE)	71
4.7.1.	Entformungskraftverläufe	72
4.7.2.	Haftreibwert μ_0	75
4.8.	Iotek™ 8030 (TPE)	76
4.8.1.	Entformungskraftverläufe	76
4.8.2.	Haftreibwert μ_0	79
5.	Zusammenfassung und Ausblick	81

6.	Literatur	84
7.	Anhang	87
7.1.	Verwendete Abkürzungen	87
7.2.	Abbildungsverzeichnis	89
7.3.	Tabellenverzeichnis	94
7.4.	Wertetabellen aller Berechnungen zum Haftreibwert	95
7.5.	Codierung der Probekörper	100

1. Einleitung und Zielsetzung

Mit dieser Arbeit soll das Entformungsverhalten ausgewählter Kunststoffe beim Kontakt mit verschiedenen Werkzeugoberflächenstrukturen unter bestimmten Prozessbedingungen untersucht und analysiert werden, um letztlich einen Beitrag zur Optimierung des Entformungssystems in der Praxis zu leisten. Dazu werden spezielle Formteile aus vier unterschiedlich additivierten Polypropylentypen (PP), aus zwei Ionomeren bzw. thermoplastischen Elastomeren (TPE) und aus einer Polyoxymethylensorte (POM) an der Spritzgussmaschine produziert und noch während ihrer Entformung die dafür nötigen Entformungskräfte mittels einer eigenen Messapparatur erfasst. Diese ist als Spritzgießwerkzeug mit integriertem Reibversuch aufgebaut, wobei auf das plattenförmige Formteil zusätzlich eine frei wählbare vertikale Kraft aufgebracht werden kann. Die Oberflächenbeschaffenheit der metallischen Reibfläche kann in Struktur, Rauigkeit und Beschichtung durch Wechseln der verschiedenen Formeinsätze verändert werden. Durch stufenweise Steigerung der auf die Reibfläche wirkenden Vertikalkraft sollen in der Praxis vorkommende Haftbedingungen zwischen Formteil und Werkzeug, verursacht durch unterschiedliche Schwindungsprozesse, simuliert werden. Zusätzlich wird die Vorlauftemperatur im Spritzwerkzeug variiert und deren Einfluss auf die Entformungskraft untersucht. Letztlich wird der jeweilige Haftreibungswert aus dem Wertepaar Haftreibungskraft/Vertikalkraft ermittelt und über dem Kontaktdruck dargestellt.

2. Grundlagen

2.1. Experimentelle Studie zu Entformungskräften beim Spritzgießen nach Sasaki [14]

Im Allgemeinen gilt beim Spritzgießen von Kunststoffen, dass mit fallender Oberflächenrauigkeit des Spritzgusswerkzeuges auch die notwendigen Entformungskräfte geringer werden.

Dies gilt aus Erfahrung nicht mehr für Oberflächenrauigkeiten im Nanometer-Bereich, wo eine Steigerung der Entformungskraft zu verzeichnen ist, je glatter die Oberfläche wird. Diese unerwünscht hohen Entformungskräfte können dazu führen, dass es beim Entformen zum Bruch oder zu Deformationen des Formteils kommt.

Um diesem Problem auf den Grund zu gehen, wurden verschiedene Materialien in Kombination mit hochglanzpolierten (spiegelpolierten) und zusätzlich PVD beschichteten Formeinsätzen an einer Spritzgießmaschine mit spezieller Entformungsapparatur getestet [14]. Hierbei wird ein hülsenförmiges Formteil um einen Kern mit definierter Oberflächenstruktur gespritzt und von diesem, unter Messung der nötigen Kraft, abgezogen [14].

In Abbildung 1 ist schematisch die Entformungskraftkurve für Polypropylen dargestellt. Der Entformungskraftverlauf zeigt ein Minimum bei einer Rauigkeit von etwa $R_a = 0,2 \mu\text{m}$. Darunter steigt die nötige Entformungskraft rapide an, darüber fällt der Kraftanstieg nur moderat aus.

Eine nachträgliche mikroskopische Untersuchung der Formteiloberflächen ergab:

- Bei einer Werkzeugoberflächenrauigkeit von $R_a = 0,689$ bis $0,092 \mu\text{m}$ wurden Kratzrillen vom Werkzeug am Formteil festgestellt. In diesem Fall überwiegen eindeutig die Ritzkräfte (Deformation) gegenüber Adhäsionskräften beim Entformen.
- Bei $R_a = 0,016 \mu\text{m}$ wurden keine Kratzspuren entdeckt, aber die höchsten Entformungskräfte gemessen. Das lässt vermuten, dass für diese geringen Oberflächenrauigkeiten hohe Adhäsionskräfte zwischen den Kontaktflächen wirken müssen.

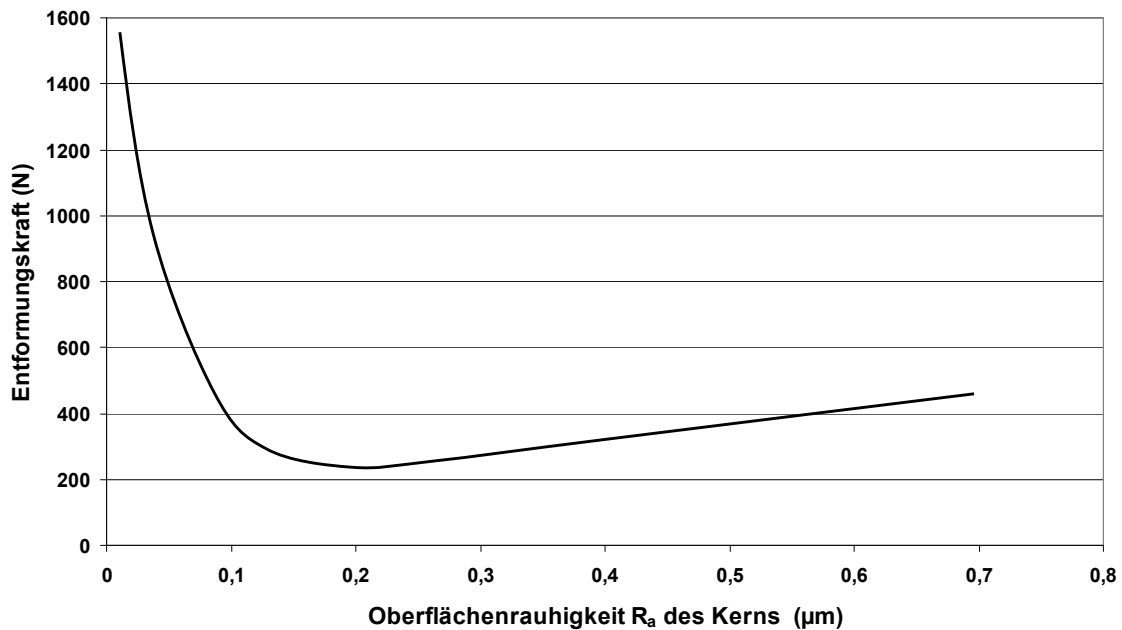


Abbildung 1: Entformungskraftkurve für Polypropylen in Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit des umspritzten Kerns [14].

Zur Reduzierung der Entformungskraft wurden weiters verschiedene Oberflächenbeschichtungen eingesetzt. Normalerweise werden Trennmittel und Chrombeschichtungen zur Reduktion der Entformungskraft verwendet. Die Messungen der Entformungskräfte für PP und PET ergaben ähnliche Ergebnisse, außer für DLC-Beschichtungen.

PP: Unbeschichtete, Cr-beschichtete und DLC-beschichtete Werkzeuge verursachen die höchsten Entformungskräfte. TiN, WC/C ergeben deutlich niedrigere Werte.

PET: Unbeschichtete, Cr-beschichtete Werkzeuge führen zu den höchsten Entformungskräften. DLC, WC/C, TiN-Beschichtungen liefern die niedrigsten Werte.

2.2. Einfluss von Oberflächenrauigkeit und Kontaktkraft auf Haftreibwert und Ritzverhalten von thermoplastischen Olefinen nach Jiang [15]

Es gilt als allgemein erwiesen, dass Oberflächeneigenschaften und Materialparameter einen entscheidenden Einfluss auf das Ritzverhalten haben können. In

der Praxis ist ein bestimmtes Maß an Oberflächenrauigkeit (R_a) notwendig, um spezifische Funktionalitäten, wie Oberflächenhaftung oder gewünschten Oberflächenglanz zu erzielen.

Die Reibkraft kann in 2 Komponenten geteilt werden, die Adhäsionskomponente und die Deformationskomponente. Beide werden durch die Oberflächenrauigkeit und die Kontaktfläche bestimmt. Es ist unbestritten, dass die Reibkraft stark von der Oberflächenrauigkeit und, von der aktuellen effektiven Kontaktfläche zwischen 2 Oberflächen abhängig ist [24].

In einer Studie wurden der Einfluss der Oberflächenrauigkeit und des Kontaktdruckes auf den Gleitreibwert und auf den Ritzwiderstand von thermoplastischen Olefinen während des Gleitprozesses in Kontakt mit einer Stahloberfläche untersucht [15]. Dazu wurden 3 mm dicke spritzgegossene Kunststoffplatten mit 2% Kohlenstoffpigment bei einer Ausgangsrauigkeit von $R_a = 0,5 \mu\text{m}$ nachbehandelt, um die gewünschte Struktur bzw. Rauigkeit zu schaffen. Der Gleitreibwert zwischen TPO und einer 10 x 10 mm großen Stahloberfläche wurde mit unterschiedlichen Normalkraftstufen (5, 10, 20 N) über eine Weglänge von 100 mm bei einer Geschwindigkeit von 100 mm/s ermittelt. Aus den Messungen ist in Abbildung 2 zu erkennen, dass eine Erhöhung der Rauigkeitswerte R_a eine Senkung der Gleitreibungswerte μ_s mit sich bringt. Zumindest gilt diese Tendenz im niedrigeren Kontaktkraftbereich. Bei höheren Kontaktkraftwerten rücken die Gleitreibungswerte dichter zusammen und verlaufen allmählich konstant weiter. Somit nimmt der Einfluss der Oberflächenrauigkeit ab einem bestimmten Kraftniveau immer mehr ab. Das könnte durch eine immer „glatter“ gepresste Kunststoffoberfläche erklärt werden, bei der die Rauigkeitslücken mit steigendem Kontaktdruck mehr und mehr geschlossen werden. Das erhöht die effektive Kontaktfläche zwischen den Reibpartnern und somit den Gleitreibwert.

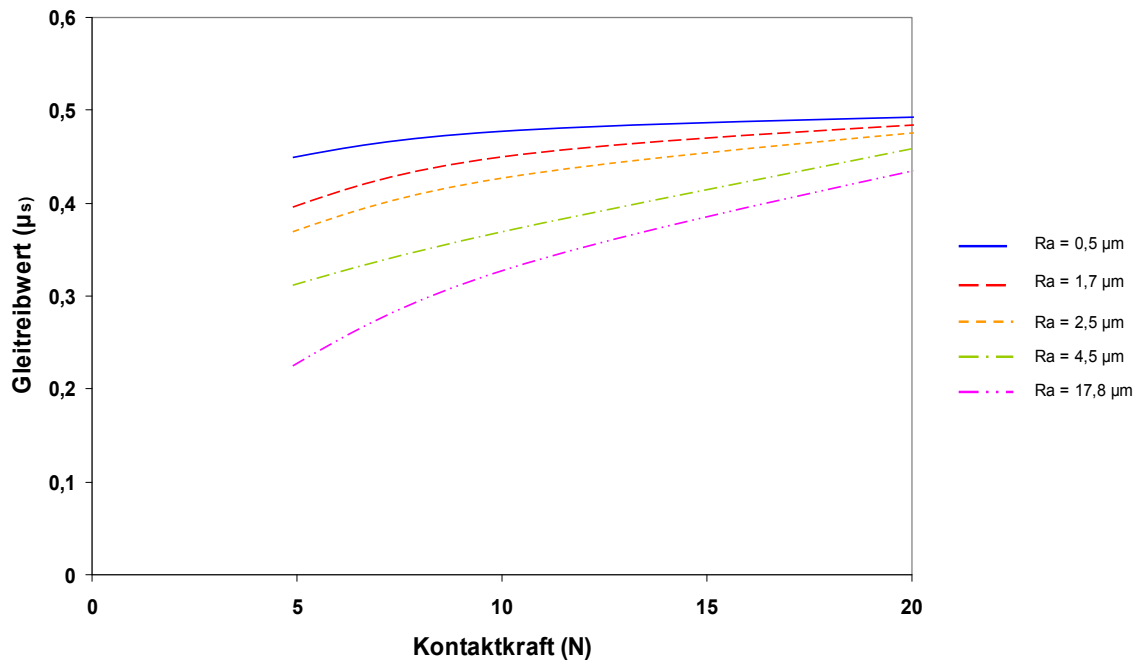


Abbildung 2: Wirkung von Oberflächenrauigkeit und Kontaktkraft auf den Gleitreibwert [15].

Abschließend kann gesagt werden, dass matte, speziell strukturierte Kunststoffoberflächen helfen, den Gleitreibwert zu verringern, frühzeitige Ritzmechanismen verzögern und dadurch sichtbare Kratzspuren vermeiden können. Außerdem kann eine gezielte Oberflächentextur leichte Kratzspuren bis zu einem gewissen Grad überdecken.

2.3. Haftreibwert einiger Kunststoffe mit Reibpartnern aus Stahl und Aluminium unter verschiedenen Kontaktbedingungen nach Benabdallah [16]

Während der Haftphase zwischen Kunststoff- und Metalloberfläche reicht eine aufbrachte Schubkraft noch nicht aus, um Oberflächenverbindungen zu trennen und eine relative Gleitbewegung auszulösen. „Slip-Stick“-Effekte sind kurz aufeinander folgende Gleit- und Haftphasen beim Gegeneinanderbewegen zweier

Materialoberflächen, zumeist bei relativ niedrigen Abziehggeschwindigkeiten. Der Haftreibwert ist bestimmt durch

- a) die wirkende Normalkraft F_N auf die Kontaktfläche,
- b) die Adhäsionskräfte F_a als Folge von Bindungen zwischen den nahen Kontaktflächen und
- c) die nötige Kraft F_t , die zum Überwinden dieser erforderlich ist [19].

$$\mu_0 = \frac{F_t}{F_N - F_a} \quad (1)$$

Mit: F_t ...Haftkraft, F_N ...Normalkraft,
 F_a ...Adhäsionskraft, μ_0 ...Haftreibwert.

Der Haftreibwert (Gleichung (1)) wird durch mehrere Faktoren beeinflusst: Materialeigenschaften, Oberflächentopografie, wirkende Druckbelastung, Umwelteinflüsse wie Temperatur, Feuchtigkeit und Schmierung und der Verweilzeit.

Einige Studien zeigen mit steigender Verweilzeit der Gleitflächen eine Steigerung des Haftreibwertes [20]. Weiters gibt es auch Versuchsergebnisse, bei denen der Haftreibwert mit steigendem Kontaktdruck und Oberflächenrauigkeit abnimmt [21]. Versuche mit strukturierten Oberflächen in Kombination mit Feuchtigkeit bringen höhere Werte für die Haftreibung sowie bei einer Temperaturerhöhung eine Senkung der Werte [22]. Generell ist der Haftreibwert höher als der Gleitreibwert, aufgrund thermisch aktivierter Relaxationsprozesse [23]

In der behandelten Studie [16] wird der Haftreibwert mittels einer Versuchsanordnung ermittelt, die durch steigende Rotation der Haftfläche Zentrifugalkräfte entwickelt, die auf den Probekörper wirkend eine Gleitbewegung einleiten sollen. Die definierte Reiboberfläche stellt eine rotierende Platte dar, auf der ein Kunststoff-Probekörper ruht, der ab einer bestimmten Winkelgeschwindigkeit nach außen getrieben wird. Diese Gleitbewegung wird über Infrarot-LEDs und Empfänger registriert und gibt den Zeitpunkt bzw. den Winkelgeschwindigkeitswert wieder, an dem die Haftreibung zwischen Probekörper und Platte überwunden wird.

Der Einfluss der Verweilzeit auf eine Erhöhung des Haftreibungswertes kann durch folgende Phänomene erläutert werden [23]:

- Formierung von Kapillarbrücken durch Kondensation von Feuchtigkeit (aus der Luft) zwischen den Kontaktflächen.
- Vergrößerung der Kontaktfläche mit zunehmender Verweilzeit.
- Relaxation der Schubspannungen unmittelbar nach einer Gleitbewegung.

Durch Einsatz von Schmiermittel sollen normalerweise der Gleitreibungswiderstand und Verschleißerscheinungen reduziert werden. Es ist aber auch erwiesen, dass mit Schmierstoffen oder Wasser benetzte Oberflächen die Adhäsionskräfte zwischen den Kontaktflächen erhöhen können und somit die Haftreibung gegenüber trockenen Oberflächen deutlich größer sein kann.

Die Ergebnisse der Versuche mit verschiedenen POM-Typen und einem PA66-Typ in beim Kontakt mit Stahl und Aluminiumoberflächen sind im Folgenden kurz zusammengefasst:

Der Haftreibungswert

- sinkt bei einer Steigerung niedriger Normalkräfte ($< 10\text{N}$) degressiv,
- steigt mit einer Abnahme der Materialsteifigkeit der Oberfläche,
- sinkt bei niedriger Vertikalkraftbelastung mit steigender Winkelbeschleunigung,
- steigt mit Verlängerung der Verweilzeit vor der Gleitbewegung bis zu einem gewissen Niveau und verläuft ab hier konstant,
- sinkt bei Polymeren mit höherer Steifigkeit,
- ist unabhängig von der scheinbaren Kontaktfläche und
- wird durch Wasser und durch Parafinöl in stärkerem Maße erhöht.

3. Experimenteller Teil¹

Der Ablauf der Experimente wurde anhand der Arbeitsanleitung in der Masterarbeit von Freudenschuß [13] durchgeführt. Dabei wurden die Abschnitte 3.1, 3.4 und 3.5 dieses Kapitels vollständig aus der Masterarbeit Freudenschuß übernommen.

3.1. Verwendete Maschinen und Geräte

3.1.1. Spritzgießmaschine

Die Haft- und Entformungskraftmessungen wurden auf einer vollelektrischen Spritzgießmaschine des Typs Battenfeld 1000/200 CDK-SE der Firma Battenfeld Kunststoffmaschinen GmbH, Kottlingbrunn/Österreich, im Technikum des Instituts für Kunststoffverarbeitung an der Montanuniversität Leoben durchgeführt. Für die Ansteuerung der Hydraulikzylinder des Versuchswerkzeuges wurde die Spritzgießmaschine mit einem Hydraulikzusatzaggregat ausgestattet. Weiters wurde an der Maschine ein QVA-Modul angebracht, welches das forminnendruckabhängige Umschalten von Einspritzdruck auf Nachdruck ermöglicht. Die Spritzgießmaschine wurde mit einem Mikroprozessor des Typs UNILOG TC 40-SE gesteuert.

Zur besseren Schmelzeshomogenisierung wurde eine Schnecke mit einem Zahnscheibenmischteil eingesetzt.

In Tabelle 1 sind wesentliche technische Daten der verwendeten Spritzgießmaschine zusammengefasst. Die Einspritzgeschwindigkeit ergibt sich aus dem Verhältnis von Einspritzvolumenstrom und Schneckenquerschnittsfläche.

¹ Der Abschnitt 3 wurde bis einschließlich dem Kapitel 3.5. mit Ausnahme der Abschnitte 3.2 Verwendete Materialien und 3.3 Versuchsdurchführung und einiger spezifischer Angaben vollständig aus der Masterarbeit von Günter Freudenschuß übernommen [13].

Tabelle 1: Technische Daten der Spritzgießmaschine Battenfeld 1000/200 CDK-SE.

Schließkraft	1000 kN
Schneckendurchmesser	30 mm
Maximaler Einspritzdruck	1825 bar
Rechnerisches Hubvolumen (spezifischer Spritzdruck)	99 cm ³
Schnecke, L/D Verhältnis	21
Schneckenweg	140 mm
Maximale Schneckendrehzahl	228 min ⁻¹
Maximaler Einspritzvolumenstrom	75 cm ³ /s
Maximale Einspritzgeschwindigkeit	106 mm/s

3.1.2. Hydraulikzusatzaggregat

Zur Ansteuerung der beiden Hydraulikzylinder des Versuchswerkzeuges wurde ein Hydraulikzusatzaggregat des Typs NG25 der Firma Bosch Rexroth GmbH, Pasching/Österreich, verwendet. Das Aggregat ist mit einer Axialkolbenpumpe ausgestattet und weist eine Literleistung von 19 l/min auf. Der maximale Betriebsdruck des Aggregats beträgt 120 bar.

3.1.3. Werkzeugtemperierung

Die beiden Versuchswerkzeughälften wurden separat temperiert. Es wurden zwei Druckwassertemperiergeräte des Typs TT-139 der Firma TOOL-TEMP AG, Sulgen/Schweiz, verwendet. Mit den Temperiergeräten sind Temperaturen bis zu 140 °C realisierbar, die Temperaturregelung erfolgt mittels selbstoptimierendem Mikroprozessor-Regler. Die Selbstoptimierung verhindert das Überschwingen des Sollwertes bei jeder Temperatur, unabhängig vom Gewicht des Verbrauchers und gewährleistet eine genaueste Temperaturführung, auch bei hohen Temperaturen. Die Temperiergeräte sind mit einem indirekten Kühlsystem ausgestattet. Die Heizleistung der Aggregate beträgt 6 kW, schaltbar in Stufen 3/3/6 kW. Mit einer Pumpenleistung von maximal 4,5 bar wird ein Volumenstrom von maximal 80 l/min erreicht.

3.1.4. Haft- und Entformungskraft-Messapparatur (Versuchswerkzeug)

Die verwendete Messapparatur zur Bestimmung der Haft- und Entformungskräfte stellt eine Kombination aus Spritzgießwerkzeug und Reibversuchsvorrichtung dar. In einem konventionellen Spritzgieß-Prozess wird ein plättchenförmiger Kunststoff-Probekörper (Spritzling) gefertigt, mit dem während der Werkzeug-Öffnungsbewegung ein Reibversuch an einem Stahl-Probekörper durchgeführt wird. Die Oberflächenstruktur des Stahl-Probekörpers, der gleichzeitig die untere Werkzeugwandung bildet, wird an der Unterseite des Spritzlings abgeformt. Der Stahl-Probekörper kann hinsichtlich seines Grundmaterials (Formenstahl) sowie seiner Oberflächenstruktur und -beschichtung unterschiedlich ausgeführt werden.

3.1.4.1. Kunststoff-Probekörper (Spritzling)

Abbildung 3 zeigt den Kunststoff-Probekörper. Dieser wird über einen Stangenanguss, der in einen Fächerverteiler mündet, angespritzt. Der Kunststoff-Probekörper weist eine sägezahnprofilierte Oberseite auf, die nur durch die Markierung eines kombinierten Druck- und Temperatur-Sensors ($\varnothing 4\text{mm}$) unterbrochen wird. Die Wandstärke des Kunststoff-Probekörpers ist durch den Einsatz verschiedener Abstandsvariatorplättchen beim Versuchswerkzeug variierbar, die Standard-Wandstärke beträgt 2,5 mm.

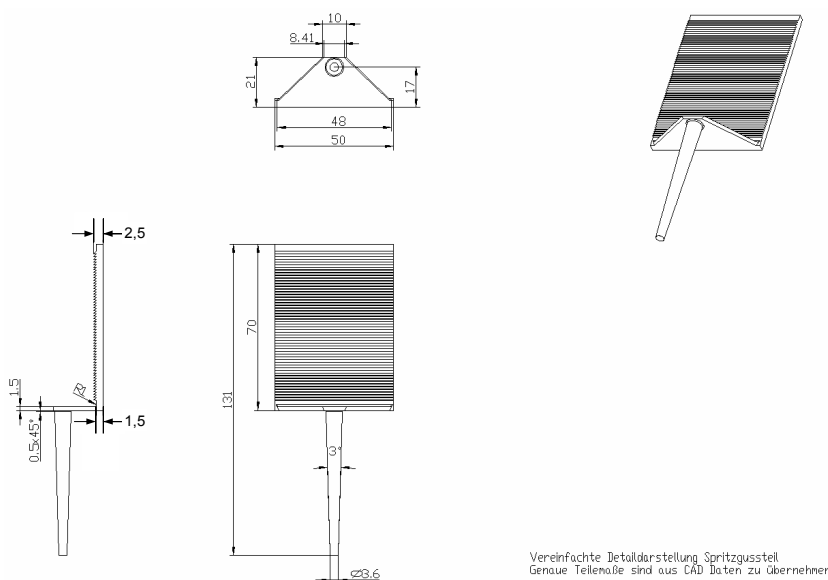


Abbildung 3: Kunststoff-Probekörper, Geometrie und Abmessungen [12].

3.1.4.2. Funktions- und Messprinzip

Abbildung 5 zeigt eine Schnittdarstellung der Haft- und Entformungskraft-Messapparatur mit den Bezeichnungen der wichtigsten Bestandteile bzw. Funktionseinheiten. Der Kunststoff-Probekörper wird in einem konventionellen Spritzgießprozess gefertigt. Die Nachdruckumschaltung erfolgt hierbei über einen angussnahen Forminnendrucksensor mit integriertem Thermoelement (p-T-Sensor) zur Messung der Werkzeugwandtemperatur. Die Werkzeugkavität wird nach oben hin durch einen Formeinsatz mit Sägezahnprofil, zur Seite hin durch spezielle Trennleisten und nach unten hin durch einen wechselbaren Stahl-Probekörper begrenzt (Konstruktionszeichnung s. Abbildung 4).

Der Stahl-Probekörper wird durch den mit einer Schraube (Vorspannbolzen) an der düsenseitigen Werkzeughälfte befestigten Schlitten aufgenommen. Die Temperatur des Stahl-Probekörpers kann mittels dreier Ni-Cr/Ni-Thermoelemente gemessen werden. Ein viertes Thermoelement dient zur Ermittlung des auftretenden Wärmestroms. Eine 6 mm dicke, zwischen Stahl-Probekörper und Schlitten dichtend eingesetzte Kupferplatte dient zur gleichmäßigeren Wärmeübertragung.

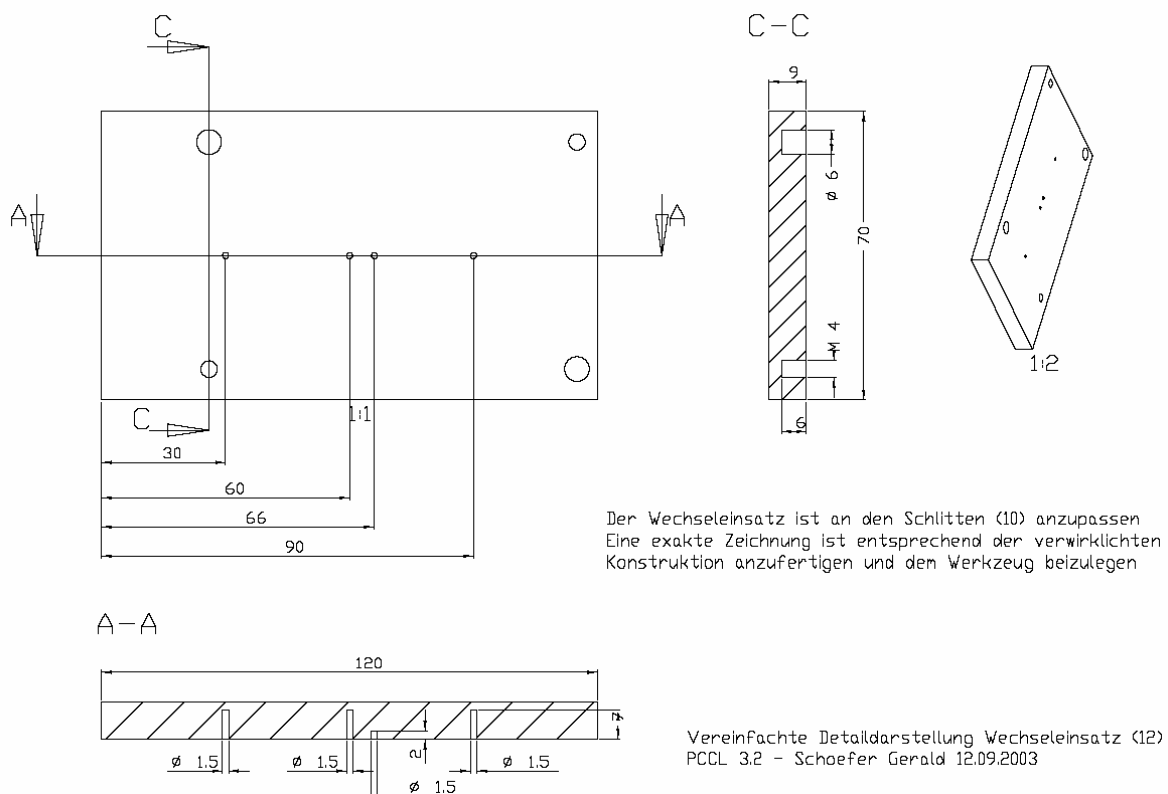


Abbildung 4: Stahl-Probekörper: Geometrie und Abmessungen [12].

Mit einem hydraulisch angesteuerten vertikalen Kolben (Hydraulikdrücke bis zu 120 bar) können während der Kompressions-, Abkühl- und Entformungsphase Vertikalkräfte bis zu 23.560 N über den Formeinsatz auf den Kunststoff-Probekörper übertragen werden. Der Kunststoff-Probekörper wird während der Werkzeug-Öffnungsbewegung über einen Öffnungsweg von 30 mm mit einer konstanten Vertikalkraft beaufschlagt. Durch die Sägezahnprofilierung bleibt der Kunststoff-Probekörper formschlüssig mit der schließseitigen Werkzeughälfte verbunden und wird während der Öffnungsbewegung auf dem Stahl-Probekörper abgezogen. Der Schlitten mit dem Stahl-Probekörper ist fix mit der düsenseitigen Werkzeughälfte verbunden. Die während der Werkzeug-Öffnungsbewegung auftretenden Haft- und Entformungskräfte werden mit einer zwischen dem Schlitten und dessen Befestigungsschraube (Vorspannbolzen) befindlichen piezoelektrischen Kraftaufnehmer (Quarkristall-Messunterlagscheibe) gemessen und als Funktion des Öffnungsweges aufgezeichnet. Der Stahl-Probekörper ist so ausgeführt, dass der Flächeninhalt der Kontaktfläche zwischen Kunststoff- und Stahl-Probekörper während des Öffnungsweges von 30 mm konstant bleibt. Während der Messung wird der Schlitten auf vier Nadelrollenlagern geführt. Damit wird verhindert, dass ein durch die Vertikalkraft hervorgerufenen Moment auf den Kraftaufnehmer wirkt, gleichzeitig wird dadurch eine möglichst reibungsfreie Abstützung des Schlittens während der Werkzeug-Öffnungsbewegung realisiert.

Ein Keil, der durch einen seitlichen Hydraulikzylinder angesteuert wird, wird unmittelbar nach dem Werkzeugschließen und noch vor dem Einspritzvorgang in das Werkzeug eingefahren. Dabei werden der Schlitten und der Stahl-Probekörper gegen die Dichtleisten gedrückt. Das Werkzeug und der Formhohlraum werden somit abgedichtet. Ein Ausweichen des Schlittens nach unten während des Einspritzvorganges und ein damit einhergehendes Überspritzen des Werkzeuges mit anschließender Beschädigung der Nadelrollenlager werden damit verhindert. Die vertikale Schlittenbewegung wird durch zwei zwischen düsenseitiger Formplatte und Schlitten angebrachte WC/C-beschichteten Gleitleisten erleichtert. Der seitliche Keil wird vor der Werkzeug-Öffnungsbewegung wieder eingezogen. Der genaue Zeitpunkt dafür wird vom eingestellten Betriebsmodus* bestimmt.

* Modus 2 und 3 kamen in dieser Arbeit nicht zum Einsatz und blieben deshalb unerwähnt.

Im Modus 1 wird am Ende der Nachdruckphase der Keil gezogen und der Kunststoff-Probekörper über den vertikalen Hydraulikzylinder mit einer definierten konstanten Vertikalkraft beaufschlagt. Der Schlitten bewegt sich dabei geringfügig nach unten und sinkt auf die Nadellager ab. Die Vertikalkraft bleibt während der ganzen Restkühlzeit und über einen Werkzeugöffnungsweg von 30 mm aufrecht. Bei Erreichen des Öffnungsweges von 30 mm wird das Formteil entlastet.

Die beiden Werkzeughälften und der Schlitten weisen jeweils einen eigenen Wasserkreislauf auf. Damit kann eine zuverlässige Temperierung gewährleistet werden.

Abbildung 6 zeigt die beiden Hälften der Haft- und Entformungskraft-Messapparatur. Auf der rechten Seite ist der Schlitten mit dem Stahl-Probekörper, den Nadelrollenlagern und den Anschlüssen für die Schlittentemperierung zu sehen. Auf der linken Seite sind der vertikale Kolben, der das Formteil über den oberen Formeinsatz mit der Vertikalkraft beaufschlagt, der Keil zur Unterstützung des Schlittens während der Einspritzphase und der seitliche Hydraulikzylinder zu sehen.

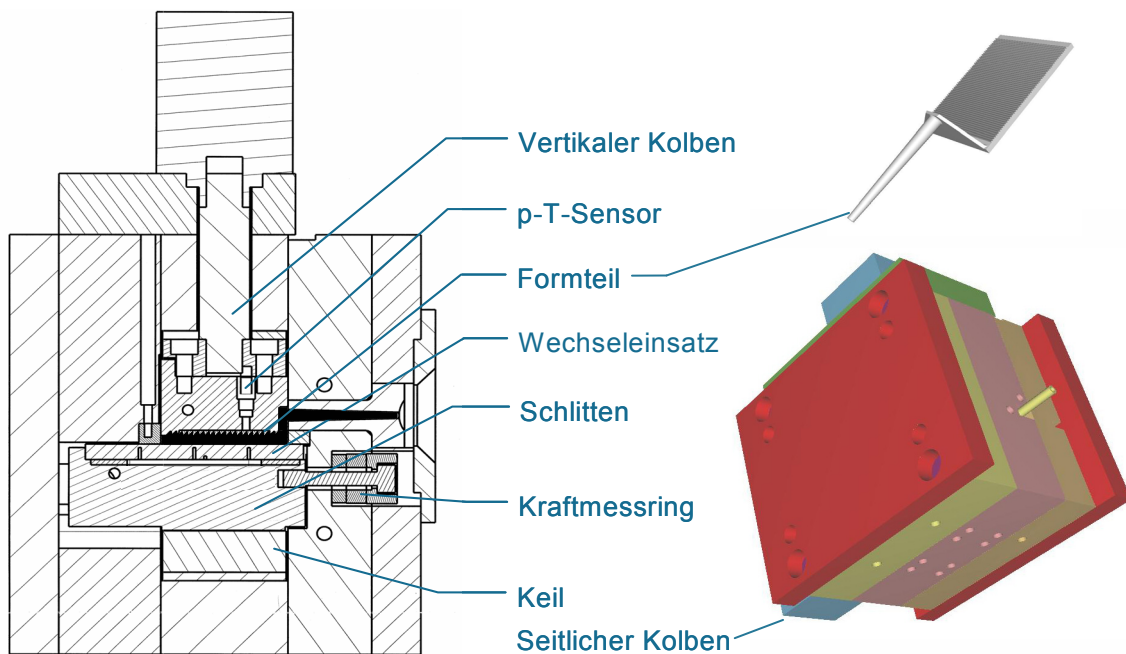


Abbildung 5: Haft- und Entformungskraft-Messapparatur, Schnittbild [1].

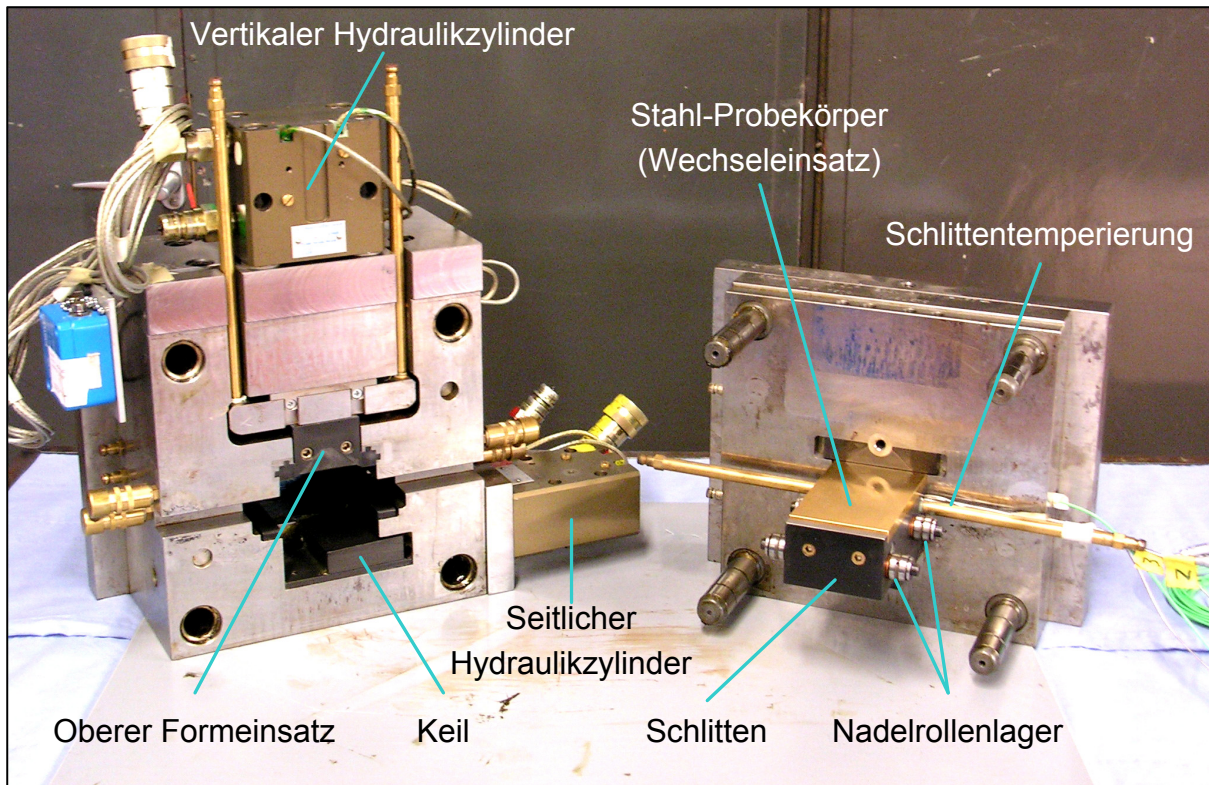


Abbildung 6: Formhälften der Haft- und Entformungskraft-Messapparatur [13].

3.1.5. Messsensoren

3.1.5.1. Druck- und Werkzeugwandtemperaturmessung

Für das Überwachen des Forminnendruckes und der Werkzeugwandtemperatur wurde ein kombinierter Druck- und Temperatur-Sensor (p-T-Sensor) des Typs Kistler 6190A der Firma Kistler Instrumente AG, Winterthur/Schweiz, verwendet. Die Messung des Forminnendruckes erfolgt hierbei mit einem piezoelektrischen Quarzsensoren, der zwischen 0 bar und 100 bar eine Empfindlichkeit von $-2,519 \text{ pC/bar}$ und eine Linearität von kleiner $\pm 0,1 \%$ über den gesamten Messbereich aufweist. Die Werkzeugwandtemperatur wurde mit dem Sensor über ein Thermoelement der Type K (Ni-Cr/Ni) detektiert. Das Messsignal des piezoelektrischen Kraftaufnehmers wurde mit dem internen Verstärker der Spritzgießmaschine verstärkt und mit dem Messdatenerfassungssystem aufgenommen. Die Erfassung des Temperatur-Messsignals erfolgte direkt vom Thermoelement ohne Verstärkung.

3.1.5.2. *Temperaturmessung am Stahl-Probekörper (Wechseleinsatz)*

Die Ermittlung der Temperaturen am Stahl-Probekörper erfolgte mit vier Standard-Mantelthermoelementen der Type K (Ni-Cr/Ni) der Firma Thermocoax GmbH, Hamburg/Deutschland. Die Temperatur-Messsignale wurden dem Messdatenerfassungssystem unverstärkt zugeführt.

3.1.5.3. *Messung der Haft- und Entformungskräfte*

Die bei der Werkzeugöffnung auftretenden Haft- und Entformungskräfte wurden mit einer Quarzkristall-Messunterlagscheibe des Typs 9031A der Firma Kistler Instrumente AG, Winterthur/Schweiz, gemessen. Diese Messunterlagscheibe weist zwischen 0 N und 10.000 N eine Empfindlichkeit von $-4,371 \text{ pC/N}$ und eine Linearität von kleiner $\pm 0,4 \%$ über den gesamten Messbereich auf. Die von der Messunterlagscheibe bei Belastung erzeugte elektrische Ladung wird von einem Ladungsverstärker des Typs 5041E1 der Firma Kistler Instrumente AG, Winterthur/Schweiz, in eine proportionale Spannung umgewandelt, welche dem Messdatenerfassungssystem zugeführt wird. Die Versorgung des Ladungsverstärkers mit einer Speisespannung von 24 V erfolgt mit einem stabilisierten Netzgerät des Typs AT5VS der Firma KERT, Caerano di San Marco/Italien. Der Ladungsverstärker kann von Betrieb auf Reset geschaltet werden, in dem die Verbindung der Anschlüsse „Operate“ und „Ground“ getrennt wird. Dies erfolgt über ein Relais des Typs RL3011024 der Firma Schrack Energietechnik GmbH, Wien/Österreich, das bei Betätigung des Schalters „Werkzeug schließen“ an der Spritzgießmaschine die beiden Anschlüsse trennt und eine Entladung des Bereichskondensators des Ladungsverstärkers bewirkt.

3.1.5.4. *Messung des Hydraulikdrucks am vertikalen Zylinder*

Der am vertikalen Zylinder anliegende Hydraulikdruck wurde mit einem Drucktransmitter des Typs P2VA1 der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt/Deutschland, gemessen. Dieser Drucktransmitter besteht aus einem passiven DMS-Absolutdruck-Aufnehmer mit einem monolithischen Stahl-Messkörper. Im Gehäuse des Drucktransmitters sind ein analoger Sensorverstärker und eine digitale Steuerung zur Signalkorrektur integriert. Der Drucktransmitter weist einen Messbereich von 0 bar bis 200 bar auf und wird über ein Netzgerät mit einer Speisespannung von 24 V versorgt.

3.1.5.5. *Messung des Werkzeugöffnungsweges*

Zur Messung des Werkzeugöffnungsweges wurde das Signal des potentiometrischen Wegaufnehmers des Typs LWH 6190 der Firma Novotechnik Messwertaufnehmer OHG, Ostfildern/Deutschland, von der Steuerplatine der Spritzgießmaschine auf eine BNC-Buchse und von dort dem Messdatenerfassungssystem über ein BNC-Kabel unverstärkt zugeführt.

3.1.6. **Messdatenerfassung**

Zur Messdatenerfassung wurde ein handelsüblicher PC mit AMD Sempron 2,4 GHz Prozessor, 512 MB RAM und 15-Zoll TFT-Monitor verwendet. Der Messrechner arbeitet mit dem Betriebssystem Windows 2000 der Firma Microsoft. Die Messsignale wurden über die PC-Messelektronik Spider8 der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt/Deutschland, ausgewertet. Die Messdaten wurden mit der Software BEAM™ V 3.11a3 (WIN 32 bit) der Firma AMS – Gesellschaft für angewandte Mess- und Systemtechnik mbH, Flöha/Deutschland, aufgezeichnet.

3.1.7. **Granulattrockner**

Für die Vortrocknung der für die Messungen verwendeten Kunststoffgranulate wurde der Trockenlufttrockner des Typs Motan Trockenlufterzeuger MDC 100 HT der Firma Motan GmbH, Isny im Allgäu/Deutschland, des Instituts für Kunststoffverarbeitung an der Montanuniversität Leoben verwendet.

3.2. **Verwendete Materialien**

3.2.1. **Kunststoffe**

Die Haft- und Entformungskraftmessungen dieser Arbeit beschränken sich auf vier verschiedene Polypropylen-Typen, Polyoxymethylen sowie zwei Ionomer-Typen aus der Klasse der thermoplastischen Elastomere. Nachfolgend wird auf diese Materialien hinsichtlich Eigenschaften und Einsatzgebiete noch näher eingegangen. Eine Zusammenfassung der Eigenschaften ist in Tabelle 2 dargestellt.

3.2.1.1. *DOW™ C705–44NA (PP)*

C705-44NA der Firma Dow Europe, Horgen/Schweiz, ist ein schlagfestes Copolymer mit niedriger Melt-Flow-Rate und hoher Steifigkeit bei guter Schlagzähigkeit. Das Einsatzgebiet des Produkts liegt im Spritzguss von dünnwandigen Containern, Haushaltsartikeln und langlebigen Gebrauchsgütern [8].

3.2.1.2. *DOW™ C791–30NA Polypropylene Resin (PP)*

C791–30NA Polypropylene Resin der Firma Dow Europe, Horgen/Schweiz, ist ein hochschlagfestes Copolymer, das speziell für die Verarbeitung im Spritzguss entwickelt wurde. DOW C791–30NA stellt eine hervorragende Kombination aus mechanischen und antistatischen Eigenschaften bei guter Verarbeitbarkeit dar. Vorteile sind hohe Steifigkeit und höchste Schlagfestigkeit selbst bei niedrigen Temperaturen. Typische Anwendungen findet DOW C791–30NA bei dünnwandigen Behältnissen, Eimern, Haushaltswaren, Deckel und Verschlusskappen [9].

3.2.1.3. *DR7023.00 Developmental Polypropylene Resin (PP)*

DR7023.00 Developmental Polypropylene Resin der Firma Dow Europe, Horgen/Schweiz, ist ein unregelmäßiges Copolymer, das in seinen mechanischen Eigenschaften eine gute Balance zwischen Steifigkeit und Schlagzähigkeit bietet und weiters gute optische Eigenschaften sowie gute Verarbeitbarkeit in sich vereint. Die technische Anwendung liegt im Allgemeinen bei dünnwandigen Spritzgussteilen, Haushaltswaren, Deckel und Verschlusskappen und Medienverpackungen [7].

3.2.1.4. *INSPIRE™ 702 Performance Polymer (PP)*

INSPIRE™ 702 Performance Polymer der Firma Dow Europe, Horgen/Schweiz, ist ein Copolymer mit ausgewogenen Eigenschaften in seiner Schlagzähigkeit und Steifigkeit, hervorragendem Entformungsverhalten und lang anhaltender Antistatikwirkung. Typische Artikel sind Haushaltswaren, Eimer und Kübel [10].

3.2.1.5. *Surlyn 1652 (TPE)*

Surlyn 1652 der Firma DuPont Engineering Polymers, Genf/Schweiz ist ein sog. thermoplastisches Elastomer auf Basis eines Zink-Polyethylene-Copolymers und vereinigt eine spezielle Kombination aus den Eigenschaften von Elastomeren und

Thermoplasten. Besonders hervorzuhebende Eigenschaftsverbesserungen sind guter Reißwiderstand, gute Schlagzähigkeit auch bei tiefen Temperaturen, hoher Abrasionswiderstand, gute Glanzeigenschaften und vor allem die Möglichkeit einer thermoplastischen Verarbeitung beim Extrudieren oder Spritzgießen. Die Einsatzgebiete sind Beschichtungen für Verpackungsmaterialien für Fleisch, Meeresfrüchte, Käse, Motoröle und in der Pharmazie [6].

3.2.1.6. Iotek 8030 (TPE)

Iotek 8030 Ionomer der Firma Exxon Mobil Corporation gehört ebenfalls in die Gruppe der thermoplastischen Elastomere auf Basis eines Polyethylen-Copolymers (E/MMA = Ethylene Acrylic Acid Copolymer). Iotek Ionomere sind Zink- bzw. Natriumsalze von Ethylen-Acrylsäure-Copolymeren. Sie stellen flexible, transparente, gut einfärbbare und für den Lebensmittelbereich zugelassene Thermoplaste dar. Hauptanwendungsbereiche sind hoch flexible Folienverpackungen, kratzfeste Luxus-Haushaltsartikel, teilweise mit Soft-Touch-Eigenschaften (Sekt Kühler, Türgriffe, Parfümflakons), schlagzähe Sportartikel wie Skischuhe, Golfbälle oder Bowlingkegel sowie die Schlagzähmodifikation von Polyamiden für transparente, helle Produkte oder solche, die mit Lebensmitteln in Kontakt kommen. Zu den herausragenden Eigenschaften gehören gute thermoplastische Verarbeitbarkeit dank hoher Fließfähigkeit, verbesserte Schlagzähigkeit, gute Glanz und Transparenzeigenschaften. Das Material kann auf herkömmlichen Anlagen für LDPE verarbeitet werden. Ionomere tendieren im nicht geschützten Zustand zur Feuchtigkeitsaufnahme aus der Atmosphäre, daher sind Verpackungseinheiten nach dem Öffnen wieder zu versiegeln und das Material vor Wiederverarbeitung gegebenenfalls bei den empfohlenen Bedingungen zu trocknen [5].

3.2.1.7. Hostaform C27021 (POM)

Hostaform C27021 der Firma Ticona ist ein teilkristallines, polares, leicht fließfähiges Copolymer mit hoher Härte und Kältefestigkeit. Weitere Eigenschaften sind gute chemische Resistenz gegen Lösungsmittel wie Kraftstoffe und starke Alkalilösungen, ebenso hohe Beständigkeit gegen thermischen und oxidativen Abbau. Die gute Fließfähigkeit wird besonders beim Einsatz in dünnwandigen Präzisions-

Spritzgussteilen mit komplizierten Angussystemen und kurzen Zykluszeiten ausgenutzt [11].

Tabelle 2: Materialeigenschaften der verwendeten Kunststoffe [5] – [11].

	Dichte (ISO 1183) (g/cm ³)	MFR (ISO 1133) (g/10min)	Lineare Verarbeitungs- schwundung in (%)	Schmelztemperatur- bereich in (°C)
PP 705-44NA	0,9	44 (ISO 1133, 230°C/2,16g)		
PP 791-30NA	0,9	30 (ISO 1133, 230°C/2,16g)		
PP DR7023.00	0,9	42 (ISO 1133, 230°C/2,16g)		
PP Inspire 702	0,9	45 (ISO 1133, 230°C/2,16g)		
TPE Surlyn 1652	0,94	5,2 (ISO 1133, 190°C/2,16g)		204-221
TPE Iotek 8030		2,8 (ISO 1133, 190°C/2,16g)		
POM Hostaform C27021	1,41	24 (ISO 1133, 190°C/2,16g)	1,8	190-210

3.2.2. Stahlprobekörper (Werkzeugeinsätze)

Die verwendeten Stahlprobekörper sind allesamt aus der Stahlsorte BÖHLER M333 ISOPLAST gefertigt, die von der Firma Böhler Edelstahl GmbH, Kapfenberg/Österreich erzeugt wird. In folgender Tabelle 3 sind diese mit ihrer Kurzbezeichnung, Oberflächenstruktur, Hartstoffbeschichtung und Mittenrauigkeit aufgelistet.

Tabelle 3: Auflistung der verwendeten Stahl-Probekörper.

Bezeichnung Stahl-Probekörper	Oberflächenstruktur	Hartstoffbeschichtung mit (Codierungszahl)	Chemische Bezeichnung	Mittenrauwert R_a (μm)
Pos.6	Strichpolitur längs	keine (1)	-	0,311
Pos.8	Hochglanzpolitur	keine (1)	-	0,021
Pos.13	Strichpolitur längs	Balinit A (1)	TiN	0,250
Pos.29	längs geschliffen	VST-DLC (2)	a-C:H:Si	0,056
Pos.30	längs geschliffen	DLC-Flex (3)	a-C:H	0,074
Pos.32	längs geschliffen	DLC-Flex (3)	a-C:H	0,059
Pos.34	längs geschliffen	VST-DLC (2)	a-C:H:Si	0,039

3.3. Versuchsdurchführung

3.3.1. Versuchsplanung

Die Anzahl der Spritzgießversuche ergibt sich aus den jeweiligen Kombinationen von Material, Stahlprobekörper, Werkzeugvorlaufstufen und Vertikalkraftstufen, die aus folgender Tabelle 4 zu entnehmen sind.

Tabelle 4: Versuchsplan.

Kunststoffe	Stahl-Probekörperbezeichnung und Werkzeugvorlaufstufen (°C)						Vertikalkraft- stufen	Versuchsanzahl
	Pos.6	Pos.8	Pos.29	Pos.30	Pos.32	Pos.34		
PP C705-44NA	15, 40	15, 40	40		40		7	42
PP C791-30NA	15, 40	15, 40					7	28
PP DR7023	15, 40	15, 40					7	28
PP Inspire 702	15, 40	15, 40					7	28
TPE surlyn1652	15, 40	15, 40					5	20
TPE lotek 8030	40	40					5	10
POM Hostform C27021			60, 80	60	60, 80	60, 80	7	49
Summe								205

Tabelle 5 zeigt die empfohlenen Werkzeugtemperaturen und die gewählten Werkzeugtemperatur-Planstufen für den jeweiligen Kunststoff, wobei diese Temperaturen der Vorlaufstufen des Temperieraggregates entsprechen. Die tatsächliche Formeinsatztemperatur während der Entformung ist typischerweise 2°C bis 7°C höher (Tabelle 5).

Tabelle 5: Empfohlene Werkzeugtemperaturbereiche und Vorlaufemperatur-Planstufen [5] – [11], sowie deren Ist-Mittelwerte am Wechseleinsatz.

	PP	POM	TPE
Empfohlener Werkzeugtemperaturbereich in (C°)	20-90	60-120	5-50
Vorlaufemperatur (niedrig) in (C°)	15	60	15
Ist-Temperatur am Probekörper (C°)	~17	~66	~15,5
Vorlaufemperatur (hoch) in (C°)	40	80	40
Ist-Temperatur am Probekörper (C°)	~ 45,5	~85,5	~43

Die Versuche wurden mit einer Vorspannung der Kraftmessdose von 1500 N sowie einer eingestellten Entformungsgeschwindigkeit von 15 mm/s durchführt. Die während einer Messung auf den Kunststoff-Probekörper aufgebrachte Vertikalkraft kann nur indirekt über den im vertikalen Hydraulikzylinder wirkenden Hydraulikdruck eingestellt werden. Dabei ist ein Druckbereich von 20 bar bis 120 bar nutzbar. Zur Berechnung der Vertikalkraft ist der im vertikalen Hydraulikzylinder wirkende Hydraulikdruck mit der Kolbenfläche $A_K = 1.963,49 \text{ mm}^2$ zu multiplizieren (Gleichung (2)). Die Vertikalkraft verursacht einen Kontaktdruck in der Kontaktfläche zwischen Kunststoff- und Stahl-Probekörper. Dieser Kontaktdruck entspricht dem Quotienten aus der Vertikalkraft und dem Flächeninhalt der Kontaktfläche (3500 mm^2) (siehe Gleichung (3)).

In Tabelle 6 sind die Hydraulikdruckstufen des Versuchsplanes und die daraus resultierenden Vertikalkräfte und Kontaktdrücke zusammengefasst.

Tabelle 6: Hydraulikdruckstufen, Vertikalkräfte und Kontaktdrücke.

Hydraulikdruck	Vertikalkraft	Kontaktdruck
bar	kN	N/mm²
Standardstufen		
25	4,91	1,40
45	8,84	2,52
60	11,78	3,37
70	13,74	3,93

Fortsetzung Tabelle 6:

80	15,71	4,49
90	17,67	5,05
100	19,64	5,61
Alternativstufen (TPE)		
25	4,91	1,40
30	5,89	1,68
40	7,85	2,24
45	8,84	2,52
60	11,78	3,37

3.4. Versuchsablauf

Ausgehend von einem vollständig geöffneten Werkzeug mit abgesenktem vertikalem Kolben gliedert sich ein Messzyklus in die nachfolgend beschriebenen seriell ablaufenden Einzelschritte:

Werkzeugschließvorgang

Zunächst wird der obere Formeinsatz mit dem vertikalen Hydraulikzylinder hochgefahren, anschließend erfolgt die Schließbewegung des Werkzeuges (vgl. Abbildung 7, links).

Abdichten des Werkzeuges

Nach dem Aufbringen der erforderlichen Schließkraft auf das Werkzeug wird der seitliche Keil eingefahren. Der Schlitten bewegt sich dadurch etwas nach oben, die Nadelrollenlager verlieren den Kontakt mit den Führungsleisten. Dabei wird der Stahl-Probekörper gegen die Trennleisten gedrückt und die Kavität wird abgedichtet (vgl. Abbildung 7, rechts).

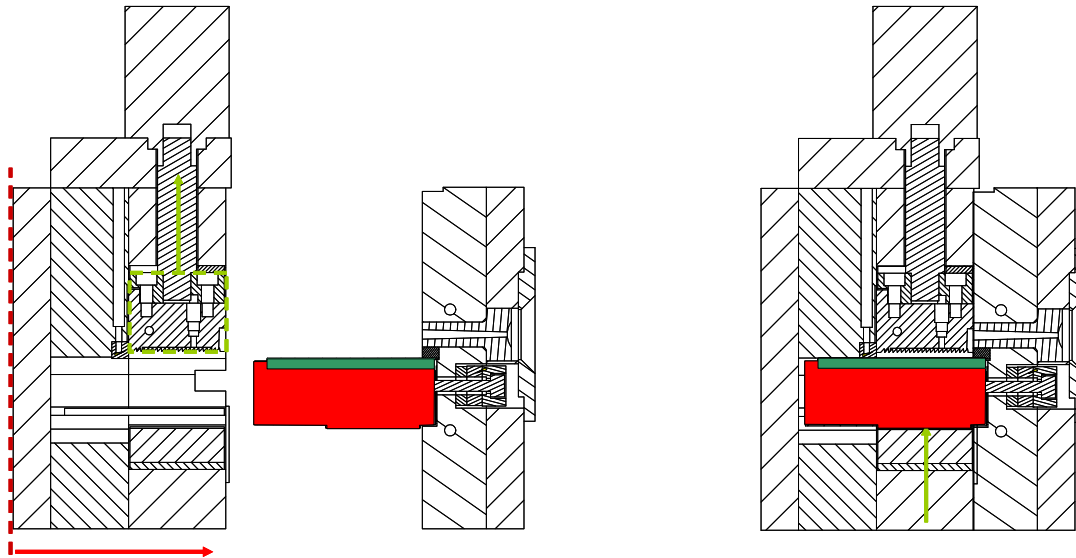


Abbildung 7: Versuchsablauf, Werkzeugschließvorgang und Abdichten des Werkzeuges [12].

Spritzen des Kunststoff-Probekörpers

Der Kunststoff-Probekörper wird in einem konventionellen Spritzgießprozess bestehend aus Einspritz-, Nachdruck-, und Kühlphase gefertigt. Am Ende der Nachdruckzeit wird die eigentliche Messung vorbereitet. Dazu wird der seitliche Keil wieder aus dem Werkzeug gefahren und der Kunststoff-Probekörper wird über den vertikalen Hydraulikzylinder mit einer definierten Vertikalkraft belastet. Dabei sinkt der Schlitten auf seine Lager ab, die dann wieder Kontakt mit den Führungsleisten haben (vgl. Abbildung 8, links). Während der Einspritz- und Nachdruckphase werden der angussnahe Forminnendruck und die Werkzeugwandtemperatur an der Stelle des Drucksensors erfasst und aufgezeichnet (vgl. Abbildung 8, rechts).

Haft- und Entformungskraftmessung

Nach Ablauf der Restkühlzeit öffnet das Werkzeug mit konstanter Geschwindigkeit. Bis zu einem Öffnungshub von 30 mm bleibt die Belastung des Kunststoff-Probekörpers durch die Vertikalkraft aufrecht, danach wird der Kunststoff-Probekörper entlastet (vgl. Abbildung 9, links). Als Messsignal wird die mittels piezoelektrischem Kraftaufnehmer erfasste Entformungskraft (Öffnungskraft als Funktion des Messweges (Öffnungshub)) erfasst. Weiters werden die Stahl-Probekörpertemperaturen und der im vertikalen Hydraulikzylinder wirkende Hydraulikdruck erfasst und aufgezeichnet.

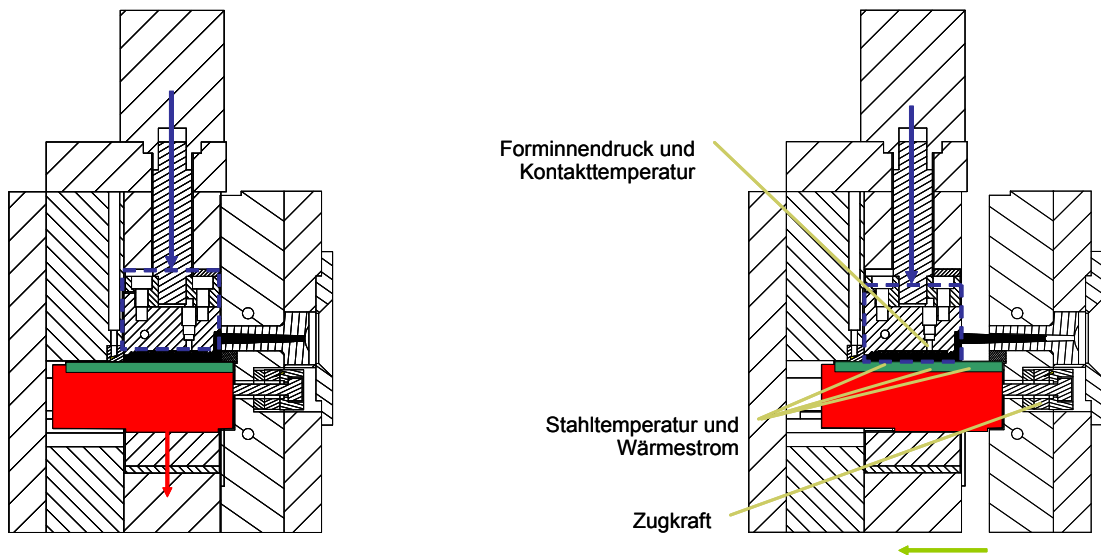


Abbildung 8: Versuchsablauf, Spritzen des Kunststoff-Probekörpers und Entformungskraftmessung [12].

Werkzeugöffnung und Entformung

Das Werkzeug wird bis zum maximalen Öffnungshub geöffnet. Dann wird der vertikale Kolben ca. 10 mm nach unten gefahren. Der Kunststoff-Probekörper wird dadurch seitlich freigestellt und die darauf folgende händische Entformung erleichtert (vgl. Abbildung 9, rechts).

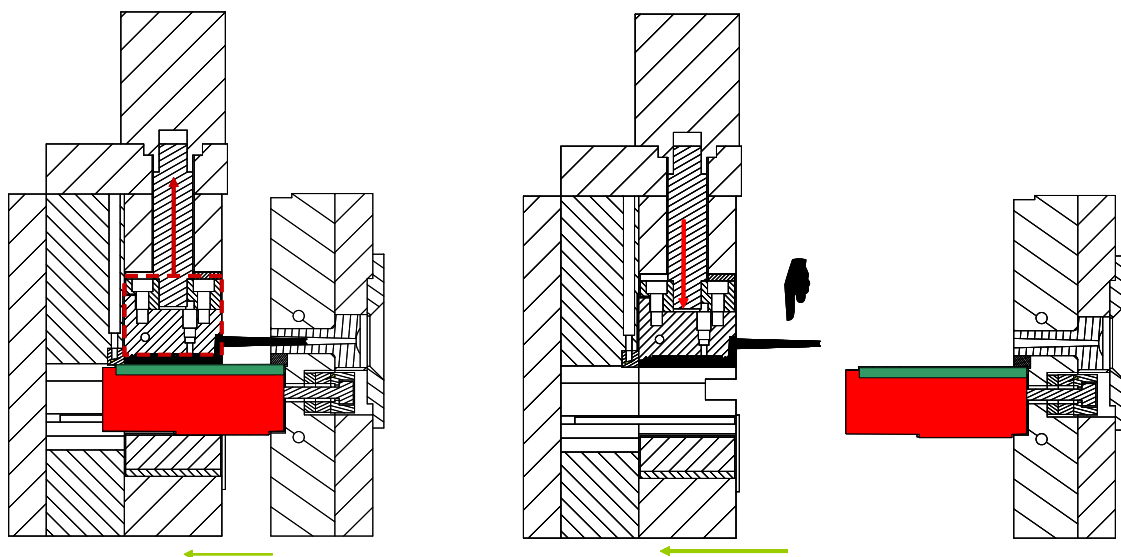


Abbildung 9: Versuchsablauf, Werkzeugöffnung und Entformung [12].

In Abbildung 10 ist beispielhaft ein Messzyklus für einen Versuch mit ABS/PC Pulse A35-110 kombiniert mit einem spiegelpolierten, mit Balinit A beschichteten Stahl-

Probekörper aus Böhler M333 Isoplast mit den einzelnen Schritten des Versuchsablaufs dargestellt.

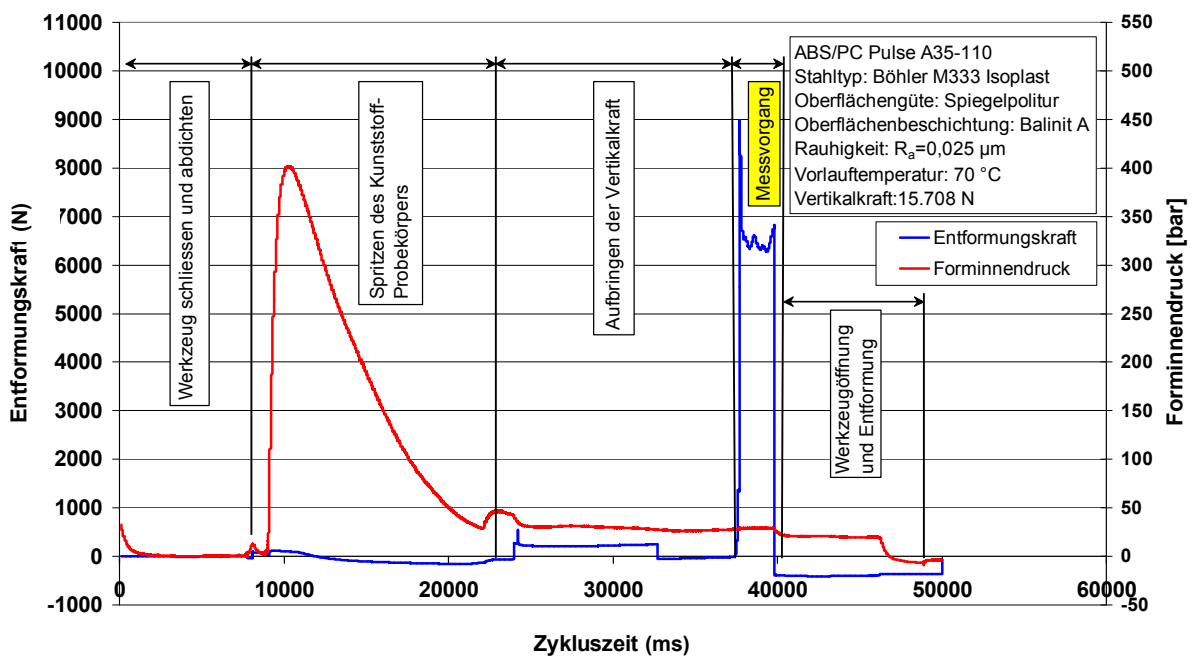


Abbildung 10: Beispielhafter Messzyklus für die Entformungskraftmessung: Entformungskraft und Forminnendruck als Funktion der Zykluszeit [13].

Alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche (Messungen) erfolgten im Modus 1 (vgl. Seite 13, Zeile 1 ff) der Haft- und Entformungskraftmessapparatur sowie im Halbautomatikbetrieb der Spritzgießmaschine (händische Entformung). Vor jeder Änderung der Hydraulikdruckstufe wurde die Vorspannkraft an der Befestigungsschraube des Schlittens neu eingestellt, um einen Vorspannkraftverlust und ein Lockerwerden des Schlittens mit Fortdauer der Messungen (mit zunehmender Anzahl der Messzyklen) zu vermeiden. Pro Hydraulikdruckstufe wurden zehn Kunststoff-Probekörper gefertigt. Die Fertigung der ersten vier Kunststoff-Probekörper erfolgte ohne Messdatenerfassung und diente zur Schaffung stabiler thermischer Bedingungen am Stahl-Probekörper und im Werkzeug nach der vorangegangenen Unterbrechung für das Vorspannen der Kraftmessdose. Bei der Fertigung der restlichen sechs Kunststoff-Probekörper wurden die Messdaten erfasst. Es wurde besonders darauf geachtet, die Pausen zwischen den einzelnen Messungen (Öffnen der Spritzgießmaschinentür, Formteilentnahme, Schließen der Maschinentür, Auslösen der nächsten Messung) möglichst konstant zu halten, mit dem Ziel gleicher thermischer Bedingungen bei jeder Messung.

Nach jedem Wechsel des Stahl-Probekörpers am Schlitten wurden bestehende bzw. beim Montagevorgang unabsichtlich eingebrachte Verunreinigungen (Schmierfett, etc.) mit CRC Bräkleen Bremsenreiniger (Hersteller: CRC Industries Europe BVBA, Zele/Belgien) entfernt. Eine derartige Reinigung wurde auch nach einem Materialwechsel an der Spritzgießmaschine bei gleich bleibendem Stahl-Probekörper durchgeführt, um den Einfluss eines eventuellen Formbelags vom Vorgängermaterial zu egalisieren. Um verfälschte Messergebnisse durch die geänderte Oberflächenspannung am Stahl-Probekörper nach dem Reinigungsvorgang zu vermeiden, wurden vor Wiederaufnahme der Serienmessungen 40 Kunststoff-Probekörper ohne Messdatenerfassung gespritzt.

3.5. Versuchsauswertung

Die für jeden einzelnen Messzyklus in einer eigenen BEAM-Strukturdatei abgespeicherten Messdaten wurden zunächst in Textdateien (.txt) exportiert. Die Textdateien wurden danach mit dem Makro „Berechnung2.xls“ [18] automatisch eingelesen und ausgewertet. Bei der makrogesteuerten Auswertung erfolgt eine Nachbearbeitung des gemessenen zeitlichen Horizontalkraftverlaufs: Unmittelbar vor der Werkzeug-Öffnungsbewegung (seitlicher Keil gezogen, Kunststoff-Probekörper mit Vertikalkraft beaufschlagt) wirkt (entgegen der Konzeptionierung) eine der Vorspannkraft überlagerte Zug- oder Druckkraft (Vorzeichen + oder -) auf den piezoelektrischen Kraftaufnehmer. Die Höhe dieser Kraft wird ermittelt und je nach Vorzeichen zum Horizontalkraftverlauf addiert oder davon subtrahiert. Die Vorspannkraft der Befestigungsschraube des Schlittens muss bei der Auswertung nicht berücksichtigt werden, diese wird über den Reset des Ladungsverstärkers bei Betätigung des Schalters „Werkzeug schließen“ an der Spritzgießmaschine automatisch vom Messsignal abgezogen. Abbildung 11 zeigt beispielhaft einen unbearbeiteten Horizontalkraftverlauf in Abhängigkeit von der Zykluszeit. Dargestellt wird der Zeitbereich kurz vor der Werkzeug-Öffnungsbewegung bis zum Erreichen des Messweges von 30 mm. Auf eine software-technische Korrektur des Weg-Offsets, der sich aus der Differenz von Position „geschlossenes Werkzeug“ zum Nullpunkt des Werkzeugwegaufnehmers an der Spritzgießmaschine ergibt, wurde verzichtet.

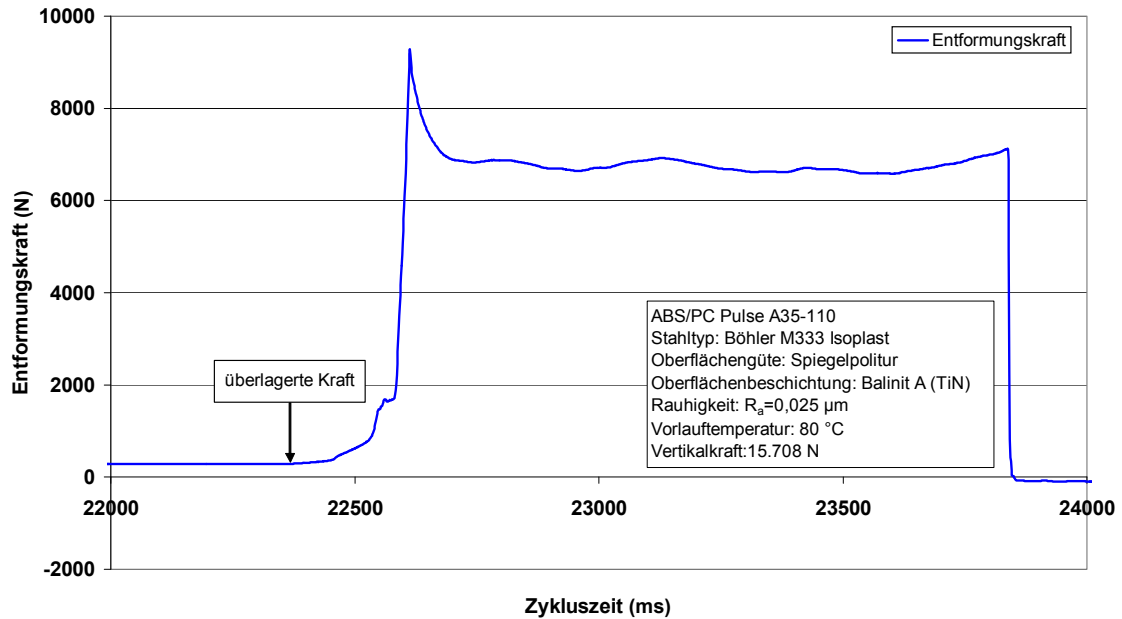


Abbildung 11: Horizontalkraft als Funktion der Zykluszeit vor der Nachbearbeitung im Versuch für Pulse A35-110 [13].

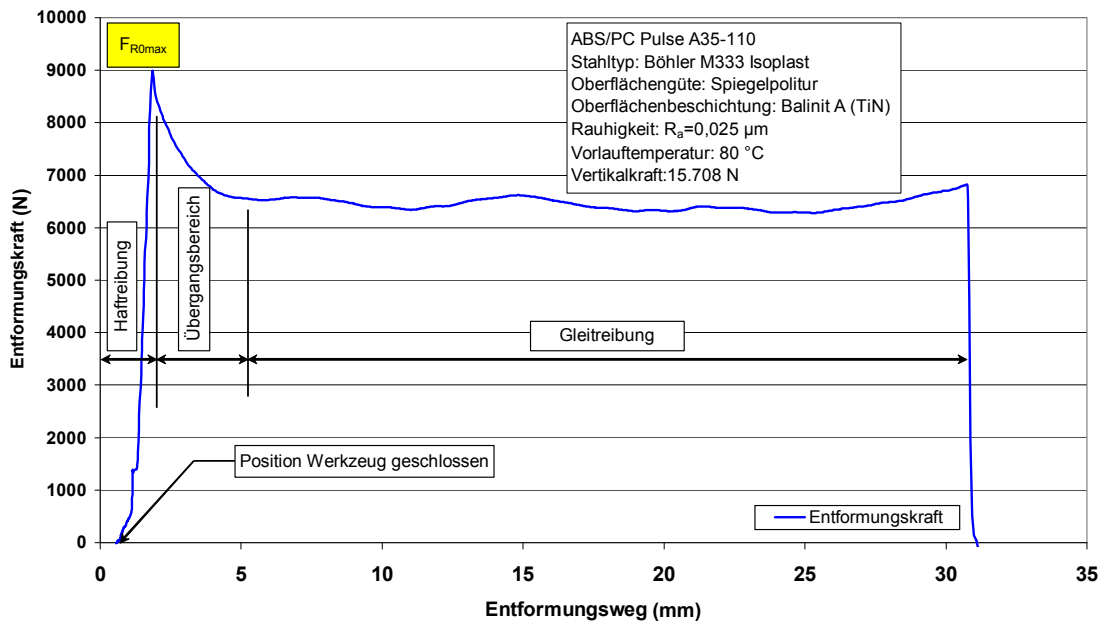


Abbildung 12: Nachbearbeiteter Horizontalkraftverlauf als Funktion des Messweges im Versuch für Pulse A35-110 [13].

Abbildung 12 zeigt einen nachbearbeiteten Horizontalkraftverlauf in Abhängigkeit des Werkzeugöffnungsweges mit den Bereichen unterschiedlicher Reibungszustände zwischen Stahl- und Kunststoff-Probekörper. Im Haftreibungsbereich steigt die Horizontalkraft kontinuierlich an, bis es beim Maximalwert zu einem Losbrechen des

Kunststoffs aus den Vertiefungen der Oberflächenstruktur des Stahl-Probekörpers kommt. In einem kurzen Übergangsbereich wird die Haftreibung abgebaut, darauf folgt der im überwiegenden Teil des Messweges vorherrschende Gleitreibungsbereich. Aus dem Haftreibungsbereich wird die maximale Haftreibungskraft F_{R0max} (vgl. Peak in Abbildung 12) ermittelt. Mit dem zugehörigen Hydraulikdruckwert p_{Hyd} wird die auf den Kunststoff-Probekörper wirkende Vertikalkraft F_V berechnet. Der Haftreibungswert μ_0 ergibt sich aus dem Quotienten von maximaler Haftreibungskraft F_{R0max} und der zu diesem Zeitpunkt wirkenden Vertikalkraft F_V (vgl. Gleichungen (2) und (4)). Weiters werden die zum Zeitpunkt des Auftretens der maximalen Haftreibungskraft F_{R0max} im Stahl-Probekörper und am Kunststoff-Probekörper (Werkzeugwand) vorherrschenden Temperaturen ermittelt.

$$F_V = p_{Hyd} * A_{Kolben} \quad (2)$$

$$p_K = \frac{F_V}{A_K} \quad (3)$$

$$\mu_0 = \frac{F_{R0max}}{F_V} \quad (4)$$

Mit : F_VVertikalkraft,
 p_KKontaktdruck,
 p_{Hyd}Hydraulikdruck,
 F_{R0max} ...maximaleHaftreibungskraft,
 μ_0Haftreibungskraft,
 A_{Kolben} ...Kolbenfläche des vertikalen Hydraulikzylinders.

Aus dem Gleitreibungsbereich wird zunächst für jeden Messpunkt des Horizontalkraftverlaufs zwischen 5 und 30 mm des Messweges die Gleitreibungszahl ermittelt, indem der jeweilige Quotient aus Horizontal- (Reib-) und Normalkraft gebildet wird. Die Berechnung der Vertikalkraft erfolgt hierbei wieder mit dem zugehörigen Hydraulikdruckwert. Aus der Menge der Gleitreibungszahlen wird das arithmetische Mittel (mittlerer Gleitreibungswert) berechnet. Weiters werden aus den aufgezeichneten Messdaten für den ausgegebenen Messweg die Temperaturen an den Messstellen im Stahl- und am Kunststoff-Probekörper (Werkzeugwand) ermittelt und daraus das arithmetische Mittel für jede Messstelle berechnet.

Die Datenausgabe erfolgt für jede Versuchseinstellung in einem eigenen Excel-Arbeitsblatt. In einer Tabelle werden die einzelnen Ergebnisse für fünf Messzyklen einer Versuchseinstellung unter zusätzlicher Angabe des Mittelwertes, des Variationskoeffizienten und der Standardabweichung aus den fünf Messzyklen zusammengefasst. Die nachbearbeiteten Horizontalkraftverläufe werden in Abhängigkeit des Werkzeugöffnungsweges (Messweges) in einem Diagramm dargestellt. Abbildung 13 zeigt beispielhaft eine solche Grafikausgabe für einen Versuch mit ABS/PC Pulse A35-110.

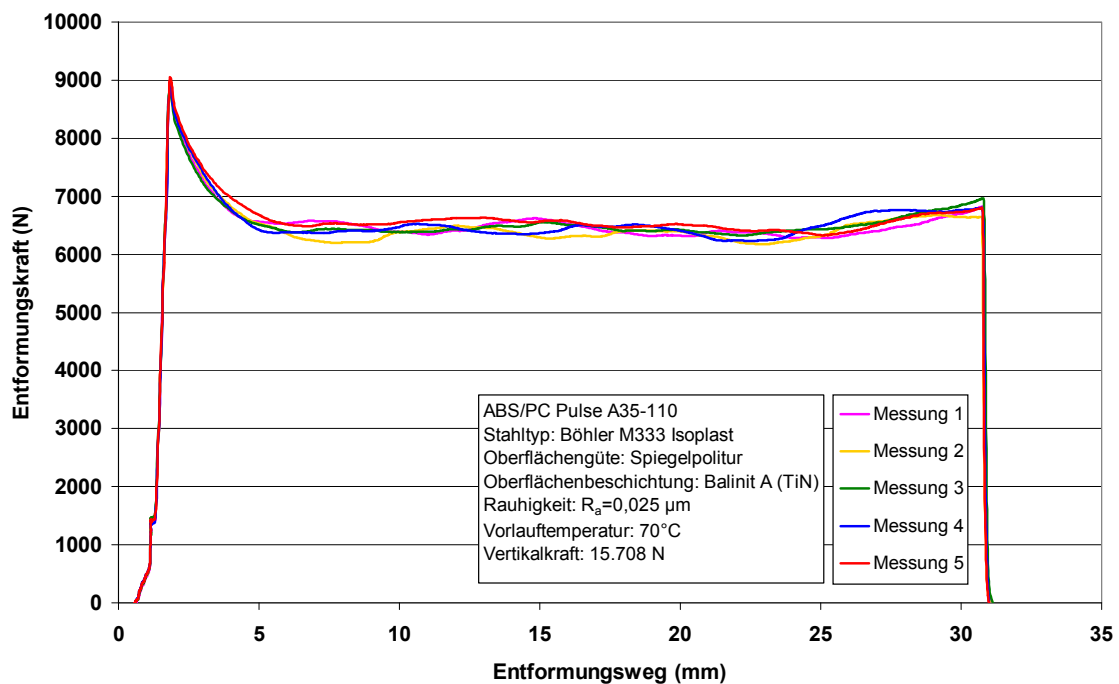


Abbildung 13: Grafikausgabe für 5 Messzyklen im Versuch für Pulse A35-110 [13].

4. Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die ermittelten Entformungskraftkurven und Haftreibwerte in Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit, des Kontaktdruckes und der Vorlauf-temperatur für die verwendeten Kunststoffe analysiert und grafisch dargestellt. Zur einfacheren Zuordnung der Kurven zu den Einstellungswerten sind in sämtlichen Diagrammen für die strichpolierte blaue und für die hochglanzpolierte Probekörper-Oberfläche grüne Farbtöne gewählt. Die hellen Farbtöne stehen für die hohe, die dunklen Farbtöne für die niedrige Temperaturstufe. Die exakten Zahlenwerte aller Berechnungen für den mittleren Haftreibwert aus den jeweils fünf Einzelmessungen und die Standardabweichung σ beim jeweiligen Kontaktdruck p_k sind im Anhang (siehe Abschnitt 7.4, Seite 95 ff) angeführt.

4.1. INSPIRE 702 Performance Polymer (PP)

4.1.1. Entformungskraftkurven

In Abbildung 14 sind ausgewählte Entformungskraftkurven für die strichpolierte und die hochglanzpolierte Oberfläche bei einer Vertikalkraft von 11,78 kN sowie bei niedriger (15°C) und hoher (40°C) Temperaturstufe über dem Öffnungsweg von 30 mm dargestellt.

Die Kurven weisen alle ähnlich charakteristische Verläufe auf: Da das Wegsignal der Schließeinheit für die Spritzgießmessungen herangezogen wird und die Position „Werkzeug geschlossen“ bei etwa 0,8 mm liegt, beginnen die Messkurven ebendort. Der flache Anstieg zu Beginn hängt mit der elastischen Rückdeformation der Werkzeugisolerplatten zusammen, d.h. eine Relativbewegung zwischen den beiden Probekörpern findet noch nicht statt. Mit fortschreitendem Weg steigt die gemessene Horizontalkraft stark an, bis sie bei etwa 2 mm Öffnungsweg das Maximum erreicht. Dieses entspricht der Haftreibkraft. Während des steilen Anstiegs trat bei den Untersuchungen ein systematischer Messfehler auf, der sich als „Zwischenpeak“ darstellt. Als Ursache wurde später eine versetzte Lage von Werkzeuginnen- und Maschinendüse festgestellt. Dies führte zu einem Hinterschnitt am vorderen Ende

des Angusszapfens, der beim Entformen als zusätzlicher Widerstand überwunden werden musste. Da sich der „Zwischenpeak“ und der Haftreibpeak aber sauber trennen lassen und die Haftreibwerte somit nicht verfälscht werden, wurden die Messungen nicht wiederholt.

Nach Überwindung der Haftreibung setzt ein stabiler Gleitvorgang zwischen Formteil und Werkzeugoberfläche ein. Dabei bleibt die Horizontalkraft (= Reibkraft) annähernd konstant und steigt erst im letzten Drittel des gemessenen Reibweges wieder an. Der Grund dieses Anstiegs im Schlussdrittel des Messweges bei einigen Kurven konnte nicht geklärt werden.

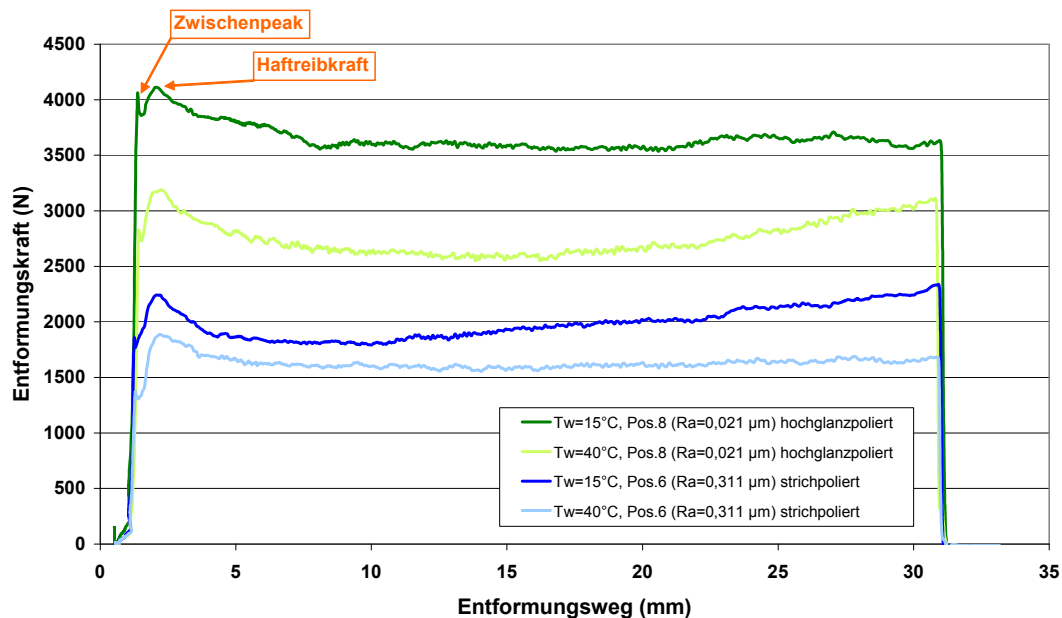


Abbildung 14: Entformungskraftverläufe für PP INSPIRE™ 702 bei einer Vorlauftemperatur von 15°C und 40°C und einer Vertikalkraft von 11,78 kN ($p_k = 3,37 \text{ N/mm}^2$).

4.1.1.1. Einfluss der Oberflächenrauigkeit

Beim Vergleich der Entformungskräfte bei strichpolierter und hochglanzpolierter Oberfläche stellt sich der erwartete Niveauunterschied über dem gesamten Reibungsweg ein. Die höheren Entformungskräfte sind stets beim Einsatz der hochglanzpolierten Oberfläche zu verzeichnen (Abbildung 14).

4.1.1.2. Einfluss der Werkzeugtemperatur

Bei Betrachtung der Werkzeugtemperatur bzw. der Vorlauftemperatur als variable Größe stellt sich für beide verwendeten Oberflächenstrukturen dieselbe Tendenz ein: Eine niedrige Vorlauftemperatur bewirkt höhere Entformungskraftwerte. Wobei im Falle der strichpolierten Oberfläche die Differenz der Entformungskräfte zwischen niedriger (15°C) und hoher (40°C) Vorlauftemperatur deutlich geringer ausfällt als bei hochglanzpolierter Oberfläche (Abbildung 14).

4.1.1.3. Einfluss einer stufenweise erhöhten Vertikalkraft

In Abbildung 15 und Abbildung 16 sind die Entformungskraftverläufe von strichpolierter und hochglanzpolierter Oberfläche bei einer Vorlauftemperatur von 40°C über dem Öffnungsweg für steigende Vertikalkraftstufen dargestellt. Während beim strichpolierten Stahl-Probekörper (Abbildung 15) die Niveaus der Entformungskraftverläufe mit steigendem Kontaktdruck regelmäßig abgestuft ansteigen, wird bei den Versuchen mit hochglanzpolierter Oberfläche (Abbildung 16) die Abstufung bzw. die Differenz der Niveaus, besonders ab einem Kontaktdruck von 2,52 N/mm², zunehmend geringer. Damit wird der Einfluss der wirkenden Vertikalkraft auf die Entformungskraft zu höheren Kontaktdrücken hin geringer.

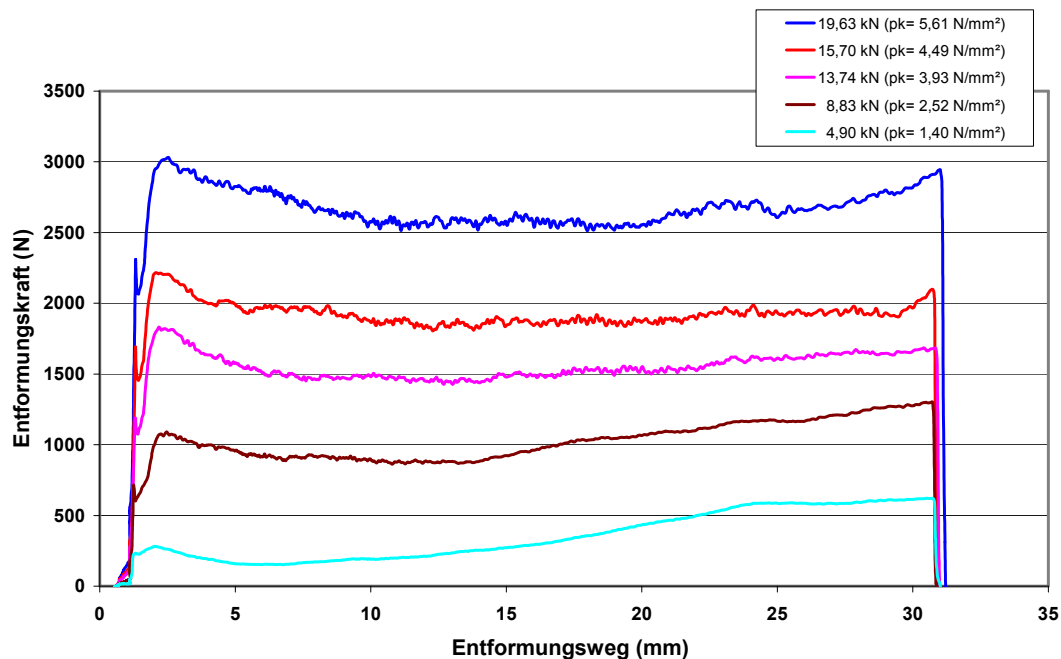


Abbildung 15: Entformungskraftverläufe von PP INSPIRE™ 702 bei einer Vorlauftemperatur von 40°C, strichpolierter Oberfläche (Pos.6, $R_a = 0,311 \mu\text{m}$) und 5 verschiedenen Vertikalkräften.

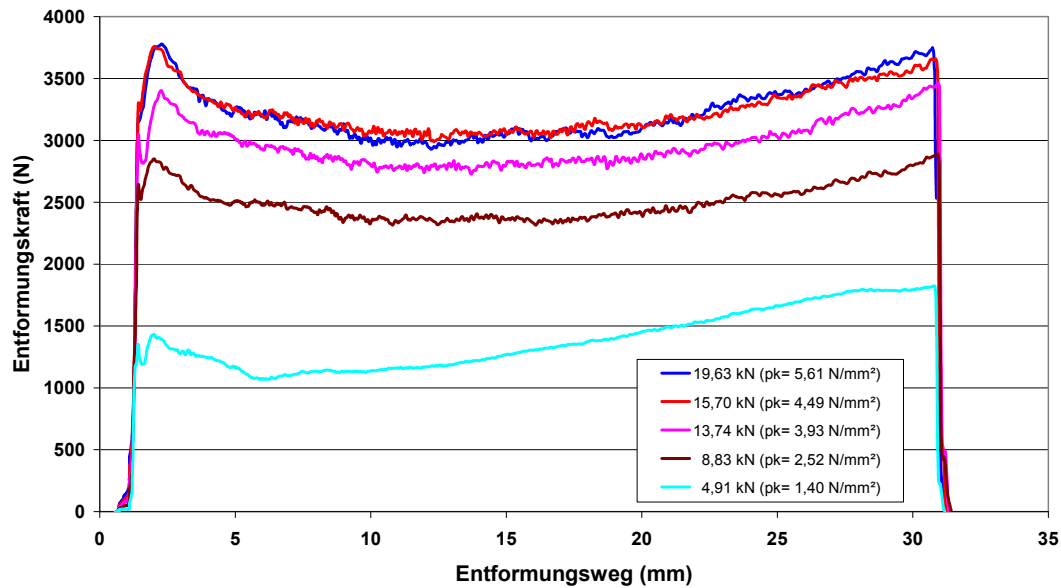


Abbildung 16: Entformungskraftverläufe von PP INSPIRE™ 702 bei einer Vorlauftemperatur von 40°C, hochglanzpolierter Oberfläche (Pos.8, $R_a = 0,021 \mu\text{m}$) und 5 verschiedenen Vertikalkräften.

4.1.2. Haftreibwert μ_0

Abbildung 19 zeigt die ermittelten Haftreibwerte für PP INSPIRE™ 702 in Abhängigkeit vom auf den Kunststoff-Probekörper wirkenden Kontaktdruck für die unbeschichteten Stahl-Probekörper mit strichpolierter und hochglanzpolierter Oberflächenstruktur bei einer Vorlauftemperatur von 15°C und 40°C. Die geringsten Haftreibwerte werden bei hoher Temperaturstufe von 40°C unter Einsatz der strichpolierten Stahl-Probekörperoberfläche erreicht. Die errechneten Haftreibwerte zeigen abgesehen von unterschiedlichen Niveaus eine ähnliche Charakteristik: Nach leichtem Ansteigen bis etwa 3,5 N/mm² bleiben die Werte konstant oder fallen leicht ab. Der Anstieg zu Beginn kann darauf zurückzuführen sein, dass die effektive Reibfläche zwischen Kunststoffformteil und Werkzeugoberfläche durch eine Steigerung des Kontaktdruckes noch erhöht (verbesserte Auflage) werden kann. Das lässt sich bei günstigem Lichteinfall und besonders bei dunkelfärbigen Formmassen am optischen Erscheinungsbild der Formteilunterseite durch Glanzunterschiede relativ gut ausmachen (siehe Abbildung 17: links: nur teilweise abgescherte Formteiloberfläche, rechts: vollständig abgescherte Oberfläche).

Eine Ausnahme im Verlauf des Haftreibungswertes stellt die Messung bei hochglanzpolierter Oberfläche und 40°C Vorlauftemperatur dar, bei der ein stetiges Abfallen der Haftreibungswerte ab einem Kontaktdruck von $p_k = 2,55 \text{ N/mm}^2$ auf den gemessenen Endwert von $\mu_0 = 0,19$ bei einem Kontaktdruck von $p_k = 5,62 \text{ N/mm}^2$ zu beobachten ist. Diese fallende Tendenz ist ein Resultat des bei höheren Kontaktdruckstufen immer geringer werdenden Einflusses der Vertikalkraft auf die Entformungskraft (vgl. 4.1.1.3 und Abbildung 16). Der Gedanke, dass eine stärkere Reiberwärmung zwischen Formteil und Stahl-Probekörper zu sinkenden Haftreibungswerten führen könnte, erscheint in Anbetracht des kurzen Weges (1-2 mm) bis zum Erreichen der Haftkraft eher als unwahrscheinlich. Es kommt zwar nach Abbildung 18 nach der Kühlphase zu einem kurzen steilen Temperaturanstieg von etwa 0,5 °C, der einer Reiberwärmung während des 30 mm langen Reibweges entspringen könnte, aber, wenn überhaupt, erst am Ende der Reibphase eingehen würde. Wobei noch zu berücksichtigen wäre, dass die Ansprechzeit der verwendeten Thermoelemente von etwa 1 Sekunde und deren Einbautiefe den tatsächlichen Temperaturverlauf an der Werkzeugoberfläche verzögern.

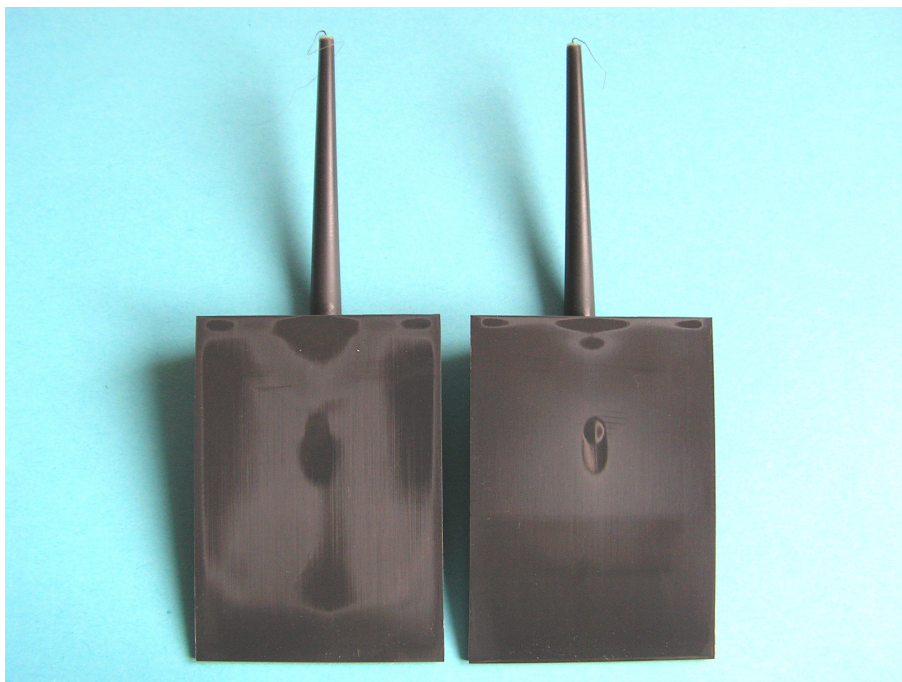


Abbildung 17: Unterschiedlich stark abgescherte Kunststoff-Probekörper aus Hostacom PPU X9067HS nach dem Reibversuch mit einem hochglanzpolierten Stahl-Probekörper aus Böhler M333 Isoplast, beschichtet mit Balinit A bei einer Vertikalkraft von 3.927 N (links) bzw. 23.662 N (rechts) [13].

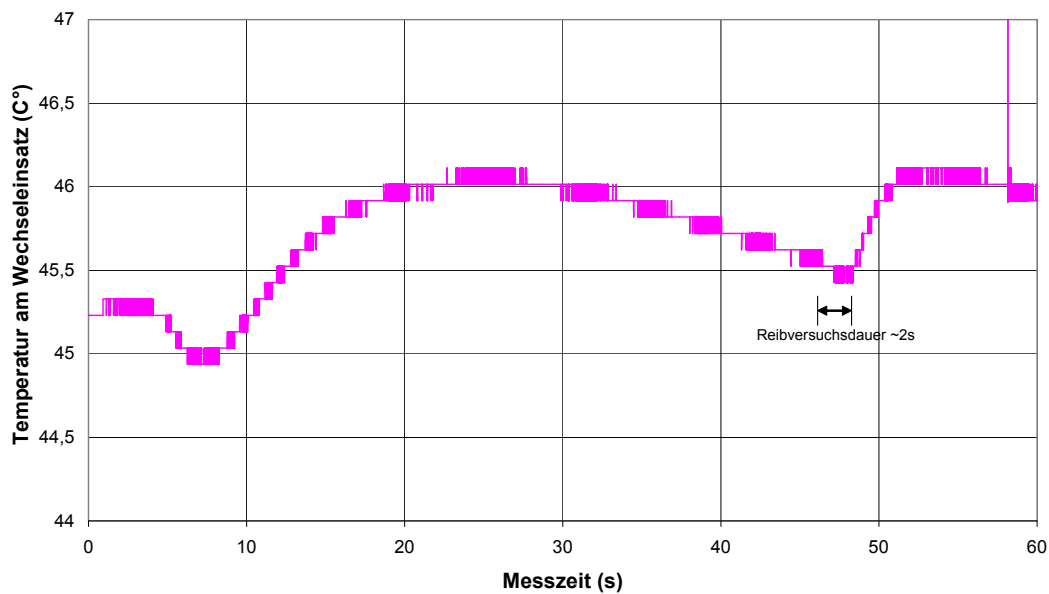


Abbildung 18: Temperaturverlauf am Wechseleinsatz Pos.8 während eines gesamten Messzyklus.

4.1.2.1. Einfluss der Oberflächenstruktur

Beim Einsatz der verschiedenen Oberflächenstrukturen des Stahl-Probekörpers (strichpoliert und hochglanzpoliert) kommt klar zum Ausdruck, dass mit der strichpolierten Oberfläche die niedrigeren Haftreibwerte erzielt werden (Abbildung 19).

4.1.2.2. Einfluss der Vorlauftemperatur

Die Einstellung bei niedriger Vorlauftemperatur von 15°C bewirkt im Falle der strichpolierten Oberfläche einen auf höherem Niveau verlaufenden Haftreibwert als bei höherer Vorlauftemperatur von 40°C. Die Differenz der beinahe parallelen Verläufe beträgt im Mittel etwa 0,06. Die Kurvenverläufe der Haftreibwerte für die hochglanzpolierte Oberfläche folgen dieser Gesetzmäßigkeit nicht mehr. Aufgrund der einerseits ansteigenden Haftreibwerte bei niedriger Temperaturstufe von 15°C und andererseits der abfallenden Haftreibwerte bei hoher Temperaturstufe von 40°C kreuzen sich die Kurvenverläufe bei einem Kontaktdruck von etwa 2,8 N/mm².

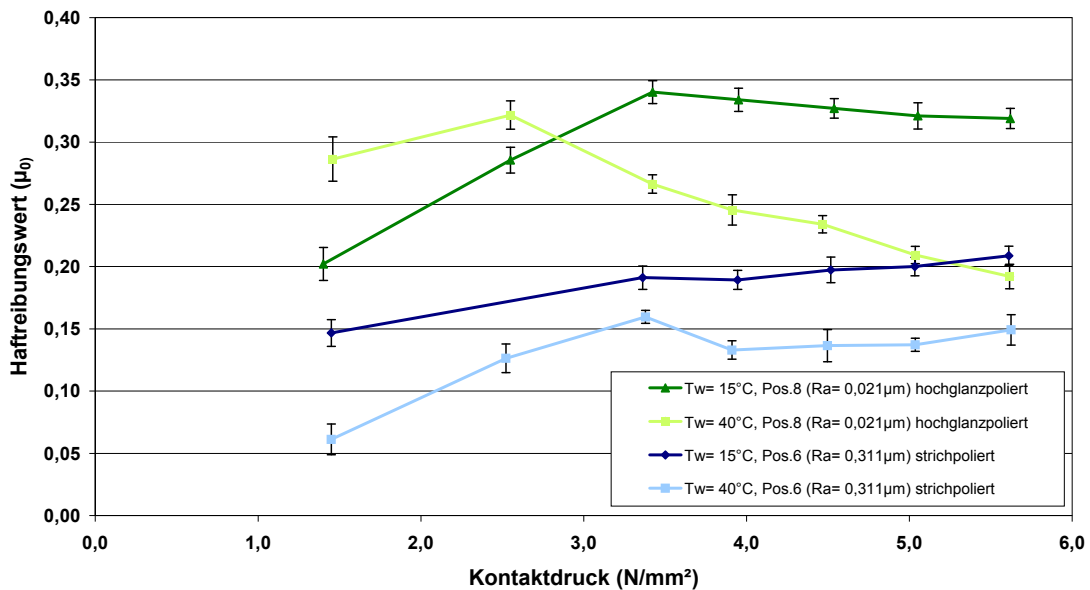


Abbildung 19: Haftreibungswerte von PP INSPIRE™ 702 über steigendem Kontaktdruck bei 15°C und 40°C Vorlauftemperatur für den strichpolierten (Pos.6) und den hochglanzpolierten (Pos.8) Formeinsatz.

Im Anhang (siehe Abschnitt 7.4, Tabelle 8) sind die ermittelten Ergebnisse des gesamten Versuchplanes aus den Entformungskraftmessungen für PP INSPIRE 702 zusammengefasst. Dabei werden der mittlere Haftreibungswert μ_0 aus den jeweils fünf Einzelmessungen und die Standardabweichung σ beim jeweiligen Kontaktdruck p_k aufgelistet.

4.2. DOW C705-44NA Polypropylene

4.2.1. Entformungskraftkurven

In Abbildung 20 sind die einzelnen Entformungskraftkurven für die unbeschichteten Stahl-Probekörper mit strichpolierter und hochglanzpolierter Oberflächenstruktur, als auch für die mit VST-DLC (Pos.29) und DLC-Flex (Pos.32) beschichteten Stahl-Probekörper, bei einer Vertikalkraft von 11,78 kN sowie bei niedriger (15°C) und hoher (40°C) Temperaturstufe über dem effektiven Öffnungsweg von 30 mm dargestellt. Während der ersten 1,6 Millimeter des Öffnungsweges sind sich die Entformungskraftkurven aller Probekörper-Oberflächenstrukturen sehr ähnlich: Auf

einen flachen Anstieg, folgt dann ein extrem steiler Kraftanstieg mit dem „Zwischenpeak“ bei etwa 1,6 Millimeter (vgl. Kap.4.1.1), und danach tritt das tatsächliche Haftkraftmaximum auf. Danach verlaufen die Kurven annähernd konstant oder leicht ansteigend bis zum Ende des Messweges. Ein Übersteigen des Haftkraftmaximums ist im weiteren Kurvenverlauf mit den VST-DLC und DLC-Flex beschichteten Stahl-Probekörpern und auch mit der unbeschichteten hochglanzpolierten Oberfläche bei einer Vorlauftemperatur von 40°C zu beobachten. Bei den beiden beschichteten Probekörpern ist kein ausgeprägtes Haftkraftmaximum erkennbar.

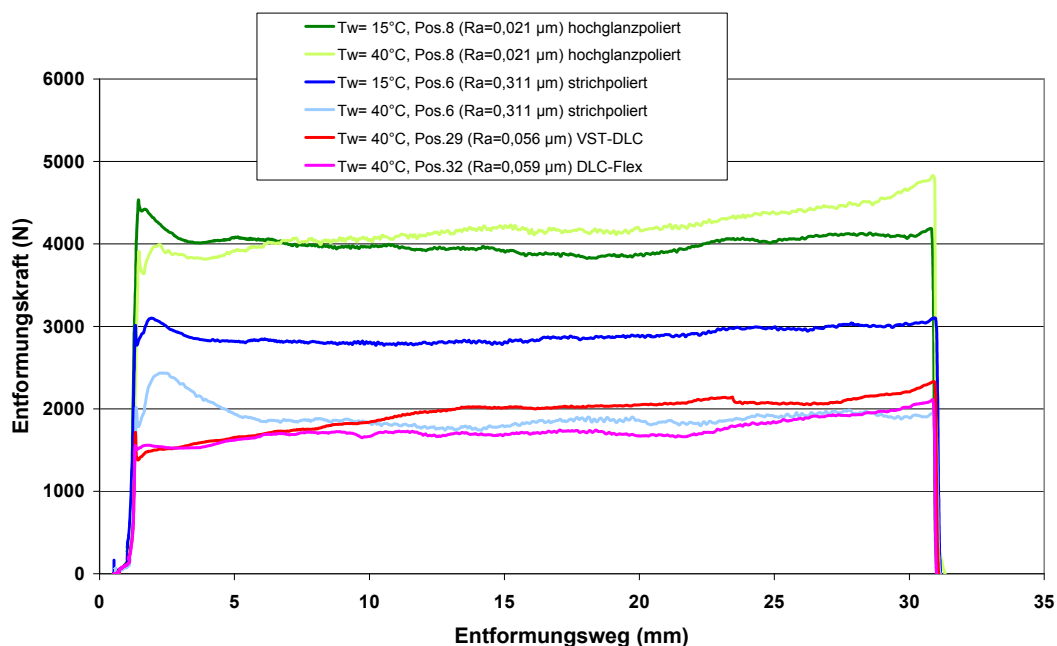


Abbildung 20: Entformungskraftverläufe für PP C705-44NA bei einer Vorlauf-temperatur von 15°C und 40°C mit den Formeinsätzen Pos.6, Pos.8, Pos.29 und Pos.32 und einer Vertikalkraft von 11,78 kN ($p_k = 3,37 \text{ N/mm}^2$).

4.2.1.1. Einfluss der Oberflächenrauigkeit

Beim Vergleich der Entformungskräfte bei strichpolierter und hochglanzpolierter Oberfläche (Abbildung 20) stellt sich der erwartete Niveauunterschied über den gesamten Reibungsweg ein. Die höheren Entformungskräfte sind stets beim Einsatz der hochglanzpolierten Oberfläche zu verzeichnen. Die Entformungskräfte mit VST-DLC und DLC-Flex beschichteten Oberflächen bewegen sich bis zu einem Öffnungsweg von etwa 8 Millimeter auf einem gemeinsamen Kraftniveau von 1600 bis 1700 N, danach verläuft die Entformungskraftkurve des Stahl-Probekörpers mit

VST-DLC Beschichtung um etwa 400 N höher. Die beschichteten Probekörper mit R_a etwa $0,06 \mu\text{m}$ zeigen die geringsten Entformungskräfte. Dies entspricht dem Verlauf der Abhängigkeit der Entformungskräfte von der Oberflächenrauigkeit laut *Sasaki* ([14], vgl. Abbildung 1) sowie den Erkenntnissen von *Burgsteiner* [17].

4.2.1.2. *Einfluss der Vorlauftemperatur*

Bei Betrachtung der Werkzeugtemperatur bzw. der Vorlauftemperatur als variable Größe ergibt sich mit der strichpolierten Stahl-Probekörperoberfläche über den gesamt gemessenen Öffnungsweg ein Niveauunterschied der Entformungskraftverläufe von etwa 1000 N. Bei niedriger Temperaturstufe von 15°C fallen die Entformungskräfte höher aus. Dieser Sachverhalt ist beim Einsatz der hochglanzpolierten Oberfläche nur bis zu einem Öffnungsweg von 6,5 Millimeter gegeben, da sich dort die Kraftverläufe von niedriger und hoher Temperaturstufe kreuzen, und danach ein genau umgekehrtes Verhältnis gilt.

4.2.1.3. *Einfluss einer stufenweise erhöhten Vertikalkraft*

In Abbildung 21 und Abbildung 22 sind die Entformungskraftverläufe bei strichpolierter und hochglanzpolierter Oberfläche bei einer Vorlauftemperatur von 40°C über dem Entformungsweg für verschiedene Vertikalkraftstufen dargestellt. Abgesehen vom bereits erwähnten unterschiedlichen Niveau der Entformungskraft zwischen Messungen mit strichpolierter und hochglanzpolierter Oberfläche treten bei strichpolierter Oberfläche deutlich ausgeprägtere Haftkraftmaxima auf. Außerdem liegt bei den Versuchen mit hochglanzpolierter Oberfläche das Kraftmaximum am Ende des Entformungskraftweges mit etwa 300 bis 500 N über der Haftkraft. Bei strichpolierter Oberfläche tritt dies nur bei einer Vertikalkraft von 4,91 kN ($p_k = 1,4 \text{ N/mm}^2$) auf. Während bei strichpolierter Oberfläche (Pos.6) die Entformungskraftverläufe für die gewählten Vertikalkräfte in beinahe regelmäßigen Niveauunterschieden gestaffelt verlaufen, rücken die Niveaus bei hochglanzpolierter Oberfläche (Pos.8) ab einer Vertikalkraft von 13,74 kN ($p_k = 3,93 \text{ N/mm}^2$) deutlich näher zusammen. Ab dieser Vertikalkraft scheint der Einfluss der Vertikalkraft bei weiterer Erhöhung sehr gering zu werden.

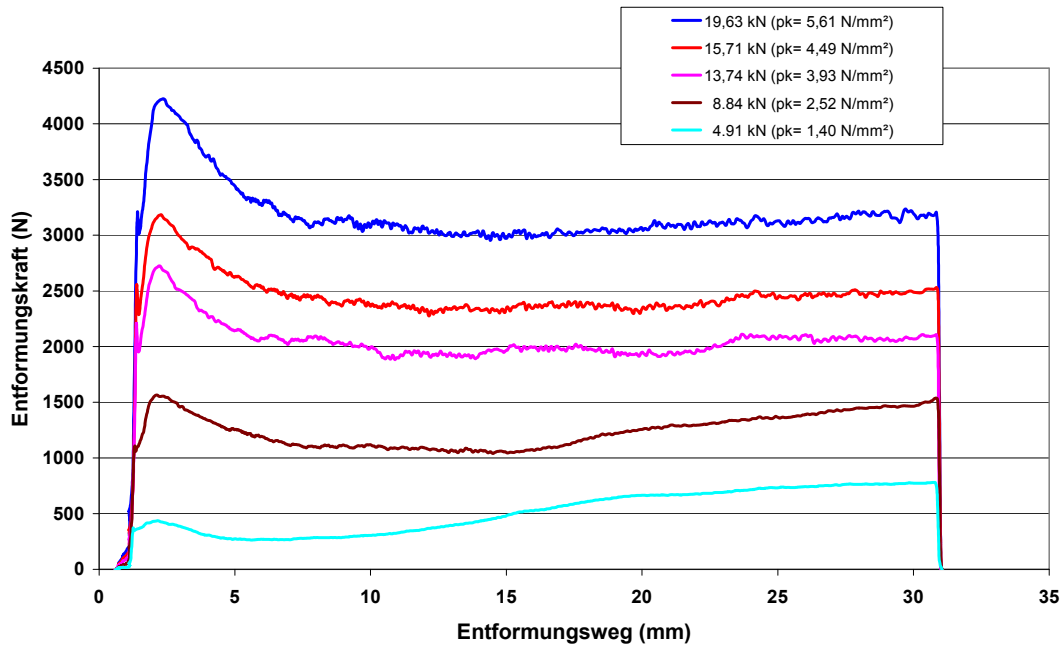


Abbildung 21: Entformungskraftverläufe von PP C705-44NA bei einer Vorlauf-temperatur von 40°C mit dem Formeinsatz Pos.6 ($R_a = 0,311 \mu\text{m}$) bei 5 verschiedenen Kontaktdrücken.

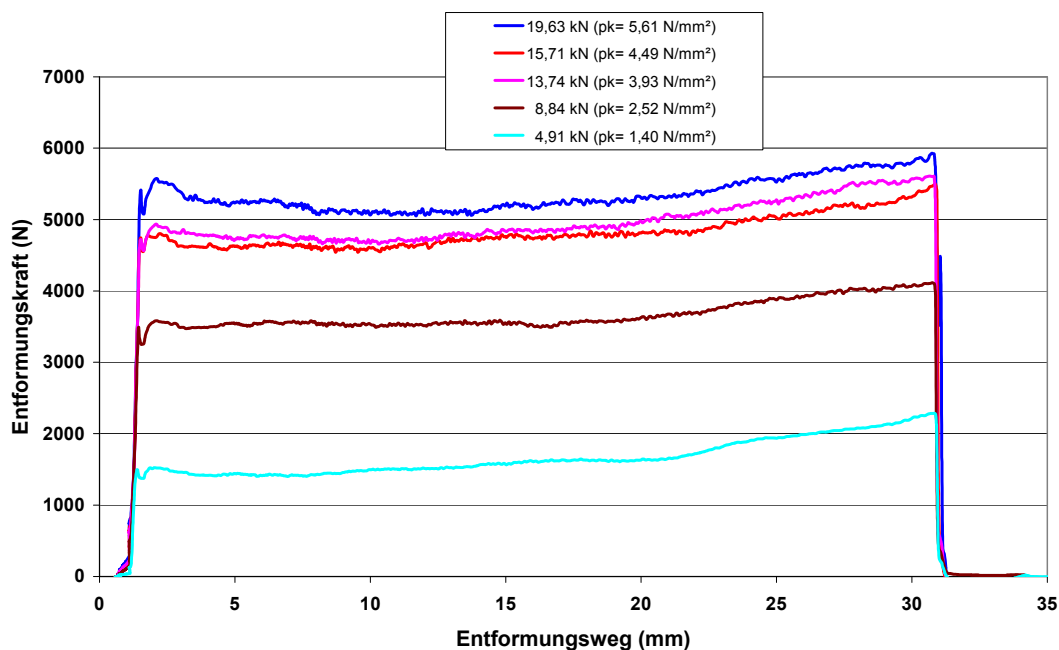


Abbildung 22: Entformungskraftverlauf von PP C705-44NA bei einer Vorlauf-temperatur von 40°C mit dem Formeinsatz Pos.8 ($R_a = 0,021 \mu\text{m}$) bei 5 verschiedenen Kontaktdrücken.

In Abbildung 23 und Abbildung 24 werden die Entformungskraftverläufe bei einer Vorlauf-temperatur von 40°C mit den beschichteten Stahl-Probekörpern VST-DLC

(Pos.29) und DLC-Flex (Pos.32) für ansteigende Kontaktdrücke dargestellt. Auch bei diesen Versuchsanordnungen werden die höchsten Entformungskräfte am Ende der Wegmessung verzeichnet. Daher sind die theoretischen Haftkraftmaxima nur lokal bei etwa 1,7 Millimeter auszumachen, unmittelbar nach den charakteristischen scharfen „Zwischenpeaks“, die beim DLC-Flex beschichteten Stahl-Probekörper nur schwach ausgebildet sind. Die einzelnen Entformungskraftverläufe steigen im Falle der VST-DLC (Pos.29) Beschichtung für alle Kontaktdrücke stärker über den Öffnungsweg an, als die Verläufe mit DLC-Flex (Pos.32) Beschichtung und erreichen am Ende der Messung einen höheren Maximalwert.

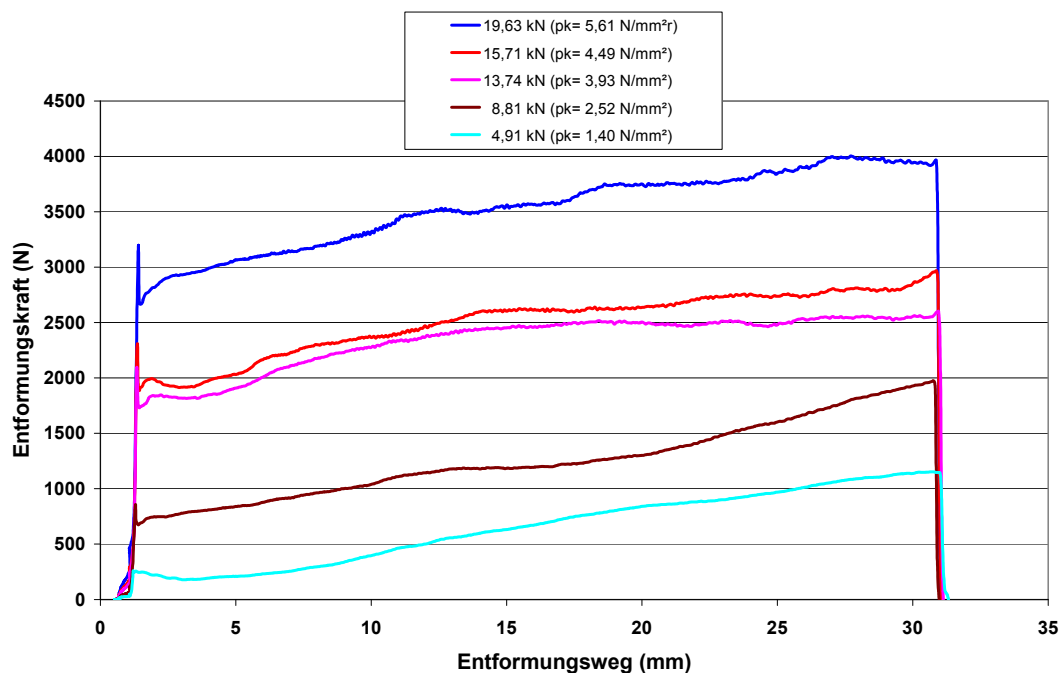


Abbildung 23: Entformungskraftverläufe von PP C705-44NA bei einer Vorlauf-temperatur von 40°C mit dem Formeinsatz Pos.29 (VST-DLC-Beschichtung, $R_a = 0,056 \mu\text{m}$) bei 5 verschiedenen Kontaktdrücken.

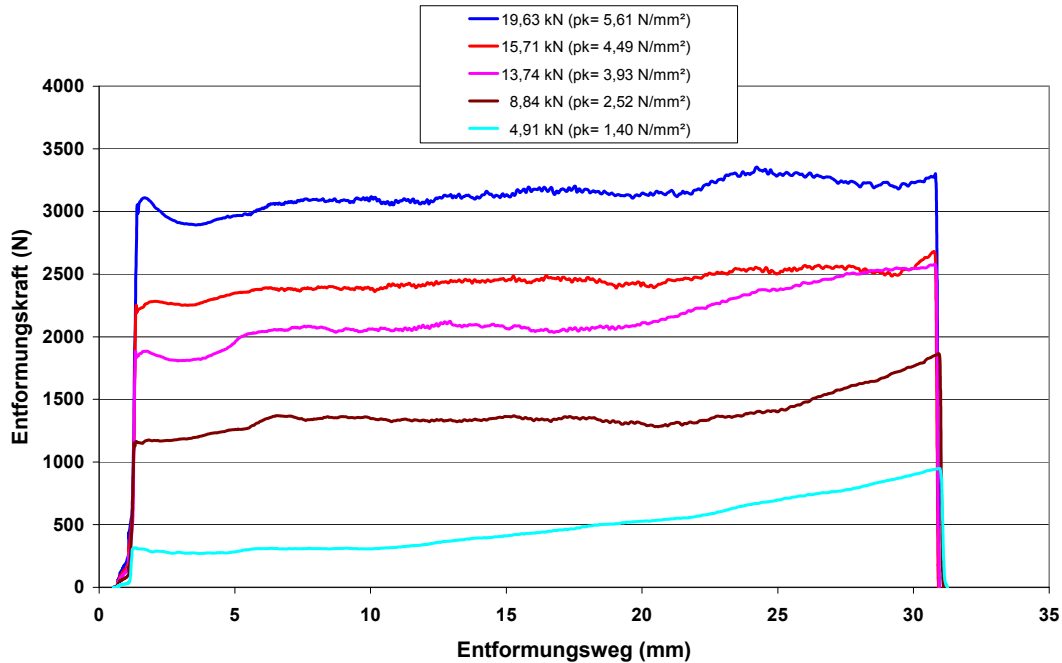


Abbildung 24: Entformungskraftverläufe von PP C705-44NA bei einer Vorlauf-temperatur von 40°C mit dem Formeinsatz Pos.32 (DLC-Flex-Beschichtung, $R_a = 0,059 \mu\text{m}$) bei 5 verschiedenen Kontaktdrücken.

4.2.2. Haftreibwert μ_0

Abbildung 25 zeigt die ermittelten Haftreibwerte für PP C705-44NA Polypropylen in Abhängigkeit vom auf den Kunststoff-Probekörper wirkenden Kontaktdruck für die unbeschichteten Stahl-Probekörper mit strichpolierter und hochglanzpolierter Oberflächenstruktur bei einer Vorlauftemperatur von 15°C und 40°C, als auch für die VST-DLC und DLC-Flex beschichteten Stahl-Probekörper bei einer Vorlauftemperatur von 40°C. Die geringsten Haftreibwerte werden ab einem Kontaktdruck von $p_k = 3,37 \text{ N/mm}^2$ unter Einsatz der beschichteten DLC-Flex Stahl-Probekörperoberfläche erzielt. Die errechneten Haftreibwerte zeigen eine ähnliche Charakteristik, abgesehen von unterschiedlichen Niveaus, einem Ausreißer beim niedrigsten Kontaktdruck ($p_k = 1,40 \text{ N/mm}^2$) bei strichpolierter Oberfläche (Pos.6) und einer Vorlauftemperatur von 15°C sowie einer Ausnahme bei hochglanzpolierter Oberfläche und einer Vorlauftemperatur von 40°C. Auf ein moderates Ansteigen bis zu einem Kontaktdruck von $p_k = 3,37 \text{ N/mm}^2$ folgt ein geringer Anstieg oder beinahe Konstanz der Werte. Bei der erwähnten Ausnahme mit hochglanzpolierter Oberfläche fallen die Haftreibwerte ab einem Kontaktdruck von $2,53 \text{ N/mm}^2$ auf den

errechneten Endwert von $\mu_0 = 0,28$ bei einem Kontaktdruck von $p_k = 5,61 \text{ N/mm}^2$ (vgl. 4.1.2 Seite 35).

4.2.2.1. Einfluss der Oberflächenstruktur

Beim Einsatz der verschiedenen Oberflächenstrukturen des Stahl-Probekörpers (strichpoliert, hochglanzpoliert, poliert mit VST-DLC und DLC-FLex Beschichtung) kommt klar zum Ausdruck, dass mit den beschichteten polierten Oberflächenstrukturen wie erwartet niedrigere Haftreibungswerte als mit strichpolierter Oberflächenstruktur erzielt werden.

4.2.2.2. Einfluss der Vorlauftemperatur

Die Einstellung bei niedriger Vorlauftemperatur von 15°C bewirkt im Falle der strichpolierten Oberfläche einen höheren Verlauf der Haftreibungswerte als bei hoher Vorlauftemperatur von 40°C . Die Differenz der, ab der zweiten Kontaktdruckstufe, beinahe parallel verlaufenden Kurven beträgt etwa 0,06. Die Kurvenverläufe der Haftreibungswerte bei hochglanzpolierter Oberfläche folgen dieser Gesetzmäßigkeit nicht mehr. Aufgrund der einerseits ansteigenden Haftreibungswerte bei niedriger Temperaturstufe von 15°C und andererseits der abfallenden Haftreibungswerte bei hoher Temperaturstufe von 40°C kreuzen sich die Kurvenverläufe bei einem Kontaktdruck von etwa $p_k = 3,2 \text{ N/mm}^2$.

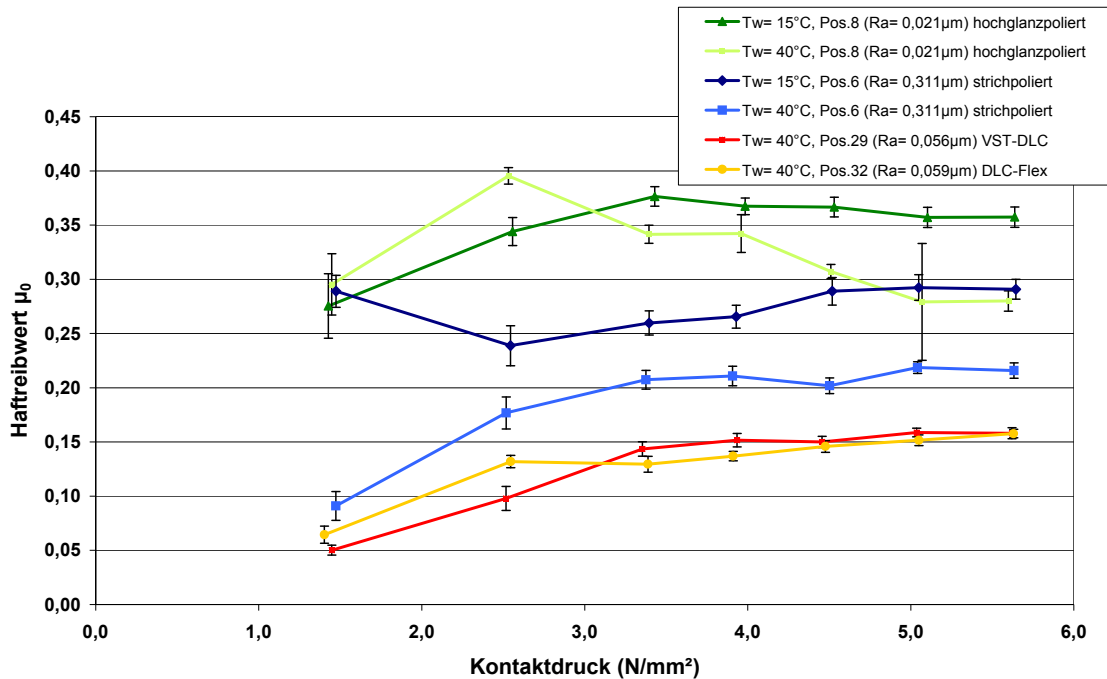


Abbildung 25: Haftreibungswerte von PP C705-44NA: Vorlauftemperatur 15°C und 40°C bei strichpolierten (Pos.6), hochglanzpolierten (Pos.8) und VST-DLC (Pos.29) und DLC-Flex (Pos.32) beschichteten Formeinsätzen.

Im Anhang (siehe Abschnitt 7.4, Tabelle 9) sind sämtliche ermittelten Ergebnisse des gesamten Versuchplanes aus den Entformungskraftmessungen für PP C705-44NA zusammengefasst. Dabei werden der mittlere Haftreibungswert μ_0 aus den jeweils fünf Einzelmessungen und die Standardabweichung σ beim jeweiligen Kontaktdruck p_k aufgelistet.

4.3. DR7023 Developmental Polypropylene Resin (PP)

4.3.1. Entformungskraftmessung

In Abbildung 26 sind die einzelnen Entformungskraftkurven bei strichpolierter und hochglanzpolierter Oberfläche, einer Vertikalkraft von 11,78 kN ($p_k = 3,37 \text{ N/mm}^2$), sowie bei niedriger (15°C) und hoher (40°C) Temperaturstufe über dem effektiven Öffnungsweg von 30 mm dargestellt. Bei drei Entformungskraftverläufen fehlt der markante „Zwischenpeak“ kurz vor dem Haftkraftmaximum, der bei zuvor untersuchten Materialien immer zu beobachten war (vgl. Abbildung 20, Abschnitt 4.2.1, Seite 38), da inzwischen der Versatz der Maschinendüse korrigiert

wurde. Während die Kurven bei strichpolierter Oberfläche auch das erwartete Haftkraftmaximum bei etwa 2 mm Öffnungsweg aufweisen, fehlt dieses in den Kurvenverläufen bei hochglanzpolierter Oberfläche, die die maximale Entformungskraft jeweils am Ende des Messweges aufweisen.

Die bei niedriger Temperaturstufe (15°C) und hochglanzpolierter Oberfläche durchgeführten Versuche weisen ein abweichendes Entformungsverhalten auf: Nach Erreichen eines Kraftpeaks unmittelbar nach dem Öffnen der Formhälften fällt die Entformungskraft kurz um etwa 500 N ab, steigt bei 5 mm Öffnungsweg kurz wieder steil an und verläuft dann bis zur Maximalkraft am Messwegende flacher. Dies ist durch einsetzende „Stick-Slip-Effekte“ zu erklären.

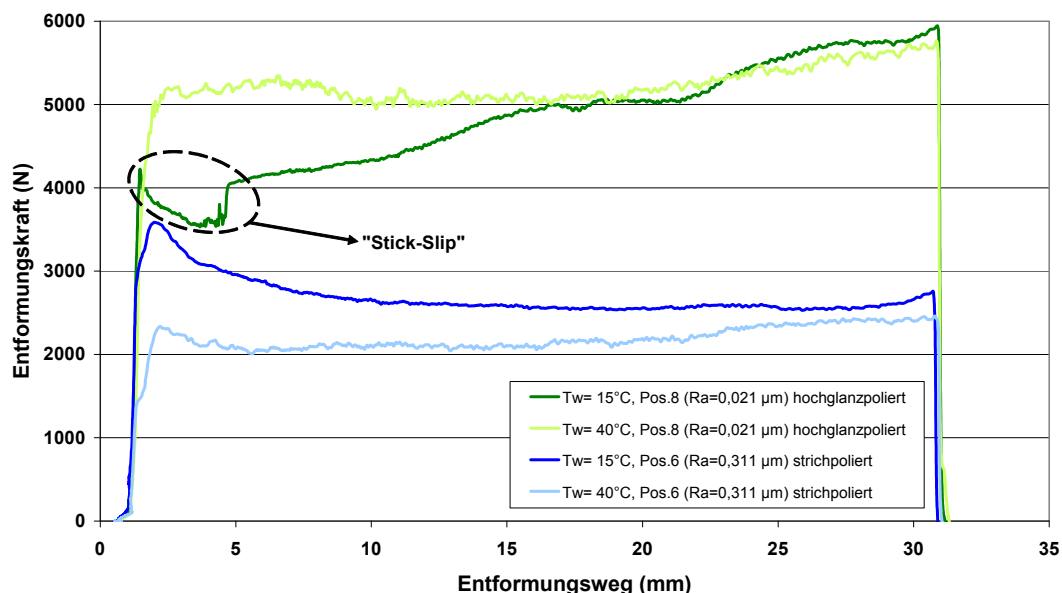


Abbildung 26: Entformungskraftverläufe für PP DR7023 bei einer Vorlauf-temperatur von 15°C und 40°C mit den Formeinsätzen Pos.6 und Pos.8 bei einer Vertikalkraft von 11,78 kN ($p_k = 3,37 \text{ N/mm}^2$).

4.3.1.1. Einfluss der Oberflächenrauigkeit

Beim Vergleich der Entformungskräfte bei strichpolierter und hochglanzpolierter Oberfläche stellt sich ein erwarteter Niveauunterschied über den gesamten Reibungsweg ein. Die höheren Entformungskräfte sind stets beim Einsatz der hochglanzpolierten Oberfläche zu verzeichnen.

4.3.1.2. Einfluss der Vorlaufemperatur

Bei Betrachtung der Werkzeugtemperatur bzw. der Vorlaufemperatur als variable Größe stellt sich bei strichpolierter Oberflächenstruktur und niedriger Vorlaufemperatur wie erwartet die Tendenz zu höheren Entformungskräften ein. Im Falle der hochglanzpolierten Oberfläche ist dieser Zusammenhang nicht mehr gegeben. Hier sind die Entformungskraftwerte bei niedriger Temperaturstufe von 15°C zunächst niedriger als bei 40°C, übersteigen diese dann aber bei etwa 23 mm Öffnungsweg.

4.3.1.3. Einfluss einer stufenweise erhöhten Vertikalkraft

In Abbildung 27 und Abbildung 28 sind die Entformungskraftverläufe bei einer Vorlaufemperatur von 40°C bei strichpolierter und hochglanzpolierter Oberfläche für verschiedene Vertikalkraftstufen dargestellt. Während beim strichpolierten Stahl-Probekörper (Abbildung 27) die Niveaus der Entformungskraftverläufe mit steigender Kontaktdruckstufe regelmäßig abgestuft ansteigen (mit Ausnahme zwischen den Kontaktdruckstufen bei 4,49 N/mm² und 5,61 N/mm²), wird bei den Versuchen mit hochglanzpolierter Oberfläche (Abbildung 28) die Abstufung bzw. die Differenz der Niveaus, besonders ab einem Kontaktdruck von 2,52 N/mm², zunehmend geringer. Dies zeigt, dass im Falle der hochglanzpolierten Stahloberfläche (Pos.8) der Einfluss der beaufschlagten Vertikalkraft bereits ab etwa 9 kN erheblich abnimmt und die Kurvenverläufe der Entformungskräfte enger zusammenrücken.

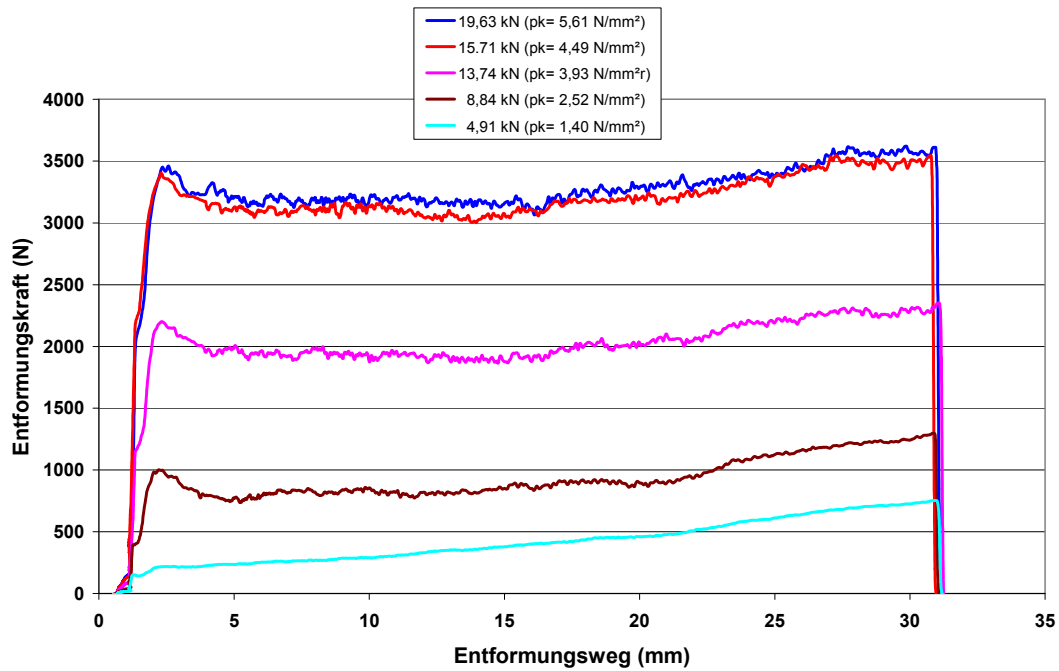


Abbildung 27: Entformungskraftverläufe von PP DR7023 bei einer Vorlauf-temperatur von 40°C, dem Formeinsatz Pos.6 ($R_a = 0,311 \mu\text{m}$) und 5 verschiedenen Vertikalkraftstufen.

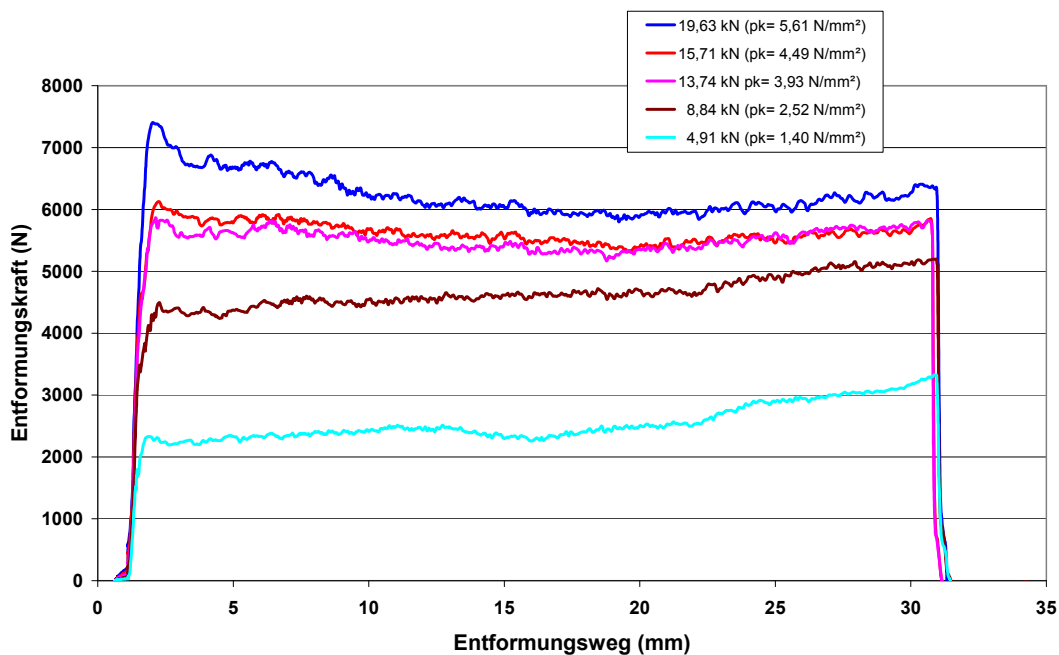


Abbildung 28: Entformungskraftverläufe von PP DR7023 bei einer Vorlauf-temperatur von 40°C, dem Formeinsatz Pos.8 ($R_a = 0,021 \mu\text{m}$) und 5 verschiedenen Vertikalkraftstufen.

4.3.2. Haftreibwert μ_0

Abbildung 29 zeigt die ermittelten Haftreibwerte für PP DR7023 in Abhängigkeit vom auf den Kunststoff-Probekörper wirkenden Kontaktdruck für die unbeschichteten Stahl-Probekörper (Pos.6 und Pos.8) bei strichpolierter und hochglanzpolierter Oberflächenstruktur und einer Vorlauftemperatur von 15°C und 40°C. Die geringsten Haftreibwerte werden bei hoher Temperaturstufe von 40°C unter Einsatz der strichpolierten Stahl-Probekörperoberfläche erreicht. Die Kurven der errechneten Haftreibwerte zeigen, abgesehen von unterschiedlichen Niveaus und einzelnen Ausreißern eine ähnliche Charakteristik: Moderates Ansteigen bis zu einem Kontaktdruck von etwa 3,5 N/mm², danach beinahe Konstanz oder leichtes Abfallen der Haftreibwerte. Eine Ausnahme stellt jedoch der Verlauf bei hochglanzpolierter Oberfläche und einer Vorlauftemperatur von 40°C dar, bei dem ein sukzessiver Abfall der Haftreibwerte ab einem Kontaktdruck von 2,55 N/mm² zu beobachten ist (vgl. 4.1.2 Seite 35).

4.3.2.1. Einfluss der Oberflächenstruktur

Beim Einsatz der verschiedenen Oberflächenstrukturen des Stahl-Probekörpers (strichpoliert und hochglanzpoliert) kommt klar zum Ausdruck, dass bei der strichpolierten Oberfläche die niedrigeren Haftreibwerte erzielt werden.

4.3.2.2. Einfluss der Vorlauftemperatur

Die Einstellung bei niedriger Vorlauftemperatur von 15°C bewirkt im Falle der strichpolierten Oberfläche einen höheren Verlauf der Haftreibwerte als bei hoher Vorlauftemperatur von 40°C. Die Differenz der näherungsweise parallel verlaufenden Kurven beträgt im Mittel etwa 0,125. Die Kurvenverläufe der Haftreibwerte bei hochglanzpolierter Oberfläche verhalten sich in ihrer Tendenz genau umgekehrt. Hier sind bei hoher Temperaturstufe von 40°C höhere Haftreibwerte als bei niedriger Temperaturstufe von 15°C zu verzeichnen.

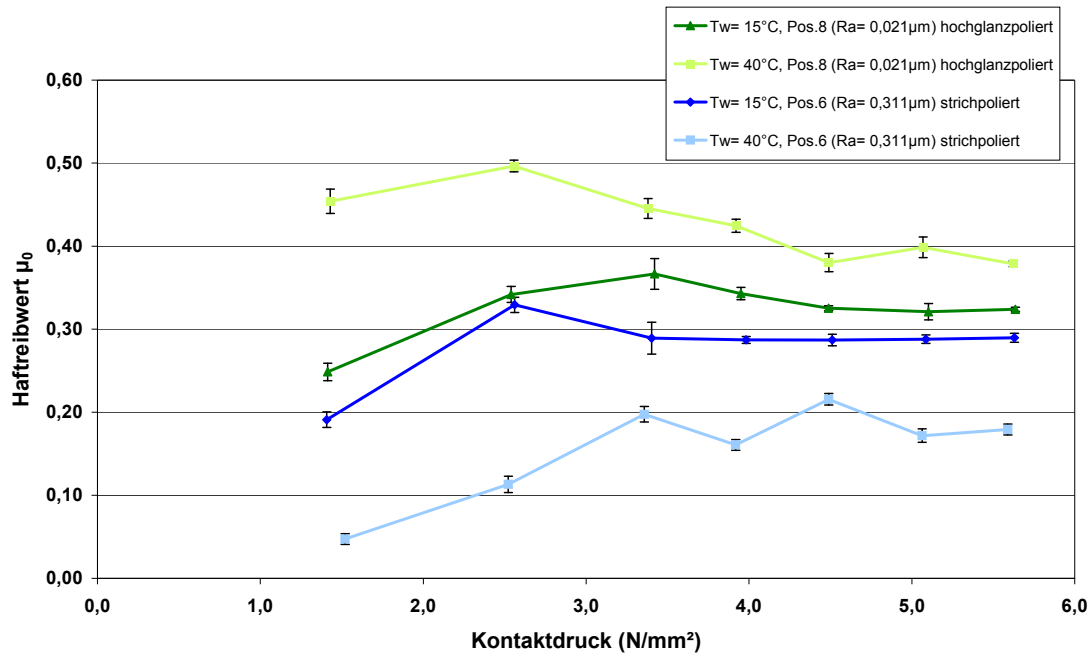


Abbildung 29: Haftreibwerte von PP DR7023 bei 15°C und 40°C Vorlauf-temperatur, strichpolierten (Pos.6) und hochglanzpolierten (Pos.8) Formeinsatz.

Im Anhang (siehe Abschnitt 7.4, Tabelle 10) sind alle ermittelten Ergebnisse aus den Entformungskraftmessungen für PP DR7023 zusammengefasst. Darin werden der mittlere Haftreibwert μ_0 und die Standardabweichung σ , ermittelt aus jeweils fünf Einzelmessungen bei den entsprechenden Kontaktdruckstufen, aufgelistet.

4.4. DOW C791-30NA Polypropylene

4.4.1. Entformungskraftmessung

In Abbildung 30 sind die einzelnen Entformungskraftkurven bei strichpolierter und hochglanzpolierter Oberfläche, einer Vertikalkraft von 11,78 kN ($p_k = 3,37 \text{ N/mm}^2$) sowie bei niedriger (15°C) und hoher (40°C) Temperaturstufe über dem Öffnungsweg von 30 mm dargestellt. Die Kurven weisen alle ähnliche Verläufe auf. Während der ersten 0,5 mm steigt die gemessene Horizontalkraft kaum an. Danach folgt ein steiler Anstieg bis zu einem markanten „Zwischenpeak“, ehe dann mit geringerer Steigung nach etwa 1,5 mm Öffnungsweg das Haftkraftmaximum erreicht wird. Hier wird theoretisch die Haftreibung überwunden und es setzt ein stabiler Gleitvorgang zwischen Formteil und Werkzeugoberfläche ein. Dabei bleibt die Horizontalkraft

(= Reibkraft) annähernd konstant bzw. erfährt im letzten Drittel des gemessenen Reibweges eine leichte Steigerung. Zu einer geringen Abweichung davon kommt es bei hochglanzpolierter Oberfläche. Hier fällt die Steigerung der Horizontalkraft im letzten Drittel des Reibweges stärker aus und übersteigt im Falle der hohen Temperaturstufe von 40°C das Haftkraftmaximum.

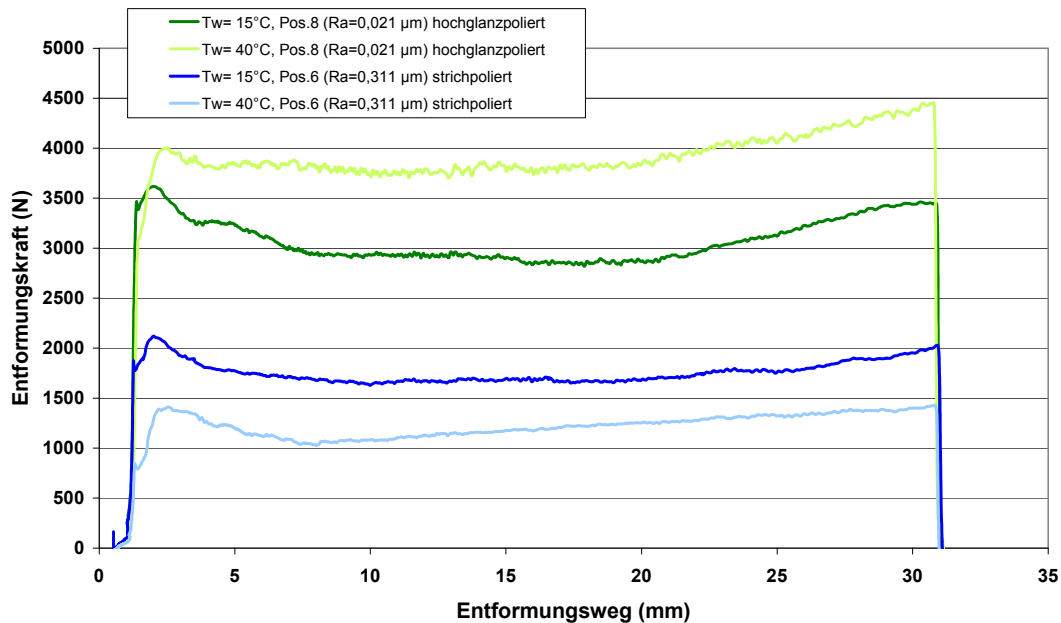


Abbildung 30: Entformungskraftverläufe für PP C791-30NA bei einer Vorlauf-temperatur von 15°C und 40°C mit den Formeinsätzen Pos.6 und Pos.8 bei einer Vertikalkraft von 11,78 kN ($\rho_K = 3,37 \text{ N/mm}^2$).

4.4.1.1. Einfluss der Oberflächenrauigkeit

Beim Vergleich der Entformungskräfte bei strichpolierter und hochglanzpolierter Oberfläche stellt sich der erwartete Niveauunterschied über den gesamten Reibweg ein. Die höheren Entformungskräfte sind stets beim Einsatz der hochglanzpolierten Oberfläche zu verzeichnen.

4.4.1.2. Einfluss der Vorlauf-temperatur

Bei Betrachtung der Werkzeugtemperatur bzw. der Vorlauf-temperatur als variable Größe stellt sich heraus, dass die Auswirkungen auf die Horizontalkraft bei strichpolierter Oberfläche genau gegenläufig zu jenen bei hochglanzpolierter Oberfläche sind. D.h. im Falle der strichpolierten Oberfläche werden wie erwartet bei hoher Temperaturstufe von 40°C niedrigere Entformungskräfte als bei niedriger

Temperaturstufe von 15°C gemessen. Bei hochglanzpolierter Oberfläche verhält es sich mit Entformungskraft und Temperatur genau umgekehrt.

4.4.1.3. Einfluss einer stufenweise erhöhten Vertikalkraft

In Abbildung 31 und Abbildung 32 sind die Entformungskraftverläufe bei einer Vorlauftemperatur von 40°C bei strichpolierter und hochglanzpolierter Oberfläche für verschiedene Vertikalkraftstufen dargestellt. Abgesehen vom bereits erwähnten unterschiedlichen Niveau der Entformungskräfte zwischen Messungen bei strichpolierter und hochglanzpolierter Oberfläche sind eindeutiger ausgeprägte Haftkraftmaxima bei strichpolierter Oberfläche zu erkennen. Außerdem werden bei den Versuchen mit hochglanzpolierter Oberfläche die Niveaus der Haftkraftmaxima gegen Ende der Reibungsmessung überschritten, was bei strichpolierter Oberfläche nur bei den Kontaktdruckstufen von 1,4 N/mm² und 2,52 N/mm² der Fall ist.

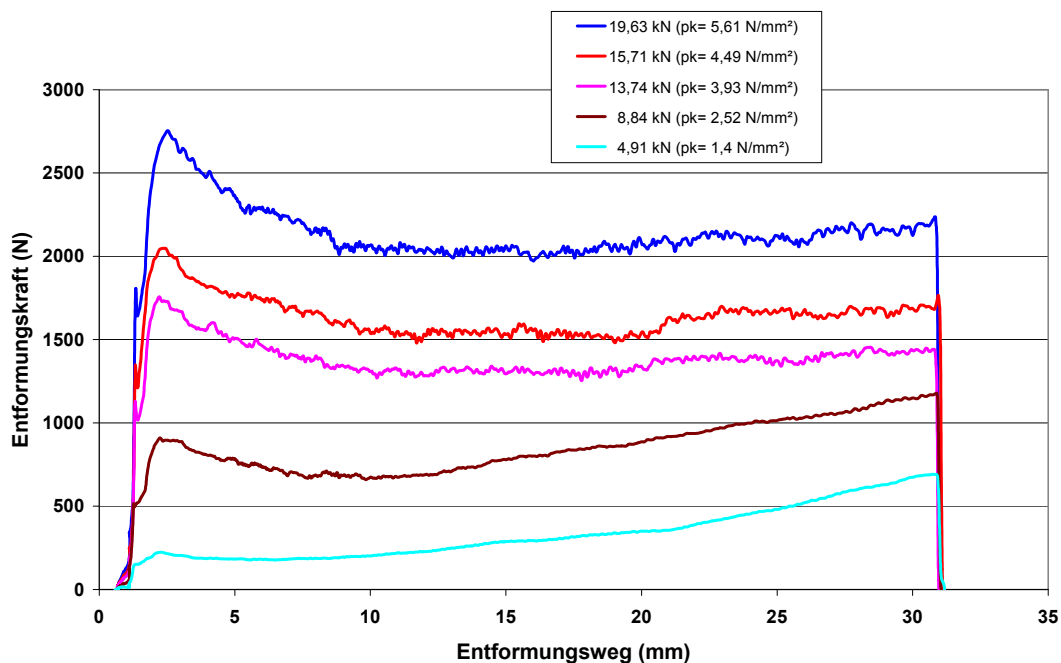


Abbildung 31: Entformungskraftverläufe von PP C791-30NA bei einer Vorlauftemperatur von 40°C, dem Formeinsatz Pos.6 ($R_a = 0,311 \mu\text{m}$) und 5 verschiedenen Vertikalkraftstufen.

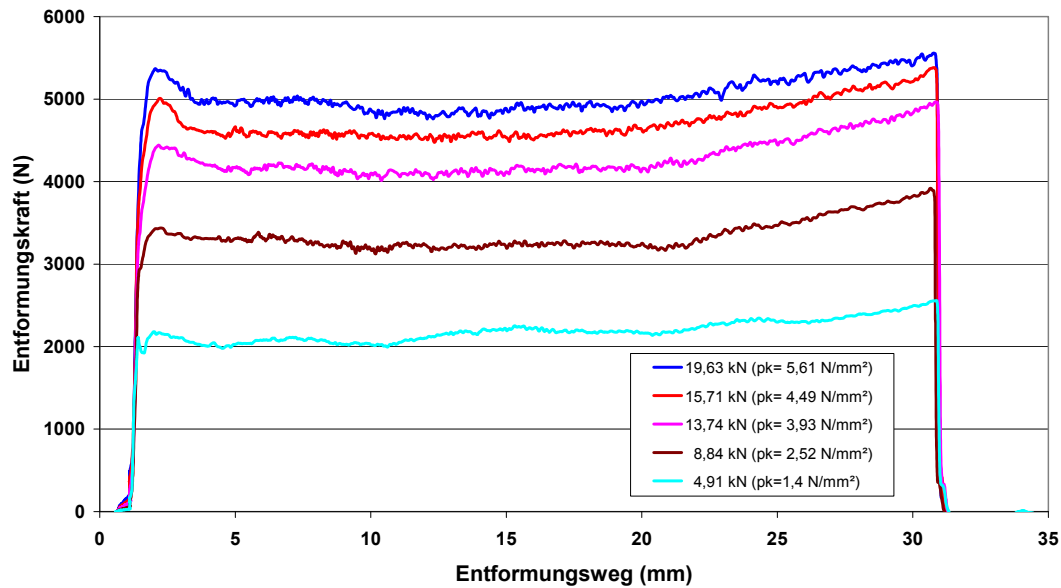


Abbildung 32: Entformungskraftverläufe von PP C791-30NA bei einer Vorlauf-temperatur von 40°C, dem Formeinsatz Pos.8 ($R_a = 0,021 \mu\text{m}$) und 5 verschiedenen Vertikalkraftstufen.

4.4.2. Haftreibwert μ_0

Abbildung 33 zeigt die ermittelten Haftreibwerte für PP C791–30NA Polypropylen in Abhängigkeit vom auf den Kunststoff-Probekörper wirkenden Kontaktdruck für die unbeschichteten Stahl-Probekörper bei strichpolierter und hochglanzpolierter Oberflächenstruktur und einer Vorlauf-temperatur von 15°C und 40°C. Die geringsten Haftreibwerte werden bei hoher Temperaturstufe von 40°C unter Einsatz der strichpolierten Stahl-Probekörperoberfläche erreicht. Die errechneten Haftreibwerte zeigen abgesehen von unterschiedlichen Niveaus eine ähnlich Charakteristik: Moderates Ansteigen bis zu einem Kontaktdruck von etwa 3,5 N/mm², danach beinahe Konstanz oder leichter Anstieg der Haftreibwerte. Eine Ausnahme stellt jedoch der Verlauf bei hochglanzpolierter Oberfläche und einer Vorlauf-temperatur von 40°C dar, wo ein sukzessiver Abfall der Haftreibwerte ab einem Kontaktdruck von 1,48 N/mm² zu beobachten ist (vgl. 4.1.2 Seite 35).

4.4.2.1. Einfluss der Oberflächenstruktur

Beim Einsatz der verschiedenen Oberflächenstrukturen des Stahl-Probekörpers (strichpoliert und hochglanzpoliert) kommt klar zum Ausdruck, dass mit der strichpolierten Oberfläche die niedrigeren Haftreibwerte erzielt werden.

4.4.2.2. Einfluss der Vorlauftemperatur

Die Einstellung bei niedriger Vorlauftemperatur von 15°C bewirkt im Falle der strichpolierten Oberfläche einen höheren Verlauf des Haftreibwertes als bei hoher Vorlauftemperatur von 40°C. Die Differenz der beinahe parallel verlaufenden Kurven beträgt etwa 0,06. Die Kurvenverläufe der Haftreibwerte bei hochglanzpolierter Oberfläche folgen dieser Gesetzmäßigkeit nicht mehr. Aufgrund der einerseits ansteigenden Haftreibwerte bei niedriger Temperaturstufe von 15°C und andererseits der abfallenden Haftreibwerte bei hoher Temperaturstufe von 40°C kreuzen sich die Kurvenverläufe bei einem Kontaktdruck von etwa 4,7 N/mm². Somit liegen nur die Haftreibwerte der beiden letzten Kontaktdruckstufen (5,05 N/mm² und 5,61 N/mm²) im zuvor erwähnten Trend.

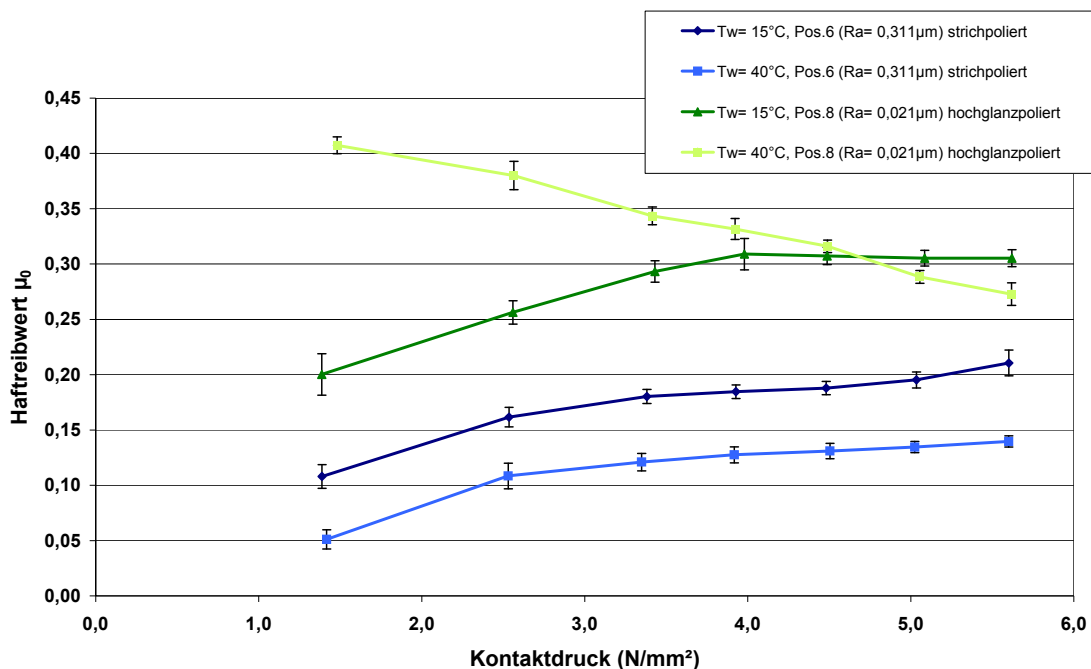


Abbildung 33: Haftreibwerte von PP C791–30NA bei 15°C und 40°C Vorlauf-temperatur, strichpolierten (Pos.6) und hochglanzpolierten (Pos.8) Formeinsätzen.

Im Anhang (siehe Abschnitt 7.4, Tabelle 11) sind alle ermittelten Ergebnisse aus den Entformungskraftmessungen für PP C791-30NA zusammengefasst. Darin werden der mittlere Haftreibwert μ_0 und die Standardabweichung σ , ermittelt aus jeweils fünf Einzelmessungen bei den entsprechenden Kontaktdruckstufen, aufgelistet.

4.5. Direkter Vergleich der verschiedenen Polypropylen-Typen

In diesem Abschnitt sollen noch einmal zusammenfassend und im direkten Vergleich zueinander auf die Messergebnisse der 4 verschiedenen additivierten, niedrig-viskosen Polypropylen-Typen der Firma DOW bei zwei unterschiedlich rauen Werkzeugeinsätzen und zwei Vorlauftemperaturen eingegangen werden. Die eingesetzten Polypropylentypen sind:

- *DOW C791-30NA Polypropylene Resin,*
- *Inspire 702 Performance Polymer,*
- *DOW C705-44NA HP Polypropylene Resin, und*
- *DR7023.00 Developmental Polypropylene Resin.*

4.5.1. Entformungskraftverläufe der 4 PP-Typen

Die in den Abbildung 34 bis Abbildung 37 dargestellten Entformungskraftverläufe beruhen auf Messungen mit einer Vertikalkraft von 11,78 kN ($p_k = 3,37 \text{ N/mm}^2$) bei einer Vorlauftemperatur von 15°C und 40°C unter Einsatz der unbeschichteten Werkzeugeinsätze Pos.6 ($R_a = 0,311 \mu\text{m}$, strichpoliert) und Pos.8 ($R_a = 0,021 \mu\text{m}$, hochglanzpoliert).

Die Charakteristik der Kurvenverläufe ist bei allen Fällen ähnlich. Unmittelbar während des Formöffnens steigt die Horizontalkraft steil an, durchläuft eine kleine Spitze („Zwischenpeak“), verursacht durch einen kleinen Hinterschnitt am Angusszapfen (→ vgl. 4.1.1, Seite 32), und erreicht das Maximum bei etwa 2 Millimeter Öffnungsweg, wo die Haftreibung überwunden wird. Im anschließenden Gleitreibungsbereich bleibt die gemessene Horizontalkraft annähernd konstant. Erst im Schlussschnitt des Öffnungsweges zeigt sich wieder ein kontinuierlicher Anstieg der Entformungskraft, der im Falle des hochglanzpolierten Formeinsatzes sogar den Maximalwert beim Überwinden der Haftreibung knapp übersteigen kann.

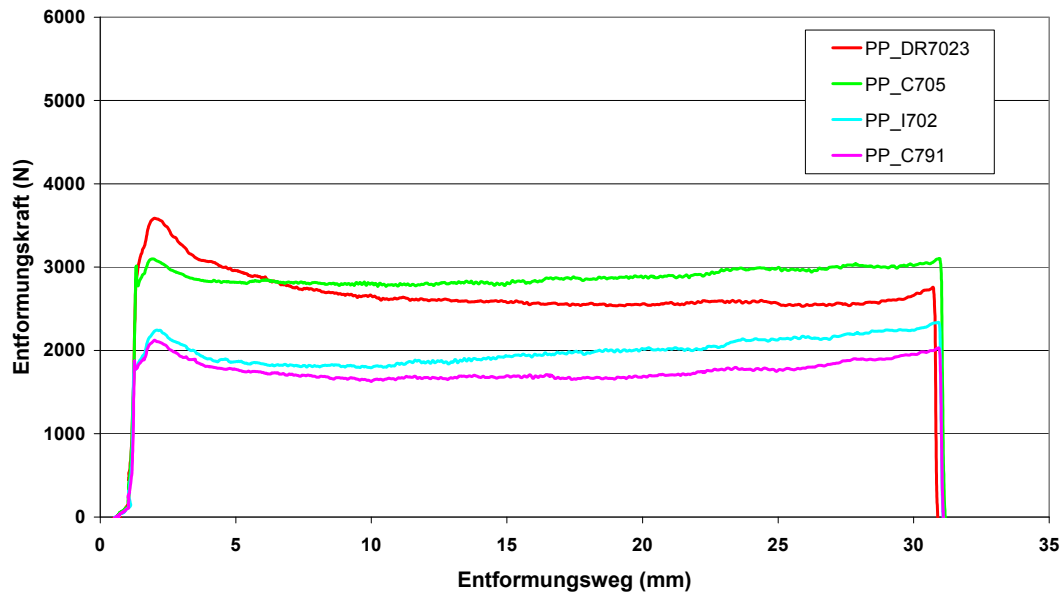


Abbildung 34: Entformungskraft für die Polypropylentypen C705-44NA, DR7023, Inspire702 und C791-30NA bei einer Vertikalkraft von 11,78 kN, einer Vorlauftemperatur von 15°C und strichpolierter Stahl-Probekörper-Oberfläche (Pos.6, $R_a = 0,311 \mu\text{m}$).

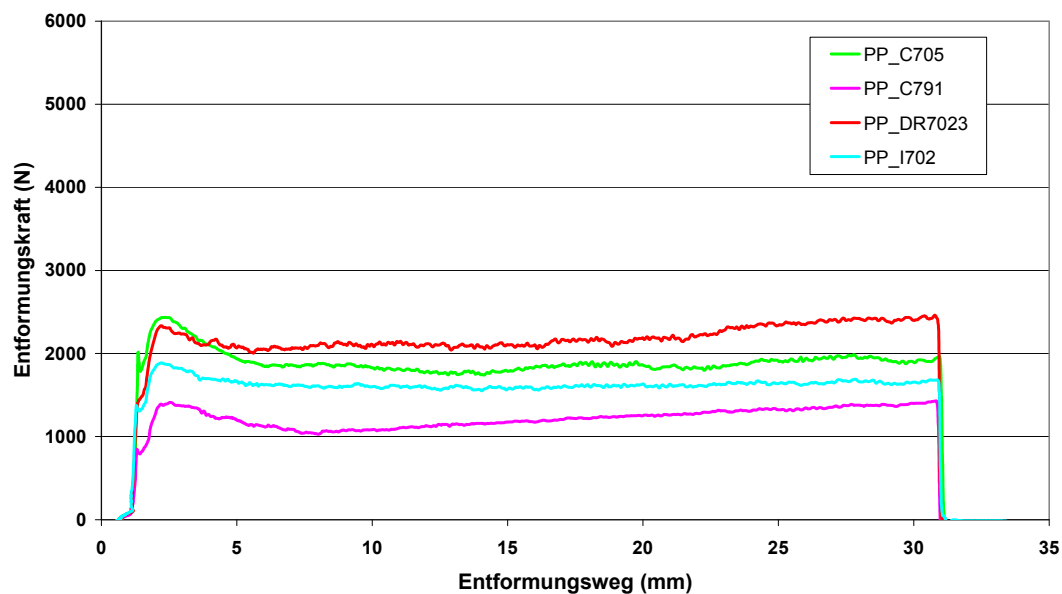


Abbildung 35: Entformungskraft für die Polypropylentypen C705-44NA, DR7023, Inspire702 und C791-30NA bei einer Vertikalkraft von 11,78 kN, einer Vorlauftemperatur von 40°C und strichpolierter Stahl-Probekörper-Oberfläche (Pos.6, $R_a = 0,311 \mu\text{m}$).

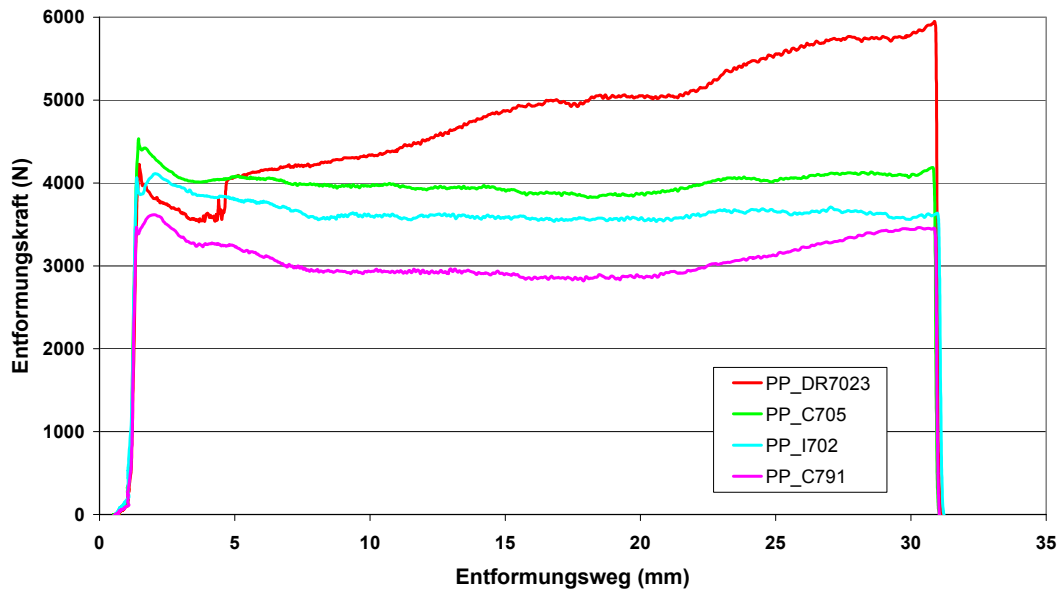


Abbildung 36: Entformungskraft für die Polypropylentypen C705-44NA, DR7023, Inspire702 und C791-30NA bei einer Vertikalkraft von 11,78 kN, einer Vorlauftemperatur von 15°C und hochglanzpolierter Stahl-Probekörper-Oberfläche (Pos.8, $R_a = 0,021 \mu\text{m}$).

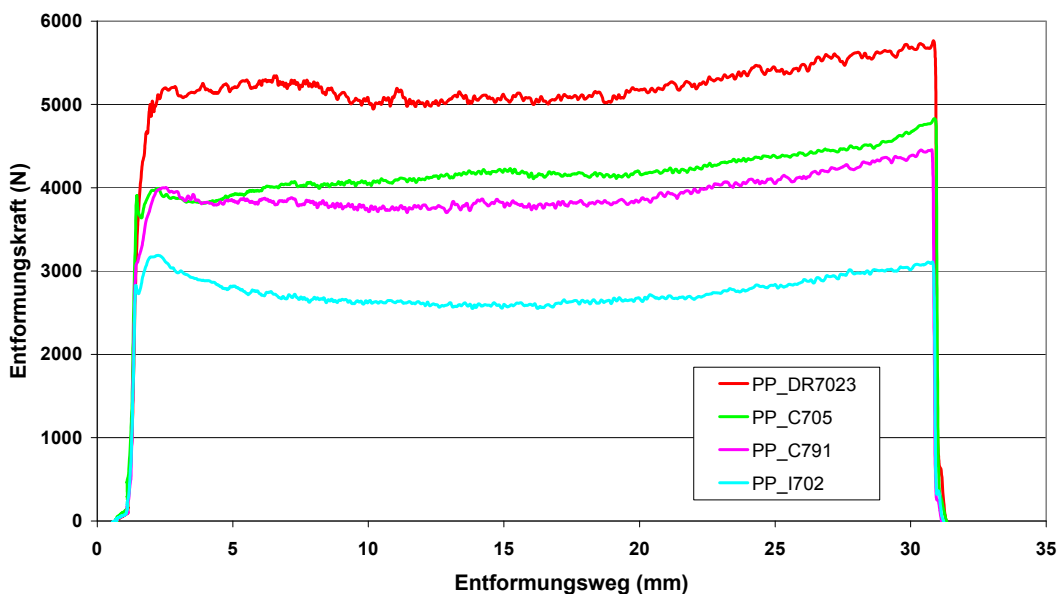


Abbildung 37: Entformungskraft für die Polypropylentypen C705-44NA, DR7023, Inspire702 und C791-30NA bei einer Vertikalkraft von 11,78 kN, einer Vorlauftemperatur von 40°C und hochglanzpolierter Stahl-Probekörper-Oberfläche (Pos.8, $R_a = 0,021 \mu\text{m}$).

4.5.1.1. Einfluss der Oberflächenrauigkeit

Die hochglanzpolierte Oberfläche (Pos.8, $R_a = 0,021 \mu\text{m}$; Abbildung 36 und Abbildung 37) verursacht in allen Fällen eine höhere Entformungskraft als die strichpolierte (Pos.6, $R_a = 0,311 \mu\text{m}$; Abbildung 34 und Abbildung 35).

4.5.1.2. Einfluss der Vorlauftemperatur und der verwendeten PP-Type

Bei strichpolierter Oberfläche ist bei hoher Temperaturstufe (40°C) die Entformungskraft stets geringer als bei niedriger (15°C). Unter Verwendung der hochglanzpolierten Oberfläche ist diese Abhängigkeit nur bei Inspire702 eindeutig zu beobachten. Bei C791-30NA zeigt sich ein genau gegenläufiges Verhalten, also höhere Entformungskraft bei höherer Vorlauftemperatur (40°C). PP_C705-44NA zeigt abgesehen vom Haftpeak nahezu keinen Temperatureinfluss. Bei PP_DR7023 ist hingegen der Temperatureinfluss nicht sinnvoll ermittelbar, da die Messung bei niedriger Werkzeugtemperatur durch Slip-Stick-Effekte verfälscht ist. Bei genauerer Betrachtung der Entformungskraftkurven bei niedrigem und hohem Temperaturniveau ist zu erkennen, dass sich auch die Reihenfolge bezüglich steigender Entformungskraftniveaus und deren Abstufungsdifferenz, speziell bei hochglanzpolierter Oberfläche, verändert. Für die Entformungskraftniveaus bei strichpolierter Oberfläche gilt bei beiden Temperaturstufen (15°C und 40°C), bei hochglanzpolierter Oberfläche nur bei niedriger Temperaturstufe (15°C), folgende Reihung (vgl. Abbildung 34 bis Abbildung 36):

$$\mathbf{C791 < I702 < C705 < DR7023.}$$

Für die Entformungskraftniveaus bei hochglanzpolierter Oberfläche und hoher Temperaturstufe (40°C) gilt:

$$\mathbf{I702 < C791 < C705 < DR7023.}$$

4.5.2. Haftreibwert μ_0

Aus der gemessenen Entformungskraft beim Haftkraftmaximum und der jeweils wirkenden Vertikalkraft wird der Haftreibwert μ_0 bestimmt, wobei der lokale Maximalwert der Entformungskraft im Bereich zwischen 0,6 und 2,8 mm des Öffnungsweges herangezogen wird. Der Kontaktdruck wird als Quotient der wirkenden Vertikalkraft und der Reibkontaktfläche (3.500 mm^2) errechnet. In den

folgenden Abbildung 38 bis Abbildung 41 sind die ermittelten Haftreibwerte für alle vier untersuchten Polypropylen-Typen in Abhängigkeit von steigendem Kontaktdruck bei jeweils niedriger (15°C) und hoher (40°C) Vorlauftemperatur und strichpolierter und hochglanzpolierter Stahl-Probekörper-Oberfläche gegenübergestellt.

Bei strichpolierter Oberfläche zeigen die Haftreibwerte mit steigendem Kontaktdruck bei allen Versuchseinstellungen eine leicht steigende Tendenz (Abbildung 38 und Abbildung 39). Eine Ausnahme stellt der ungewöhnliche Verlauf von DR7023 in Abbildung 39 dar. Die grundsätzliche Aussagekraft wäre zwar gegeben, dennoch sollten die Versuche bei 3,3 und 4,5 N/mm² wiederholt werden. Bei hochglanzpolierter Oberfläche und einer Vorlauftemperatur von 15°C nehmen die Reibwerte anfänglich zwar zu, bleiben jedoch ab etwa 4,0 N/mm² weitgehend konstant (Abbildung 40). Bei hochglanzpolierter Oberfläche und einer Vorlauftemperatur von 40°C (Abbildung 41) sinkt der Haftreibwert hingegen für alle 4 PP-Typen kontinuierlich mit Zunahme des Kontaktdruckes ab. Vermutlich ist eine einhergehende Reiberwärmung zwischen Formteilfläche und Stahl-Probekörper dafür verantwortlich.

Die niedrigsten Haftreibwerte ($\mu_0 = 0,05$ bis $0,14$) werden mit PP_C791 bei strichpolierter Oberfläche (Pos.6) und einer Vorlauftemperatur von 40°C erreicht.

Die höchsten Werte ($\mu_0 = 0,45$ bis $0,38$) erzielt PP_DR7023 bei hochglanzpolierter Oberfläche (Pos.8) und einer Vorlauftemperatur von 40°C.

4.5.2.1. Einfluss der Oberflächenrauigkeit

Bei der hochglanzpolierten Oberfläche (Pos.8, $R_a = 0,021 \mu\text{m}$) sind wie erwartet in allen Fällen höhere Haftreibwerte zu verzeichnen als bei der strichpolierten (Pos.6, $R_a = 0,311 \mu\text{m}$).

4.5.2.2. Einfluss der Vorlauftemperatur

Mit steigender Vorlauftemperatur nehmen die Haftreibwerte aller 4 PP-Typen beim strichpolierten Formeinsatz (Pos.6) wie erwartet ab. Bei hochglanzpolierter Oberfläche (Pos.8) steigen diese mit steigender Vorlauftemperatur an, ausgenommen für den PP-Typ Inspire702.

4.5.2.3. Einfluss der Materialtype

Die Reihung der Haftreibwerteniveaus der einzelnen PP-Typen bei niedriger oder hoher Vorlauftemperatur und strichpolierter (Pos.6) oder hochglanzpolierter (Pos.8) Oberfläche ist nur in folgenden zwei Fällen (Abbildung 39 und Abbildung 40) identisch:

- **Strichpolierte Oberfläche (Pos.6)**
Vorlauftemperatur 40°C **C791 < Inspire702 < DR7023 < C705**
- **Hochglanzpolierte Oberfläche (Pos.8)**
Vorlauftemperatur 15°C

Bei den anderen beiden Vorlauftemperatur- und Oberflächenkombinationen (Abbildung 38 und Abbildung 41) reihen sich die Haftreibwerteniveaus wie folgt:

- **Strichpolierte Oberfläche (Pos.6)**
Vorlauftemperatur 15°C **C791 < Inspire702 < C705 < DR7023**
- **Hochglanzpolierte Oberfläche (Pos.8)**
Vorlauftemperatur 40°C **Inspire702 < C791 < C705 < DR7023**

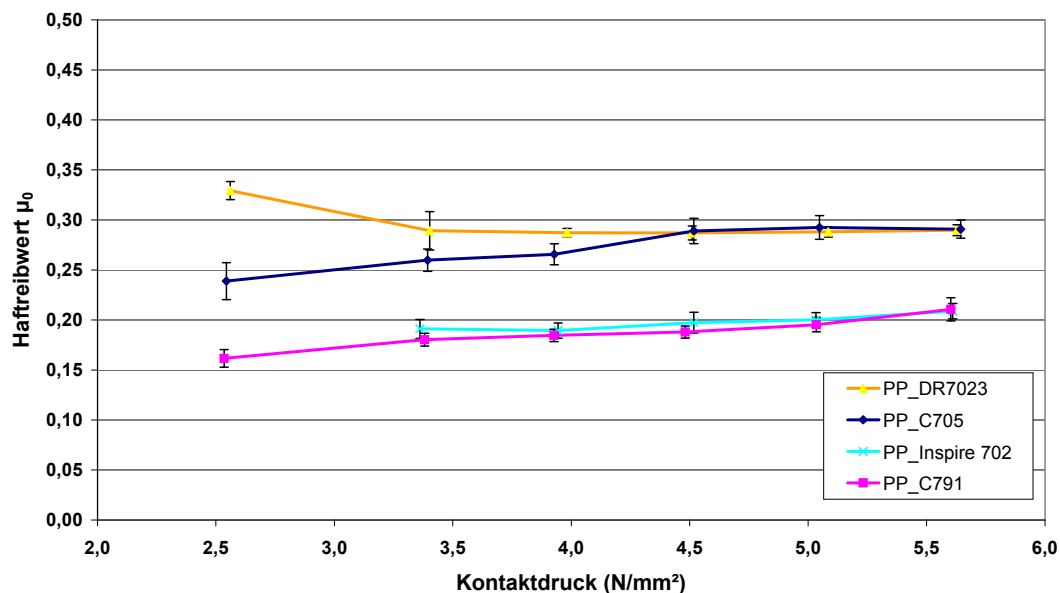


Abbildung 38: Haftreibwert für die Polypropylen-Typen C705-44NA, DR7023, Inspire702 und C791-30NA bei einer Vorlauftemperatur von 15°C und strichpolierter Stahl-Probekörper-Oberfläche (Pos.6, $R_a = 0,311 \mu\text{m}$).

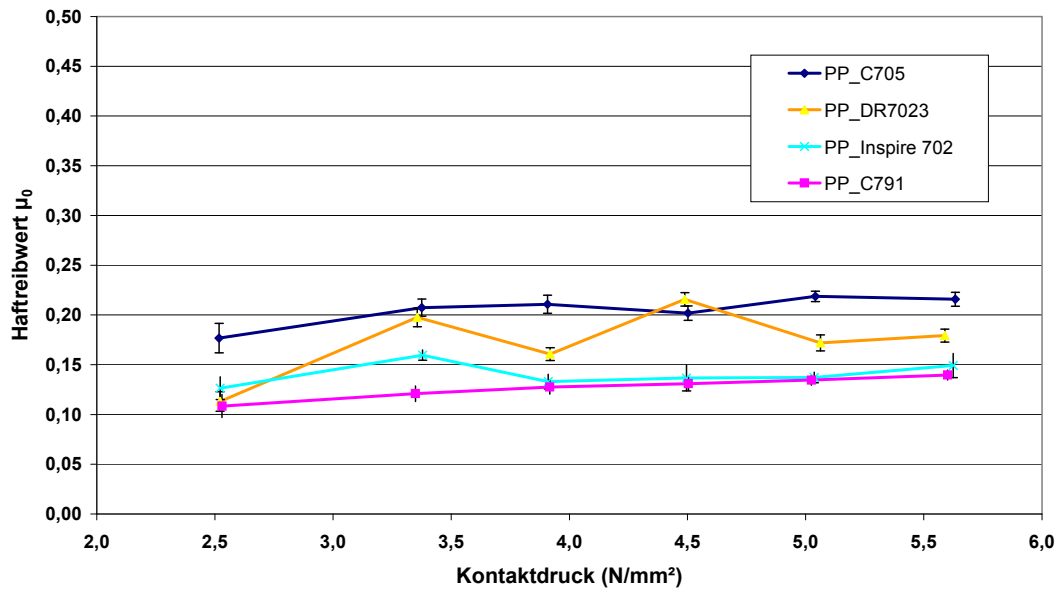


Abbildung 39: Haftreibwert für die Polypropylen-Typen C705-44NA, DR7023, Inspire702 und C791-30NA bei einer Vorlauftemperatur von 40°C und strichpolierter Stahl-Probekörper-Oberfläche (Pos.6, $R_a = 0,311 \mu\text{m}$).

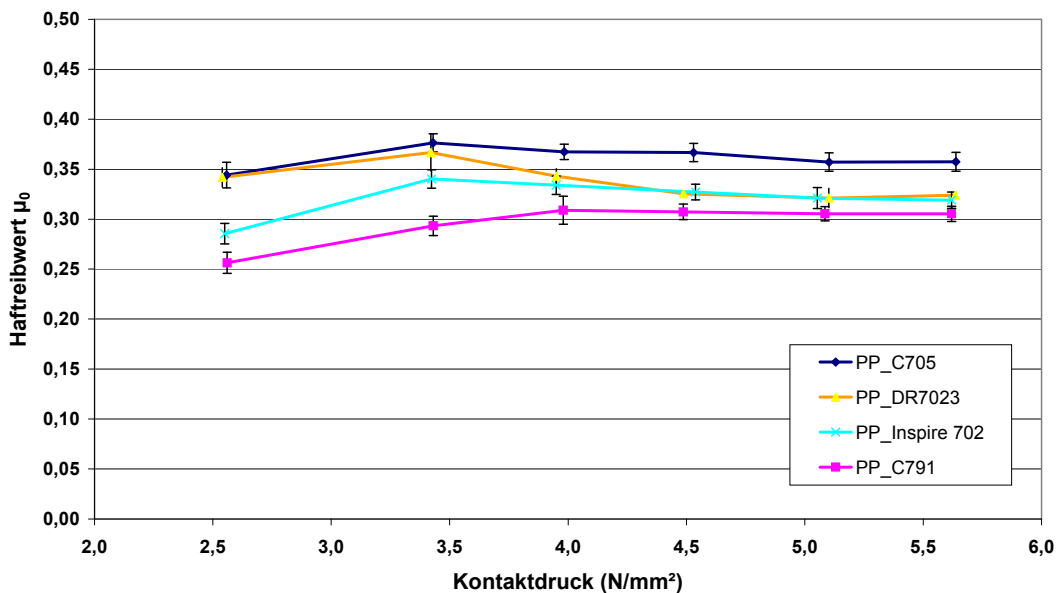


Abbildung 40: Haftreibwert für die Polypropylen-Typen C705-44NA, DR7023, Inspire702 und C791-30NA bei einer Vorlauftemperatur von 15°C und hochglanzpolierter Stahl-Probekörper-Oberfläche (Pos.8, $R_a = 0,021 \mu\text{m}$).

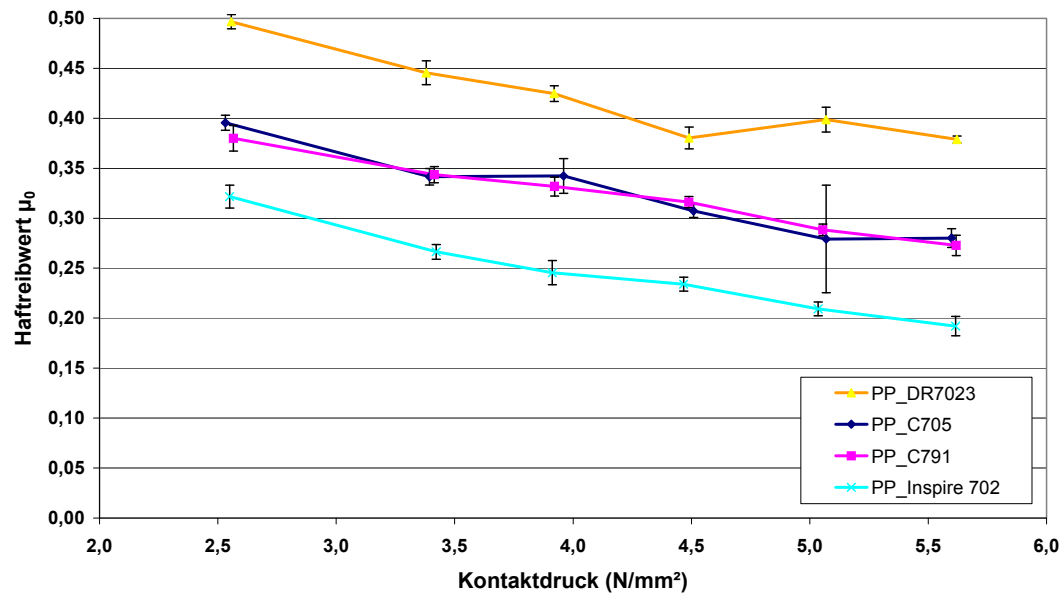


Abbildung 41: Haftreibwert für die Polypropylen-Typen C705-44NA, DR7023, Inspire702 und C791-30NA bei einer Vorlauftemperatur von 40°C und hochglanzpolierter Stahl-Probekörper-Oberfläche (Pos.8, $R_a = 0,021 \mu\text{m}$).

4.5.3. Maximaler Reibwert μ_{max}

In einigen Fällen der Versuchsauswertung kommt es vor, dass die maximale Entformungskraft nicht zu Beginn, d.h. während der ersten Millimeter des Öffnungsweges auftritt, sondern am Ende des aufgenommenen Öffnungsweges. In diesen Fällen übersteigt der maximale Reibwert μ_{max} , den Haftreibwert μ_0 . Dieser wird aus der über den gesamten Entformungsweg gemessenen maximalen Entformungskraft und der zugehörigen Vertikalkraft ermittelt. Der Effekt tritt bei folgenden PP-Typen und Versuchseinstellungen auf:

- Strichpolierte Oberfläche (Pos.6) DR7023
Vorlauftemperatur 15°C
- Hochglanzpolierte Oberfläche (Pos.8) DR7023
Vorlauftemperatur 15°C
- Hochglanzpolierte Oberfläche (Pos.8) DR7023, C705, C791
Vorlauftemperatur 40°C
- VST-DLC-Oberfläche (Pos.29) C705
Vorlauftemperatur 40°C
- DLC-Flex-Oberfläche (Pos.32) C705
Vorlauftemperatur 40°C

Die Ursache für diesen Anstieg der Entformungskraft nach dem Überwinden der eigentlichen Haftreibung μ_0 , ist noch weitgehend ungeklärt.

4.6. Hostaform C27021, Polyoxymethylen (POM)

Aufgrund der erhöhten Feuchtigkeitsaufnahme des Materials aus der Umgebungsluft wird es vor dem Einsatz in der Spritzgussmaschine mindestens 1 Stunde bei 120°C im Trockner gelagert.

4.6.1. Entformungskraftmessung

In sämtlichen Versuchsreihen wird die Entformungskraft unter Verwendung der beiden Beschichtungstypen VST-DLC und DLC-Flex bei unterschiedlicher Oberflächenrauigkeit und einer Vorlauftemperatur von 60°C und 80°C ermittelt und in Abbildung 42 und Abbildung 43 gegenübergestellt.

4.6.1.1. Einfluss des Beschichtungswerkstoffes

Die Versuchsreihen bei VST-DLC-Beschichtung weisen alle die folgende Charakteristik im Verlauf ihrer Entformungskraftkurven auf: Zuerst tritt ein sehr steiler Anstieg bis zu einem Öffnungsweg von etwa 2,2 mm auf, wo zumeist ein erkennbares Haftkraftmaximum erreicht wird, ehe die Entformungskraft wieder stetig bis zum Ende der Messstrecke ansteigt und dabei dieses Maximum klar übersteigt.

Bei den Versuchsreihen mit DLC-FLex-Beschichtung ergibt sich folgender Verlauf: Ebenfalls steiles Ansteigen der Kraftkurve bis etwa 2,2 mm, ab hier ein stetiger Anstieg bis zu einem lokalen (breiten) Maximum bei etwa 10 mm, ehe die Entformungskraft kurz absinkt und wieder stetig bis zum Ende der Messstrecke ansteigt. Auch hier ist die maximale Entformungskraft deutlich höher als die Haftkraft.

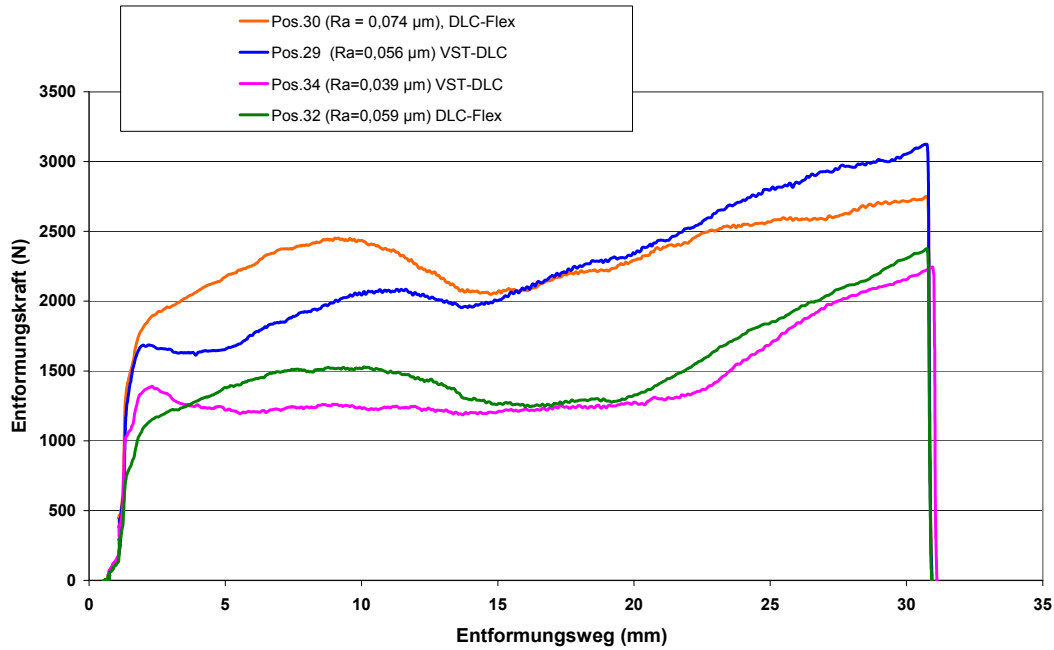


Abbildung 42: Entformungskraftverläufe für POM C27021 bei einer Vorlauf-temperatur von 60°C mit den Formeinsätzen Pos.29, Pos.30, Pos.32 und Pos.34 bei einer Vertikalkraft 13,74 kN ($p_k = 3,93 \text{ N/mm}^2$).

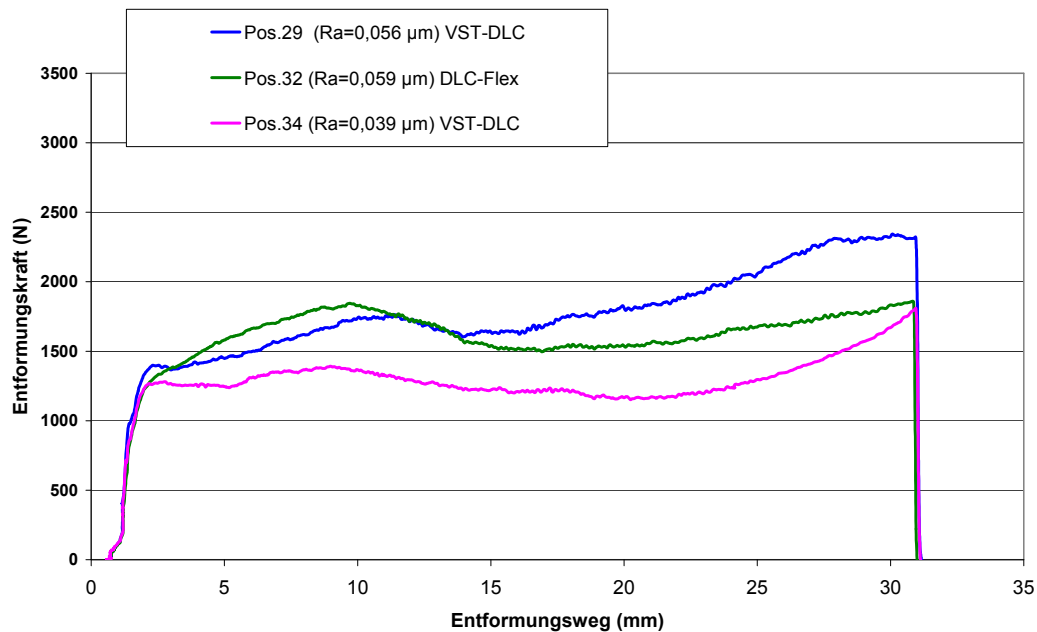


Abbildung 43: Entformungskraftverläufe für POM C27021 bei einer Vorlauf-temperatur von 80°C mit den Formeinsätzen Pos.29, Pos.30, Pos.32 und Pos.34 bei einer Vertikalkraft 13,74 kN ($p_k = 3,93 \text{ N/mm}^2$).

4.6.1.2. Einfluss der Oberflächenrauigkeit

Beim Betrachten der obigen Entformungskraftkurven kommt zum Ausdruck, dass eine höhere Oberflächenrauigkeit mit einer höheren Entformungskraft über weite Strecken des Öffnungsweges einhergeht. Da die Differenz der Rauigkeitswerte zwischen den Formeinsätzen gleicher Beschichtungswerkstoffe in etwa gleich groß ist (für DLC-Flex ist $\Delta R_a = 15 \mu\text{m}$, für VST-DLC ist $\Delta R_a = 17 \mu\text{m}$), ergibt sich auch in der Differenz der Entformungskräfte ein über den Öffnungsweg fast konstanter Wert von etwa 1000 N zwischen niedriger und hoher Oberflächenrauigkeit. Bei der höheren Temperaturstufe von 80°C (Abbildung 43) ist aufgrund einer fehlenden Messreihe nur ein Vergleich der Entformungskräfte zwischen den VST-DLC-beschichteten Formeinsätzen (Pos.29 und Pos.34) möglich. Auch hier bestätigt sich der zuvor erwähnte Sachverhalt: Höhere Entformungskräfte treten bei höherer Oberflächenrauigkeit auf, wenn auch bei geringerer und nicht über den gesamten Öffnungsweg so konstanter Differenz der Kraftwerte wie bei 60°C .

4.6.1.3. Einfluss der Vorlauftemperatur

Eine Änderung der Vorlauftemperatur als bestimmende Größe der Werkzeugtemperatur wirkt sich auf das Niveau der Entformungskräfte nur gering aus. Bei höherer Temperaturstufe von 80°C (Abbildung 43) endet der erste Steilanstieg aller drei Kurven etwa auf gleichem Kraftniveau und auch im weiteren Verlauf ist die Differenz der Entformungskräfte zwischen den 2 Rauigkeitsstufen der VST-DLC-Beschichtungen geringer als bei 60°C . Außerdem steigen die Entformungskraftkurven im letzten Drittel des Öffnungsweges weniger stark an.

4.6.1.4. Einfluss einer stufenweise erhöhten Vertikalkraft

In Abbildung 44 sind die Entformungskräfte bei stufenweiser Steigerung der Vertikalkraft für das Werkzeug Pos.30 (DLC-Flex, $R_a = 0,074 \mu\text{m}$) bei einer Vorlauftemperatur von 60°C dargestellt. Das Diagramm soll noch einmal den charakteristischen Verlauf der Entformungskraftkurven und vor allem die regelmäßige Abstufung (Differenz) der Werte bei steigenden Vertikalkräften zeigen.

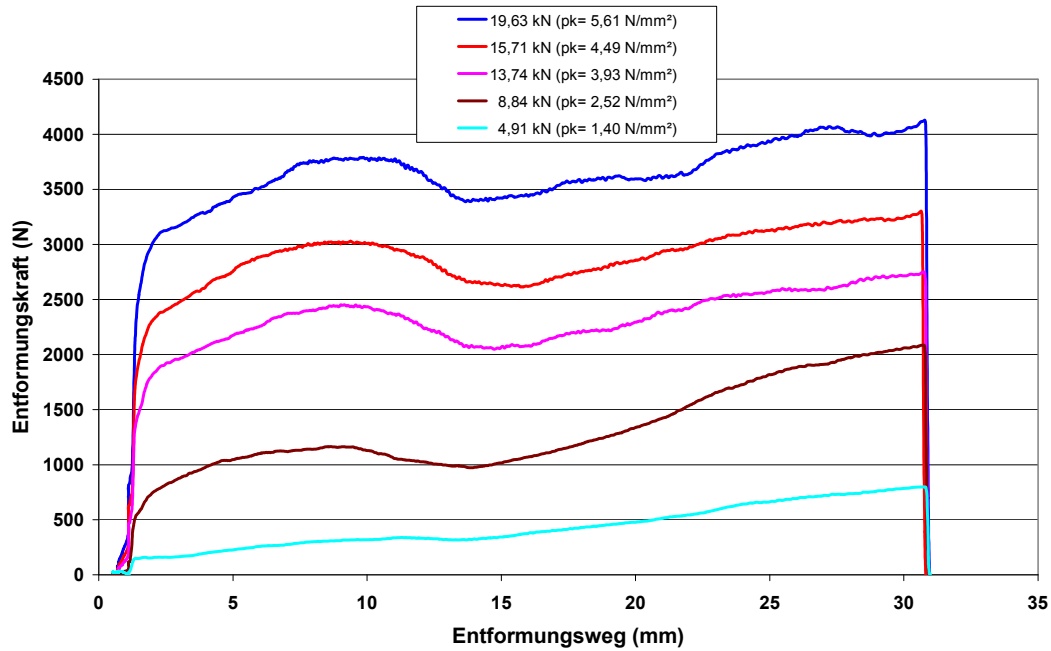


Abbildung 44: Entformungskraftverläufe für POM C27021 bei einer Vorlauf-temperatur von 60°C bei DLC-Flex-beschichtetem Formeinsatz Pos.30 ($R_a = 0,074 \mu\text{m}$) und 5 verschiedenen Vertikalkraftstufen.

4.6.2. Haftreibwert μ_0

Aus der gemessenen Entformungskraft beim Haftkraftmaximum und der jeweils wirkenden Vertikalkraft wird der Haftreibwert μ_0 bestimmt, wobei der lokale Maximalwert der Entformungskraft im Bereich von 0,6 bis 2,8 mm herangezogen wird. Der Kontaktdruck wird als Quotient der wirkenden Vertikalkraft und der Reibkontaktfläche (3.500 mm^2) errechnet. In den folgenden Abbildungen sind die ermittelten Haftreibwerte für alle Versuchsreihen in Abhängigkeit von steigenden Kontaktdruckstufen gegenübergestellt.

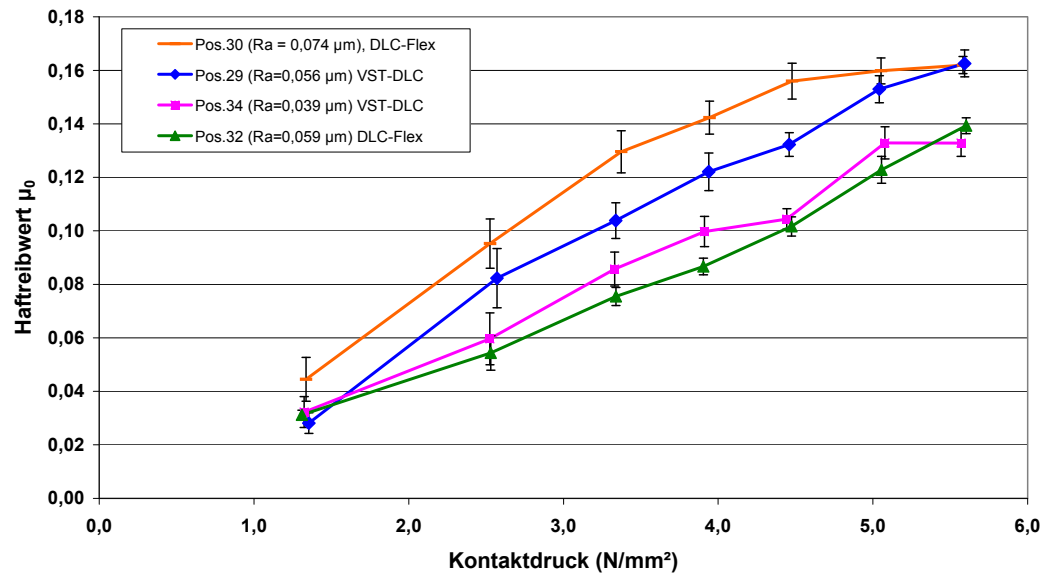


Abbildung 45: Haftreibwert μ_0 von POM C27021 über steigendem Kontaktdruck bei 60°C Vorlaufemperatur für die VST-DLC (Pos.29, Pos.34) und die DLC-Flex (Pos.32, Pos.30) beschichteten Formeinsätze.

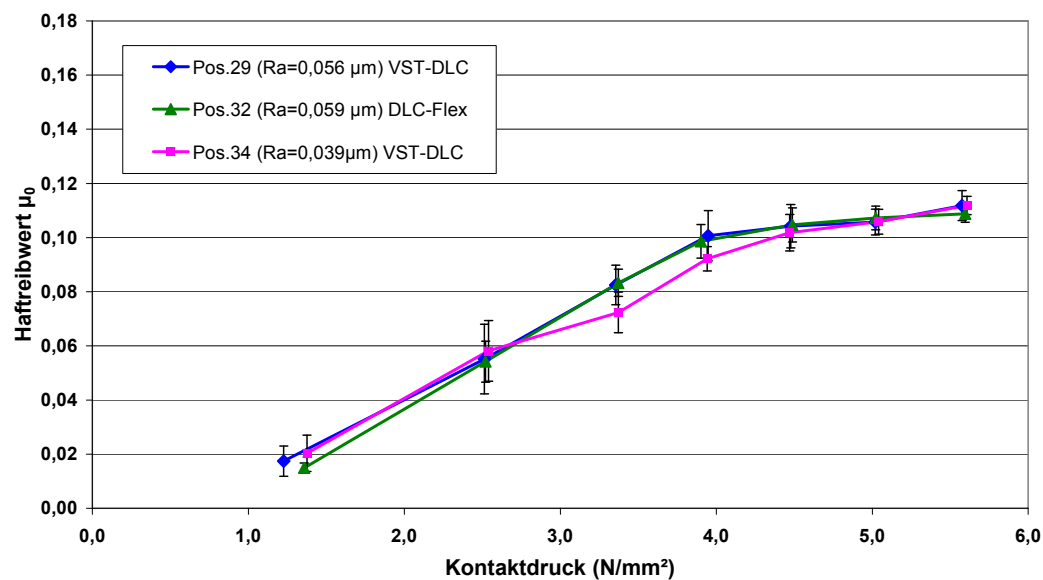


Abbildung 46: Haftreibwert μ_0 von POM C27021 über steigendem Kontaktdruck bei 80°C Vorlaufemperatur für die VST-DLC (Pos.29, Pos.34) und die DLC-Flex (Pos.32) beschichteten Formeinsätze.

4.6.2.1. Einfluss des Beschichtungswerkstoffes

Vergleicht man die Haftreibwerte der beiden Beschichtungswerkstoffe DLC-Flex und DLC-VST bei etwa gleicher Oberflächenrauigkeit und einer Vorlauftemperatur von 60°C (Abbildung 45), ergeben sich ab einem Kontaktdruck von 2,53 N/mm² für den Werkzeugeinsatz Pos.29 ($R_a = 0,056 \mu\text{m}$) mit VST-DLC Beschichtung signifikant höhere μ_0 -Werte als für den Werkzeugeinsatz Pos.32 ($R_a = 0,059 \mu\text{m}$) mit DLC-Flex Beschichtung. Bei der höheren Vorlauftemperatur von 80°C (Abbildung 46) spielt die Art des Beschichtungswerkstoffes sichtlich keine Rolle, da in diesem Fall alle Kurven innerhalb der Toleranzbreiten deckungsgleich sind.

4.6.2.2. Einfluss der Oberflächenrauigkeit

Beim Vergleich gleicher Beschichtungswerkstoffe unter Variation der Oberflächenrauigkeit und einer Vorlauftemperatur von 60°C (Abbildung 45) ergeben sich grundsätzlich für die höhere Oberflächenrauigkeit auch höhere Haftreibwerte. Konkret bedeutet dies beim Einsatz der DLC-Flex beschichteten Oberflächen, dass mit dem Werkzeugeinsatz Pos.30 ($R_a = 0,074 \mu\text{m}$) im Schnitt um etwa 0,06 höhere Haftreibwerte gegenüber dem Werkzeugeinsatz Pos.32 ($R_a = 0,059 \mu\text{m}$) erzielt werden. Beim Einsatz der DLC-VST beschichteten Oberflächen liefert der Werkzeugeinsatz Pos.29 ($R_a = 0,056 \mu\text{m}$) im Schnitt um etwa 0,02 höhere Haftreibwerte gegenüber dem Werkzeugeinsatz Pos.34 ($R_a = 0,039 \mu\text{m}$). Bei der höheren Temperaturstufe von 80°C (Abbildung 46) hat die Oberflächenrauigkeit keinen ersichtlichen Einfluss.

4.6.2.3. Einfluss der Vorlauftemperatur

In Abbildung 47 werden die Haftreibwerte der DLC-VST und DLC-Flex beschichteten Formeinsätze Pos.29 ($R_a = 0,056 \mu\text{m}$) und Pos.32 ($R_a = 0,059 \mu\text{m}$) bei annähernd gleicher Oberflächenrauigkeit bei niedriger (60°C) und hoher (80°C) Vorlauf-temperatur über steigendem Kontaktdruck dargestellt. Daraus lässt sich bei der DLC-Flex Beschichtung nicht unmittelbar ein Einfluss der Vorlauftemperatur erkennen, da hier nahezu alle Haftreibwerte bei den verschiedenen Kontaktdruckstufen innerhalb der Toleranzbreiten deckungsgleich sind. Bei der DLC-VST Beschichtung hingegen zeigt sich mit zunehmender Vorlauftemperatur eine Abnahme der Haftreibung. Die Differenz dieser Werte steigt mit steigendem Kontaktdruck leicht an.

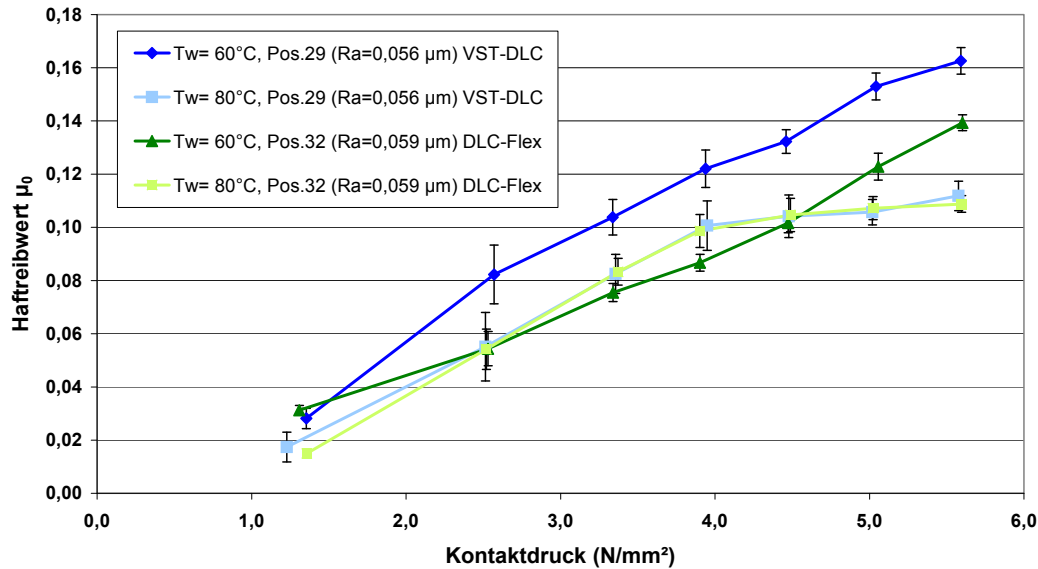


Abbildung 47: Haftreibwert μ_0 von POM C27021 über steigendem Kontaktdruck bei einer Vorlauftemperatur von 60°C und 80°C und DLC-VST (Pos.29) und DLC-Flex (Pos.32) beschichteten Formeinsätzen.

Im Anhang (siehe Abschnitt 7.4, Tabelle 12) sind alle ermittelten Ergebnisse aus den Entformungskraftmessungen für POM C27021 zusammengefasst. Darin werden der mittlere Haftreibwert μ_0 und die Standardabweichung σ , ermittelt aus jeweils fünf Einzelmessungen bei den entsprechenden Kontaktdruckstufen, aufgelistet. Die höchsten Haftreibwerte ($\mu_0 = 0,045$ bis $0,162$) treten bei der DLC-Flex Oberfläche (Pos.30, $R_a = 0,074 \mu\text{m}$) und einer Vorlauftemperatur von 60°C auf. Die niedrigsten Haftreibwerte ($\mu_0 = 0,015$ bis $0,109$) erzielt man bei der DLC-Flex Oberfläche (Pos.32, $R_a = 0,059 \mu\text{m}$) und einer Vorlauftemperatur von 80°C.

4.6.3. Maximaler Reibwert μ_{max}

Aus den Entformungskraftkurven von POM C27021 (siehe Abbildung 42 bis Abbildung 44) ist ersichtlich, dass ausnahmslos alle Maximalwerte für die Entformungskräfte nicht beim Überwinden der Haftreibung gleich am Beginn des Formöffnungsvorganges, sondern erst am Ende des Messweges aufgenommen werden. Aus diesem Grund scheint es sinnvoll, neben dem Haftreibwert μ_0 auch einen maximalen Reibwert μ_{max} zu ermitteln. Dieser wird aus der über den gesamten Entformungsweg gemessenen maximalen Entformungskraft und der dazugehörigen

Vertikalkraft errechnet. Bei früheren Untersuchungen [13] an anderen Polymeren deckten sich μ_0 und μ_{\max} zumeist, da in diesen Fällen auf ein charakteristisches Haftkraftmaximum ein nahezu konstanter Gleitreibungsbereich auf niedrigerem Kraftniveau folgte.

Der maximale Reibwert μ_{\max} (Abbildung 48 und Abbildung 49) bleibt innerhalb der Schwankungsbreiten mit steigendem Kontaktdruck weitgehend konstant, lediglich der Anfangswert ($p_k = 1,52 \text{ N/mm}^2$ bei der DLC-Flex beschichteten Oberfläche (Pos.30, $R_a = 0,074 \text{ }\mu\text{m}$) bei einer Vorlauftemperatur von 60°C fällt niedriger aus.

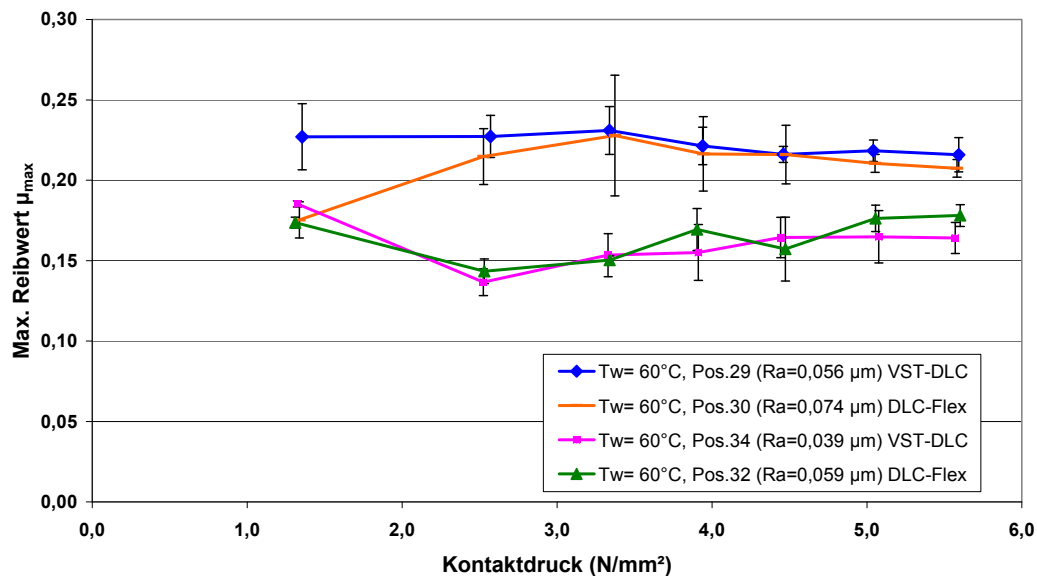


Abbildung 48: Maximaler Reibungskoeffizient μ_{\max} von POM C27021 über steigendem Kontaktdruck bei 60°C Vorlauftemperatur für die DLC-VST (Pos.29, Pos.34) und die DLC-Flex (Pos.32, Pos.30) beschichteten Formeinsätze.

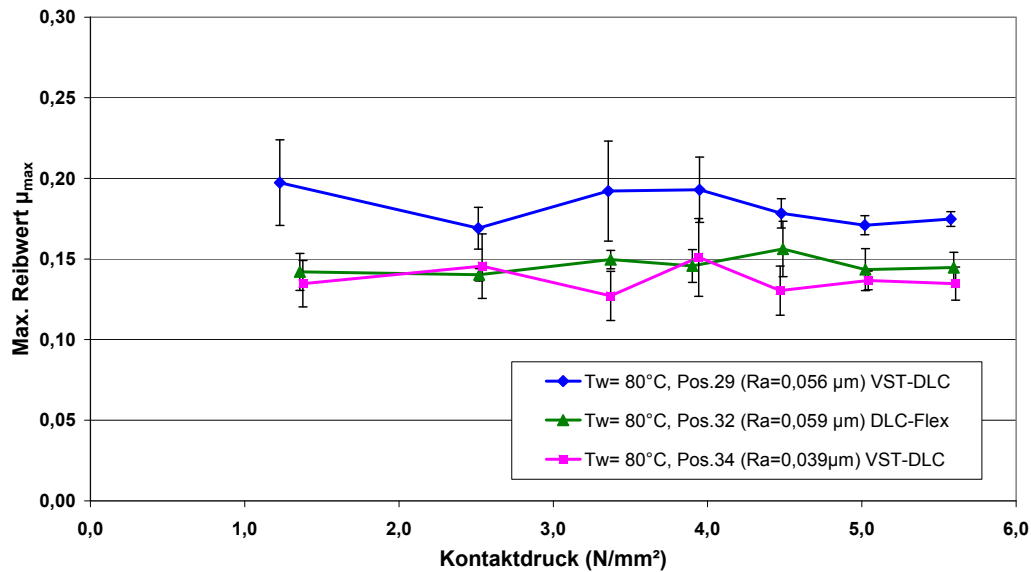


Abbildung 49: Maximaler Reibungskoeffizient μ_{max} von POM C27021 über steigendem Kontaktdruck bei einer Vorlauf-temperatur von 80°C für die DLC-VST (Pos.29, Pos.34) und die DLC-Flex (Pos.32) beschichteten Formeinsätze.

4.6.3.1. Einfluss des Beschichtungswerkstoffes

Vergleicht man die maximalen Reibwerte der beiden Beschichtungswerkstoffe DLC-VST und DLC-Flex bei etwa gleicher Oberflächenrauigkeit und einer Vorlauf-temperatur von 60°C (Abbildung 48, Kurve Pos.29 und Pos.32), ergeben sich für den Werkzeugeinsatz mit VST-DLC Beschichtung (Pos.29, $R_a = 0,056 \mu\text{m}$) signifikant höhere μ_{max} -Werte als für den Werkzeugeinsatz mit DLC-Flex Beschichtung (Pos.32, $R_a = 0,059 \mu\text{m}$). Wobei bei höherer Vorlauf-temperatur von 80°C (Abbildung 49) die Differenz der beiden ermittelten Reibwerte etwas geringer ist.

4.6.3.2. Einfluss der Oberflächenrauigkeit

Beim Vergleich gleicher Beschichtungswerkstoffe bei einer Vorlauf-temperatur von 60°C unter Variation der Oberflächenrauigkeit (Abbildung 48) ergibt sich bei fast allen Kontaktdruckstufen bei höherer Oberflächenrauigkeit ein höherer maximaler Reibwert. Bei hoher Temperaturstufe von 80°C ist der Einfluss der Oberflächen-rauigkeit beim Vergleich der beiden VST-DLC beschichteten Oberflächen (Pos.29 und Pos.34) etwas geringer ausgeprägt.

4.6.3.3. Einfluss der Vorlauftemperatur

Vergleicht man die maximalen Reibwerte bei unterschiedlicher Vorlauftemperatur (Abbildung 50), so gilt: Bei hoher Temperaturstufe von 80°C fallen die maximalen Reibwerte generell geringfügig niedriger aus. Bei der DLC-Flex beschichteten Oberfläche (Pos.32, Ra = 0,059 µm) ist diese Tendenz nur schwach ausgeprägt, der Temperatureinfluss somit geringer, als beim VST-DLC beschichteten Formeinsatz (Pos.29, Ra = 0,056 µm). Dies erklärt auch die bereits erwähnte geringere Differenz der Reibwerte zwischen VST-DLC und DLC-Flex beschichteter Oberfläche bei höherer Vorlauftemperatur von 80°C.

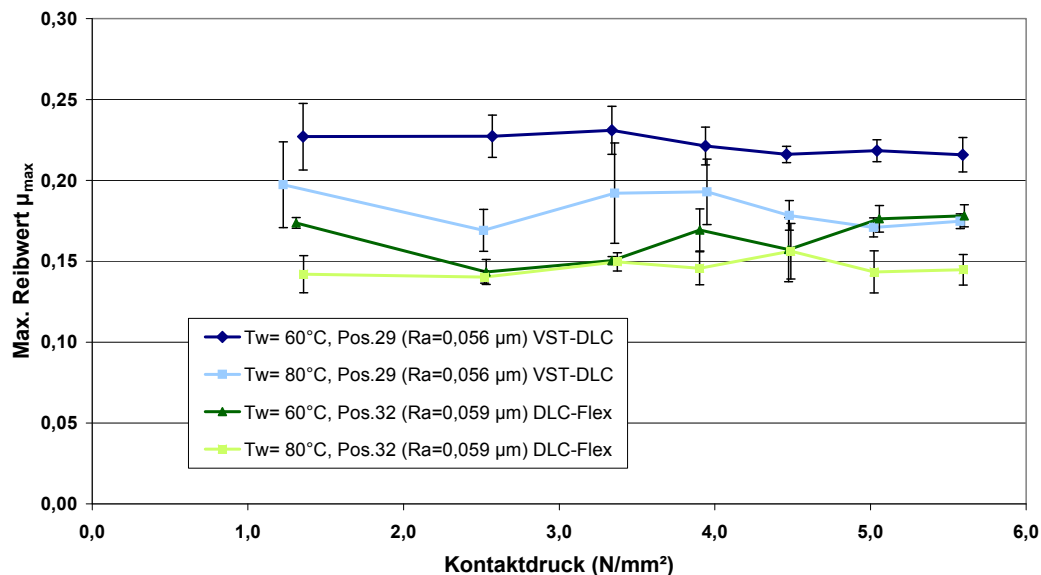


Abbildung 50: Maximaler Reibungskoeffizient μ_{max} von POM C27021 über steigendem Kontaktdruck bei 60°C und 80°C Vorlauftemperatur für die DLC-VST (Pos.29) und die DLC-Flex (Pos.32) beschichteten Formeinsätze.

4.7. DuPont™ Surlyn^R1652 (TPE)

Bei der verwendeten Materialmischung der Firma Dupont handelt es sich um einen neuen Ionomer-Typ, dessen Entformungs- bzw. Haftreibungseigenschaften beim Kontakt mit einer jeweils unbeschichteten strichpolierten (Pos.6) und hochglanzpolierten (Pos.8) Stahloberfläche untersucht werden sollen. Ionomere gehören zu der Klasse der thermoplastischen Elastomere und weisen daher die Eigenschaften

beider Kunststoffgruppen auf. Ionomere lassen sich aufschmelzen und somit in konventionellen Spritzgussmaschinen und Extrusionsanlagen verarbeiten.

Aus früheren Versuchen ist bekannt, dass Kunststofftypen dieser Klasse oft Schwierigkeiten beim direkten Entformen machen, weil offenbar durch den niedrigen E-Modul die erforderliche Formteilsteifigkeit nicht gegeben ist und es zu elastischen Deformationen kommt, die das Entformen, ebenso wie hohe Adhäsionskräfte der Oberflächen, erschweren. Daher wird die Vertikalkraftbelastung in kleineren Schritten gesteigert bzw. auf 11,78 kN begrenzt und die Höhe der Horizontalkraft beim Entformen genau beobachtet, um das Messsystem nicht zu überlasten und die Oberflächen der Werkzeugeinsätze nicht zu beschädigen. Speziell die Versuchsreihen bei hoher Temperaturstufe von 40°C mussten schon bei einer Vertikalkraft von 8,84 kN abgebrochen werden, da die hohe Reibung verbunden mit starkem Materialabrieb am Formeinsatz die Werkzeugtemperatur nach 5 gespritzten Formteilen schon auf 90°C ansteigen ließ.

4.7.1. Entformungskraftverläufe

Die Versuchsreihen für beide Werkzeugeinsätze bei niedriger Temperaturstufe (15°C) liefern bei den planmäßigen alternativen Kontaktdruckstufen (siehe Abschnitt 3.3 auf Seite 21, Tabelle 6) eindeutige Ergebnisse, ohne kritische Werte zu erreichen. Bei erhöhter Temperaturstufe von 40°C stößt man speziell unter Einsatz der hochglanzpolierten Formeinsätze schon ab einer Vertikalkraft von 8,84 kN an die Grenzen einer sinnvollen Messung. Denn ab dieser Belastung scheint die Haftreibung zwischen Material und Werkzeugoberfläche dermaßen groß zu sein, dass eine Materialabscherung bei deutlicher Temperaturerhöhung auftritt und an der Reibfläche des Formteils klar zu erkennen war. Die Ablagerung von Polymerpartikel an der Stahloberfläche sorgt dafür, dass die gewünschten Versuchsbedingungen nicht mehr erfüllt sind und die gemessenen Entformungskräfte verfälscht werden. Weiters weisen bereits akustische Anomalien wie erhöhte Scher- und Quietschgeräusche während des Formöffnens auf erhebliche Deformationsvorgänge am Formteil hin. Deshalb wurden die Versuchsreihen bei einer Vertikalkraft von 7,85 kN (beim hochglanzpolierten Formeinsatz) bzw. 8,84 kN (beim strichpolierten Einsatz) abgebrochen. Bei strichpoliertem Werkzeugeinsatz nimmt die Entformungskraft wie erwartet mit steigender Temperatur ab (Abbildung 51), bei hochglanzpolierter

Werkzeugoberfläche ist dies umgekehrt. Ferner treten die Kraftmaxima bei tiefer Temperaturstufe (15°C) enger, spitzer und in Bezug auf den Öffnungswegfortschritt bereits früher auf als bei höherer Temperaturstufe (40°C), wo der breite Peak erst bei einem Öffnungsweg von etwa 5 Millimetern sein Maximum hat. Dies weist auf eine sehr starke Schubdeformation aufgrund der hohen Elastizität hin.

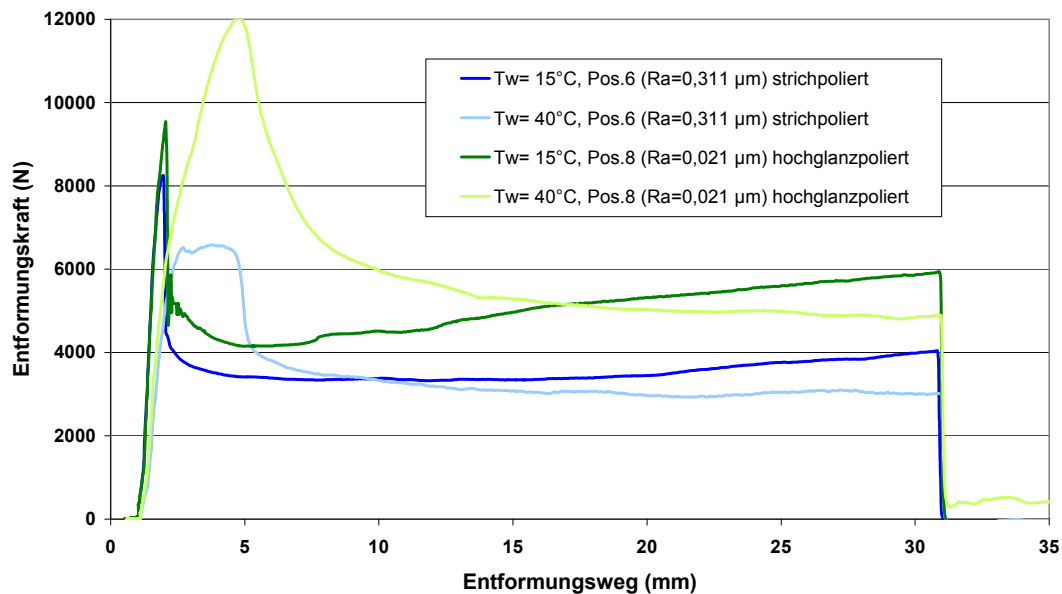


Abbildung 51: Entformungskraftverlauf von Surlyn 1652 bei einer Vorlauftemperatur von 15°C und 40°C bei strichpolierter und hochglanzpolierter Oberfläche bei einem Kontaktdruck von etwa 2,5 N/mm².

4.7.1.1. Einfluss der Oberflächenrauigkeit

In Abbildung 52 und Abbildung 53 sind die Entformungskraftverläufe bei einer Vorlauftemperatur von 15°C mit dem strichpolierten bzw. dem hochglanzpolierten Werkzeugeinsatz bei den einzelnen Kontaktdruckstufen von 1,40 N/mm², 2,24 N/mm² und 3,37 N/mm² dargestellt. Die Kraftmaxima liegen hier bei etwa 2 Millimeter Öffnungsweg, wobei die Kurven zu höherer Druckbelastung hin, leicht nach rechts versetzt sind, d.h. das Kraftmaximum wird jeweils später erreicht. Im Allgemeinen sind die Haftreibungswerte bei hochglanzpolierter Oberfläche höher.

Außerdem ist in Abbildung 53 bei hochglanzpolierter Oberfläche eine Art abklingender „Slip-Stick-Effekt“ unmittelbar nach Durchlaufen der Haftmaxima bei zwei Kontaktdruckstufen beobachtbar. Das bedeutet, dass während dieser Öffnungsphase

keine optimal gleichmäßige Oberflächenauflage zwischen Werkzeug und Formteil gegeben ist.

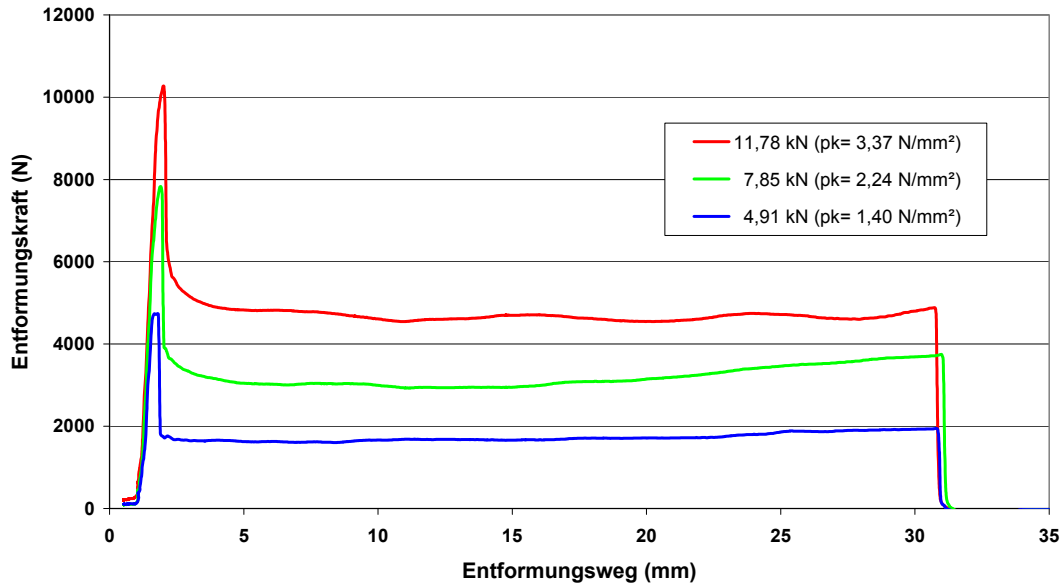


Abbildung 52: Entformungskraftverlauf von Surlyn 1652 bei einer Vorlauftemperatur von 15°C bei strichpolierter Oberfläche (Pos.6, $R_a = 0,311 \mu\text{m}$) und bei 3 verschiedenen Kontaktdrücken.

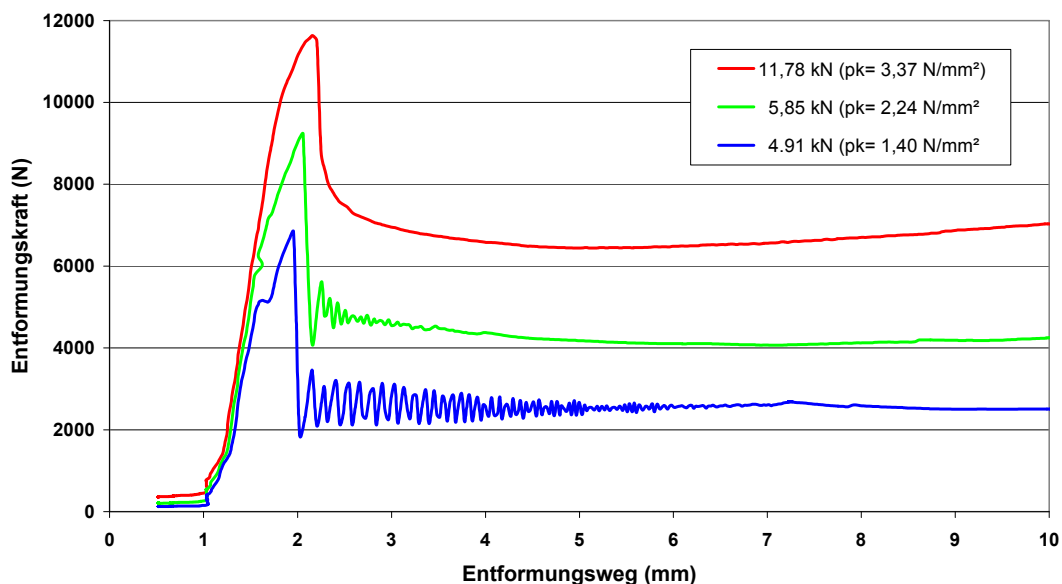


Abbildung 53: Entformungskraftverlauf von Surlyn 1652 bei einer Vorlauftemperatur von 15°C bei hochglanzpolierter Oberfläche (Pos.8, $R_a = 0,021 \mu\text{m}$) und bei 3 verschiedenen Kontaktdrücken.

4.7.2. Haftreibwert μ_0

Die errechneten Haftreibwerte in Abbildung 54 zeigen mit steigendem Kontaktdruck bei allen Versuchseinstellungen eine deutlich fallende Tendenz, mit stärkerem Abfall für die Einstellungen bei hoher Temperaturstufe ($T_w = 40^\circ\text{C}$).

Die Abnahme der Haftreibwerte über den wirkenden Kontaktdruck, besonders bei hoher Temperaturstufe, könnte auf bereits einsetzenden Materialabrieb, der sich auf der Stahloberfläche niederschlägt, zurückzuführen sein. Dieser Abrieb verringert den direkten Kontakt zwischen Formteil- und Werkzeugoberfläche und senkt die Reibungskräfte.

4.7.2.1. Einfluss der Oberflächenrauigkeit

In Bezug auf die Wahl des Werkzeugeinsatzes bzw. der Oberflächenbeschaffenheit werden beim Einsatz der hochglanzpolierten unbeschichteten Stahloberfläche (Pos.8, $R_a = 0,021 \mu\text{m}$) deutlich höhere Reibwerte ermittelt. Bei hoher Temperaturstufe (40°C) hat der Einsatz der strichpolierten oder hochglanzpolierten Oberfläche sichtlich mehr Einfluss auf die Haftreibwerte. In diesem Fall ist die Differenz der annähernd parallel verlaufenden Kurven in Abbildung 54 also größer.

4.7.2.2. Einfluss der Vorlauftemperatur

Beim Vergleich der Haftreibwerte unter Variation der Vorlauftemperatur (40°C und 15°C) sind bei hoher Temperaturstufe zumeist höhere Haftreibwerte zu beobachten.

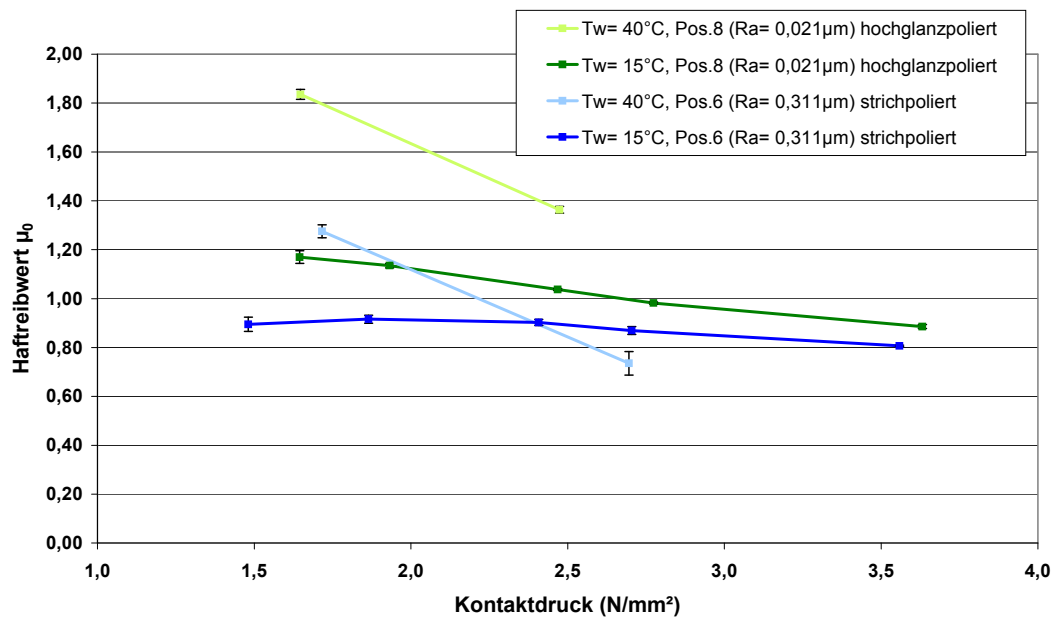


Abbildung 54: Haftreibwerte von Surlyn 1652 bei einer Vorlauftemperatur von 15°C und 40°C bei strichpolierter und hochglanzpolierter Oberfläche und steigendem Kontaktdruck.

Im Anhang (siehe Abschnitt 7.4, Tabelle 13) sind alle ermittelten Ergebnisse aus den Entformungskraftmessungen für Surlyn^R1652 zusammengefasst. Darin werden der mittlere Haftreibwert μ_0 und die Standardabweichung σ , ermittelt aus jeweils fünf Einzelmessungen bei den entsprechenden Kontaktdruckstufen, aufgelistet.

4.8. IotekTM 8030 (TPE)

4.8.1. Entformungskraftverläufe

Die Messungen bei strichpolierter Oberfläche (Pos.6, $R_a = 0,311 \mu\text{m}$) wurden bereits bei einem Kontaktdruck von 2,52 N/mm² abgebrochen und die bei hochglanzpolierter Oberfläche (Pos.8, $R_a = 0,021 \mu\text{m}$) beschränkten sich nur auf 3 Einzelmessungen (+ 5 Vorzyklen) bei einem Kontaktdruck von 1,40 N/mm². Abbildung 55 zeigt die Entformungskraftverläufe dieser drei Messungen bei hochglanzpolierter Oberfläche und macht sichtbar, dass die erste Messung noch ohne größere Kraftschwankungen abläuft. Die zweite und die dritte Messung weisen „Slip-Stick“ Effekte auf, die vermutlich durch einsetzenden Materialabrieb ausgelöst werden (vgl. 4.7.1., Seite 72).

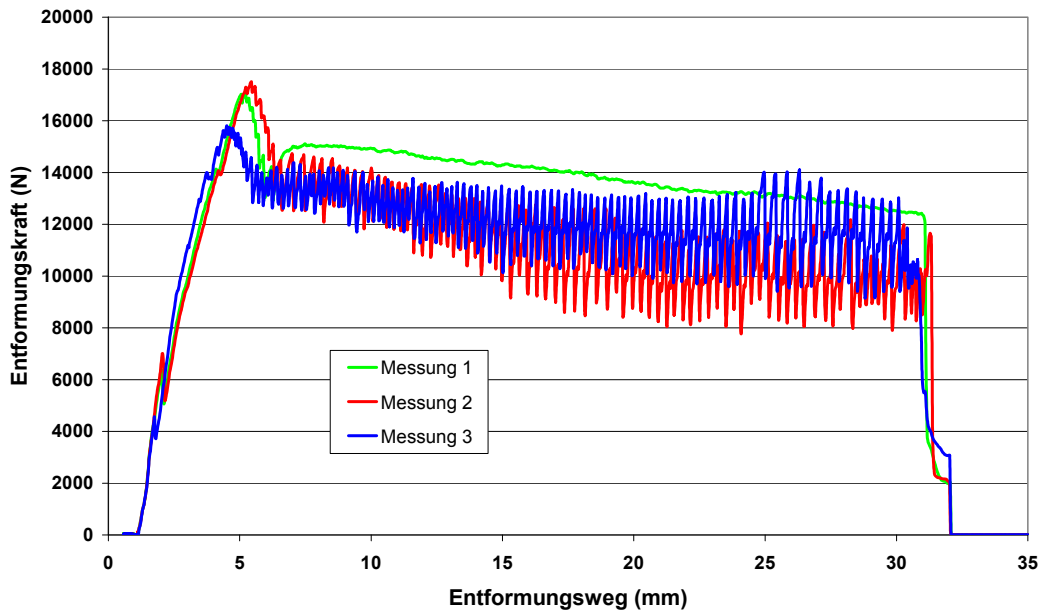


Abbildung 55: Entformungskraftverlauf von Iotek 8030 bei einer Vorlauftemperatur von 40°C mit dem hochglanzpolierten Formeinsatz (Pos.8, $R_a = 0,021 \mu\text{m}$) bei einem Kontaktdruck von $1,40 \text{ N/mm}^2$ für 3 Messversuche.

4.8.1.1. Einfluss einer stufenweise erhöhten Vertikalkraft

In Abbildung 56 sind die Entformungskraftverläufe bei strichpolierter Oberfläche (Pos.6, $R_a = 0,311 \mu\text{m}$) dargestellt, die den Einfluss einer stufenweisen Steigerung der Vertikalkraft hervorheben sollen. Eine höhere Vertikalkraft führt auch zu einem höheren Entformungskraftniveau, zumindest im Gleitreibungsbereich. Die Haftkraft-Peaks folgen nicht exakt diesem Trend, das Kraftmaximum $F_{\text{max}1,40}$ bei der niedrigsten Kontaktdruckstufe von $1,40 \text{ N/mm}^2$ fällt zwar am niedrigsten aus, die Reihung der übrigen Maxima verläuft aber umgekehrt: $F_{\text{max}1,68} > F_{\text{max}2,24} > F_{\text{max}2,52}$, wobei die Differenzen zwischen diesen drei Entformungskraftverläufen im Vergleich zum Niveauunterschied der Kurven bei einem Kontaktdruck von $1,40 \text{ N/mm}^2$ und $1,68 \text{ N/mm}^2$ nur gering ausfallen, und somit eine Steigerung der wirkenden Vertikalkraft in diesem Bereich anscheinend weniger Einfluss auf die gemessene Entformungskraft nimmt.

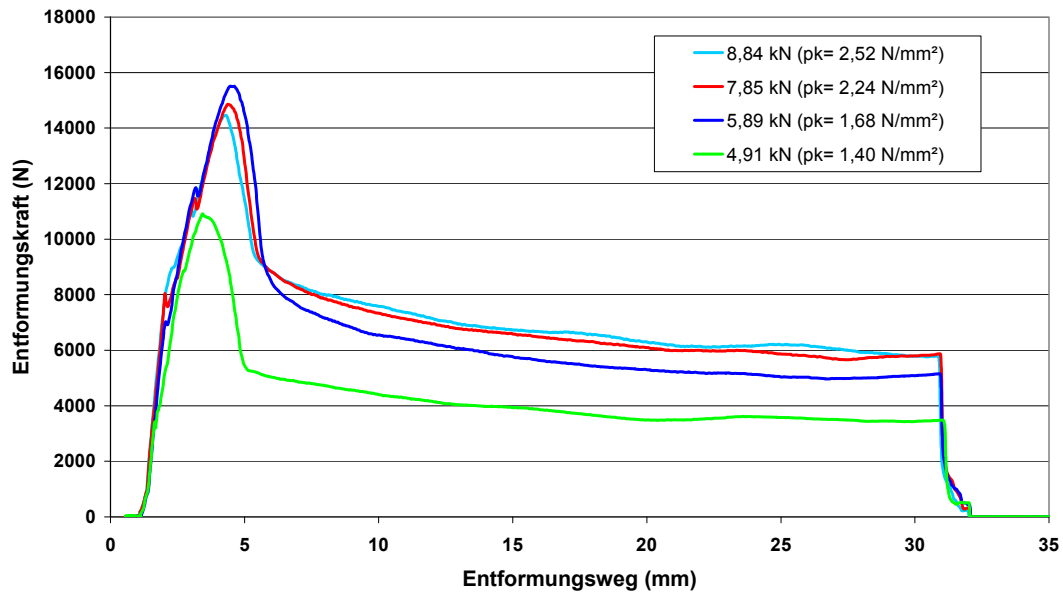


Abbildung 56: Entformungskraftverlauf von Lotek 8030 bei einer Vorlauftemperatur von 40°C mit dem strichpolierten Formeinsatz (Pos.6, $R_a = 0,311 \mu\text{m}$) bei 4 verschiedenen Kontaktdruckstufen.

4.8.1.2. Einfluss der Oberflächenrauigkeit

Aufgrund der fehlenden Messergebnisse bei hochglanzpolierter Oberfläche lässt sich ein Vergleich der Entformungskräfte bei strichpolierter und hochglanzpolierter Oberfläche nur bei der niedrigsten Kontaktdruckstufe von 1,40 N/mm² ziehen. Die Gegenüberstellung in Abbildung 57 verwendet jeweils die 1. Messung der üblichen Fünfer-Serie und zeigt ein um etwa 6 kN niedrigeres Haftkraftmaximum bei strichpolierter Oberfläche.

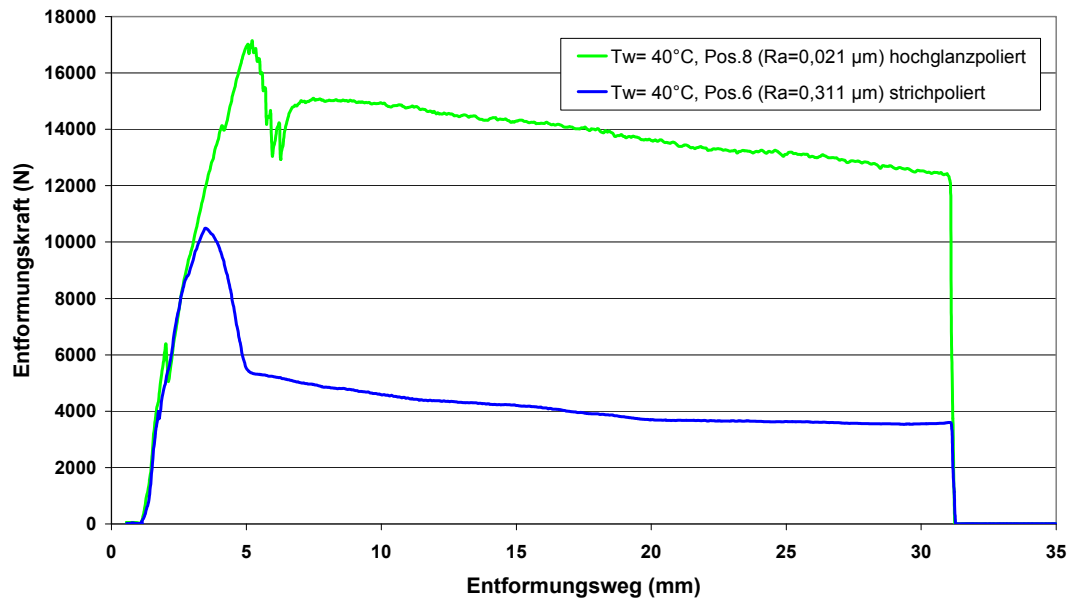


Abbildung 57: Entformungskraftverlauf von Lotek 8030 bei einer Vorlauftemperatur von 40°C bei strichpolierter und hochglanzpolierter Oberfläche und einem Kontaktdruck von 1,40 N/mm².

4.8.1.3. Einfluss der Vorlauftemperatur

Auf diese Einflussgröße kann wegen nicht durchführbarer Messversuche bei niedriger Temperaturstufe (15°C) nicht näher eingegangen werden.

4.8.2. Haftreibungswert μ_0

Der Haftreibungswert, wie in Abbildung 58 dargestellt, nimmt bei einem Kontaktdruck von 1,52 N/mm² einen relativ hohen Wert von 2 an. Bis zur nächsten Kontaktdruckstufe von 1,68 N/mm² steigert sich der Wert noch auf 2,4 und fällt letztlich auf einen Wert von 1,47 ab. Dieser Verlauf ist für Thermoplaste untypisch und könnte durch die elastomer-ähnlichen Eigenschaften der Ionomere verursacht werden. Vermutlich führen hohe Haftkräfte ab einem Kontaktdruck von 1,68 zum Materialabrieb in der Kontaktfläche und damit zur Reibungsreduktion.

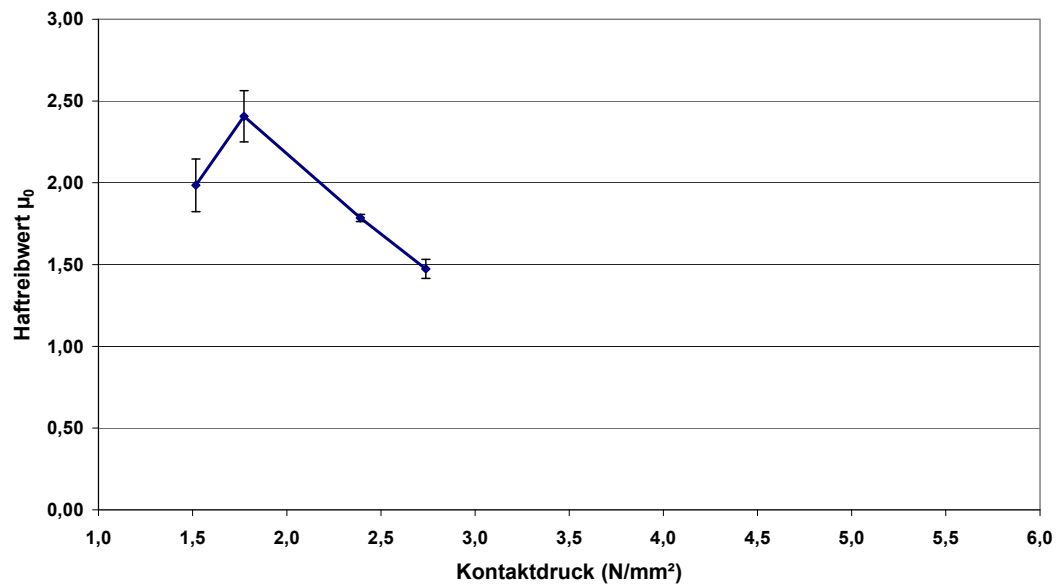


Abbildung 58: Haftreibwert in Abhängigkeit vom Kontaktdruck bei einer Vorlauf-temperatur von 40°C und dem strichpolierten Formeinsatz (Pos.6, $R_a = 0,311 \mu\text{m}$).

5. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Masterarbeit wurde die Entformungskraft und der daraus ermittelte Haftreibwert während des Formöffnens der Spritzgießmaschine in Abhängigkeit von der Oberflächenstruktur des Stahl-Probekörpers und der Werkzeugtemperatur bei mehreren Normalkraftbelastungsstufen unter Einsatz verschiedener Kunststoffe untersucht.

Die Kunststoffprobekörper wurden aus den 4 Polypropylen-Typen *C705-44NA*, *C791-30NA*, *DR7023*, *I702* (alle DOW), dem Polyoxymethylen-Typ *Hostaform C27021*, sowie den thermoplastischen Elastomeren *Iotek 8030* und *Surlyn 1652* im Spritzgießprozess hergestellt. Dabei wurde die in Abschnitt 3 ausführlich beschriebene Messapparatur zur Entformungskraftmessung verwendet. Die Verläufe der aufgenommenen Entformungskraftkurven der Polypropylentypen (PP), des Polyoxymethylen (POM) und der thermoplastischen Elastomeren (TPE) unterscheiden sich klar von einander:

Bei den Polypropylen-Typen (**PP**) steigt die Entformungskraft steil an und erreicht das Haftkraftmaximum bei etwa 1 mm Öffnungsweg (Relativweg). Danach fällt die Entformungskraft flach und in geringem Maße ab. Es setzt ein stabiler Gleitvorgang zwischen Formteil und Werkzeugoberfläche ein, die Entformungskraft bleibt annähernd konstant und steigt erst im letzten Drittel des Entformungsweges wieder leicht an.

Der Entformungskraftverlauf der thermoplastischen Elastomere (**TPE**) verhält sich bis zum Erreichen des spitzen Haftkraftmaximums ähnlich dem der PP-Typen, mit dem Unterschied, dass die Maxima bei 40°C Werkzeugtemperatur erst bei etwa 3 bis 4 mm Öffnungsweg zu verzeichnen sind. Im weiteren Verlauf, nach einem steilen und relativ großen Abfall der Entformungskraft, zeigt sich bei der 40°C Temperaturstufe ein flacher stetiger Abfall der Kurve bis zum Messwegende. Bei der 15°C Temperaturstufe steigt die Kurve dagegen wieder leicht an. Auf Grund der hohen Klebeneigung dieser Formmassen treten einerseits sehr hohe Entformungskräfte von über 15 kN (Reibwerte >1!) an den Haftpeaks auf, und andererseits verfälscht starker Materialabrieb die Messergebnisse. Daher ist von diesen Formmassen nicht die volle Bandbreite der vorgesehenen Messversuche zur Interpretation vorhanden.

Die Entformungskraftkurven von **POM C27021** hingegen zeigen eine völlig andere Charakteristik im Verlauf: Zuerst ist ein steiler Kraftanstieg bis zu einem Öffnungsweg von etwa 1 mm feststellbar, wo sich im Falle der VST-DLC-Beschichtung ein relativ breites lokales Haftkraftmaximum ausbildet. Bei der DLC-Flex-Beschichtung hingegen gibt es dort keinen Extrempunkt, sondern einen Knick im Kurvenverlauf mit anschließend flacher verlaufender Kurve.

Mit zunehmender Vertikalkraft nehmen die Entformungskräfte bei allen Polymeren im Haftreibungs- als auch im Gleitreibungsbereich zu, wobei speziell beim unbeschichteten hochglanzpolierten Formeinsatz (Pos.8) der Vertikalkrafteinfluss ab einem Kraftniveau von etwa 9 kN zunehmend geringer wird. Für die thermoplastischen Elastomere (TPE) tritt dieser Effekt bereits früher bei weit geringerer Vertikalkraft auf. Bei weiterer Steigerung der Vertikalkraft hat diese nahezu keinen Einfluss auf die Entformungskraft mehr. Dies lässt sich möglicherweise auf einsetzenden Materialabrieb und Formbelag am Testwerkzeug zurückführen.

Eine Steigerung der Vorlauftemperatur bedeutet in fast allen Fällen eine Senkung der aufzubringenden Entformungskräfte.

Mit Zunahme der Oberflächenrauigkeit des als Reibpartner fungierenden Werkzeugeinsatzes nimmt die Entformungskraft bei den unbeschichteten Stahl-Probekörpern stets ab, bei den beschichteten (VST-DLC und DLC-Flex) aber zu. Die Tabelle 7 zeigt bei welcher Oberflächenrauigkeit und Beschichtung niedrige oder hohe Entformungskräfte zu erwarten sind.

Tabelle 7: Effekt von Rauigkeit und Beschichtung auf die Entformungskraft

	Entformungskraft	
	hoch	niedrig
Unbeschichtet:	$R_a = 0,021 \mu\text{m}$ (hochglanzpoliert)	$R_a = 0,311 \mu\text{m}$ (strichpoliert)
*VST-DLC-beschichtet:	$R_a = 0,056 \mu\text{m}$	$R_a = 0,039 \mu\text{m}$
*DLC-Flex-beschichtet:	$R_a = 0,074 \mu\text{m}$	$R_a = 0,059 \mu\text{m}$

* DLC-Flex und VST-DLC beschichtete Werkzeugoberflächen wurden nur bei den Messungen mit POM eingesetzt.

Der jeweilige Haftreibwert μ_0 kann aus dem gemessenen Wertepaar Haftreibkraft / Vertikalkraft bestimmt und über steigendem Kontaktdruck im Diagramm dargestellt werden. Die Haftreibwerte der unterschiedlichen Polypropylen-Typen (**PP**) zeigen beinahe alle nur eine geringe Abhängigkeit vom Kontaktdruck, da die Werte über den ersten drei Kontaktdruckstufen zumeist leicht ansteigen und danach in ihren Toleranzbreiten fast konstant verlaufen.

Bei strichpolierter Oberfläche werden für alle PP-Typen niedrigere Haftreibwerte als bei hochglanzpolierter Oberfläche verzeichnet.

Mit steigender Werkzeugtemperatur und bei strichpolierter Oberfläche sinken bei allen PP-Typen die Haftreibwerte. Bei hochglanzpolierter Oberfläche ist dies, mit Ausnahme von Inspire702 und C705 bei hohem Kontaktdruck, nicht der Fall. Bei DR7023 und C791 steigt der Haftreibwert mit zunehmender Werkzeugtemperatur.

Die niedrigsten Haftreibwerte ($\mu_0 = 0,05$ bis $0,14$) werden mit PP_C791 bei strichpolierter Oberfläche und einer Vorlauftemperatur von 40°C erreicht. Die höchsten Werte ($\mu_0 = 0,45$ bis $0,38$) erzielt PP_DR7023 bei hochglanzpolierter Oberfläche und einer Vorlauftemperatur von 40°C .

Für die verwendeten Ionomere (**TPE**) ließen sich nur wenige brauchbare Ergebnisse erzielen, da diese Materialien mit sehr hoher Klebeneigung zur Reibfläche bereits bei niedrigen Vorlauftemperaturen extrem hohe Haftkräfte mit anschließend hohem Materialabrieb zeigen. Die ermittelten Haftreibwerte bei hoher Temperatur sind höher und fallen bei steigendem Kontaktdruck in stärkerem Maße ab als jene bei niedriger Vorlauftemperatur.

Der untersuchte Polyoxymethylen-Werkstoff (**POM**) ergibt bei allen Versuchseinstellungen mit den DLC-Flex bzw. den VST-DLC beschichteten Formteiloberflächen stets ein Ansteigen der Haftreibwerte bei steigendem Kontaktdruck. Bei hoher Temperaturstufe von 80°C macht sich der Einfluss von Oberflächenrauigkeit und Beschichtungstyp kaum bemerkbar, da alle Haftreibkurven beinahe deckungsgleich verlaufen. Die höchsten Haftreibwerte ($\mu_0 = 0,05$ bis $0,16$) treten bei der DLC-Flex Oberfläche ($R_a = 0,074 \mu\text{m}$) und einer Vorlauftemperatur von 60°C auf. Die niedrigsten Haftreibwerte ($\mu_0 = 0,02$ bis $0,11$) erzielt man bei der DLC-Flex Oberfläche ($R_a = 0,059 \mu\text{m}$) und einer Vorlauftemperatur von 80°C .

6. Literatur

- [1] *Berger, G.R., W. Friesenbichler:* Beitrag zum 2. Internen Symposium, Polymer Competence Center Leoben GmbH, Leoben, 2007.
- [2] *Berger, G.R.:* Literaturstudie zur Messung von Haft- und Entformungskräften bzw. von Reibungskoeffizienten. PCCL-Projekt 3.2 „Reproduzierbare Herstellung von Oberflächenstrukturen und Oberflächenqualitäten an Spritzgießteilen. Polymer Competence Center Leoben GmbH, Leoben, 30.06.2006.
- [3] *Ehrenstein, G.W., G. Riedel, P. Trawiel,:* Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen. 2. Auflage, Hanser Verlag, München, 2003, S. 221 ff.
- [4] *Erhard, G.:* Konstruieren mit Kunststoffen. 3. Auflage, Hanser Verlag, München, 2004, S. 172 - 176.
- [5] *N.N.:* ISO Data Sheet, Release Date 24.7.2008. Iotek 8030. Elektronische Ressource: www.ides.com/prospector, Fa. Exxon Mobil Corporation.
- [6] *N.N.:* ISO Data Sheet, Release Date 21.11.2005. Surlyn 1652. Elektronische Ressource: www.plastics.dupont.com, Fa. DuPont Engineering Polymers, Genf, 2005.
- [7] *N.N.:* ISO Data Sheet, Release Date 1.9.2007. DR7023.00 Developmental Propylene Resin. Elektronische Ressource: www.dowplastics.com, Fa. The Dow Chemical Company, Dow Plastics Europe, Zürich, September 2007.
- [8] *N.N.:* ISO Data Sheet, Release Date January 2007. DOW C705-44NA Polypropylene Resin. Elektronische Ressource: www.dowplastics.com, Fa. The Dow Chemical Company, Dow Plastics Europe, Zürich, January 2007.
- [9] *N.N.:* ISO Data Sheet, Release Date September 2005. DOW C791-30NA Polypropylene Resin. Elektronische Ressource: www.dowplastics.com, Fa. The Dow Chemical Company, Dow Plastics Europe, Zürich, September 2005.
- [10] *N.N.:* ISO Data Sheet, Release Date August 2007. Inspire 702 Performance Polymer. Elektronische Ressource: www.dowplastics.com, Fa. The Dow Chemical Company, Dow Plastics Europe, Zürich, August 2007.

- [11] *N.N.*: ISO Data Sheet, Release Date 24.11.2008. Hostaform C27021 POM unfilled. Elektronische Ressource: www.ticona.com, Fa. Ticona, November 2008.
- [12] *Schöfer, G.*: Entwicklung einer neuen Messapparatur für Haft- und Entformungskräfte beim Spritzgießen. Bakkalaureatsarbeit am Institut für Kunststoffverarbeitung, Montanuniversität Leoben, 2006.
- [13] *Freudenschuß, G.*: Haft- und Entformungskräfte beim Spritzgießen in Abhängigkeit von Stahlwerkstoff, Oberflächenstruktur, Beschichtung und Kunststofftyp. Masterarbeit am Institut für Kunststoffverarbeitung, Montanuniversität Leoben, 2008.
- [14] *Sasaki, T., N. Koga, K. Shirai, Y. Kobayashi, A. Toyoshima*: An experimental study on ejection forces of injection molding. Technical note, Journal of the international societies for precision engineering and nanotechnology 24 (2000) 270-273, March 1999.
- [15] *Jiang, H., R. Browning, J. Fincher, A. Gasbarro, S. Jones, H.-J. Sue*: Influence of surface roughness and contact load on friction coefficient and scratch behavior of thermoplastic olefins. Applied Surface Science 254 (2008) 4494-4499, January 2008.
- [16] *Benabdallah, Habib S.*: Static friction coefficient of some plastics against steel and aluminium under different contact conditions. Tribology International 40 (2007) 64-73, March 2006.
- [17] *Burgsteiner, M.*: Entformungskräfte beim Spritzgießen in Abhängigkeit von Oberflächenrauigkeit, Stahlwerkstoff, Vorzugsrichtung der Oberflächenstruktur, Beschichtung und Kunststofftyp. Masterarbeit am Institut für Kunststoffverarbeitung, Montanuniversität Leoben, 2009.
- [18] *Berger, G.R.*: Autor des Excelmakro "Berechnung2.xls"
- [19] *Chang, W.R., I. Etsion, D.B. Bogy*: Static friction coefficient model for metallic rough surfaces. ASME Trans: J Tribol 1988; 110: 57-63.
- [20] *Ferrero, J.F., J.J. Barreau*: Study of dry friction under small displacements and near-zero sliding velocity. Wear 1997; 209: 322-7.

- [21] *Benabdallah, H., H. Yelle*: Static and quasi-dynamic coefficient of friction of three engineering thermoplastics: UHMWPE, PA 66, POM. *J Mater Sci* 1991; 26: 2445-50.
- [22] *Zhao, Q., F.E. Talke*: Effect of environmental conditions on the stiction behavior of laser textured hard disk media. *Tribol Int* 2000; 33: 281-7.
- [23] *Persson, B.N.J., O. Albohr, F. Mancosu, V. Peveri, V.N. Samoilov, I.M. Sivebaek*: On the nature of the static friction, kinetic friction and creep. *Wear* 2003; 254: 835-51.
- [24] *Bowden, F.W., D. Tabor*: The friction and lubrication of solids, Clarendon press, Oxford, 1954

7. Anhang

7.1. Verwendete Abkürzungen

μ_0	Haftreibwert
A	Formteiffläche
a-C:H	Amorphe wasserstoffhaltige Kohlenstoffschicht
a-C:H:Si	Amorphe wasserstoffhaltige siliziumdotierte Kohlenstoffschicht
A_K	Kontaktfläche zwischen Kunststoff- und Stahl-Probekörper
APS	Anwender-Programmier-System
ASTM	American Society of Testing Materials
BNC	Bayonet Neill Concelman
Cr	Chrom
DLC	Diamond Like Carbon
DMS	Dehnmessstreifen
E/MMA	Ethylene Acrylic Acid Copolymer
F	Reibungskraft
F_E	Entformungskraft
$F_{\max 1,68}$	Haftkraftmaximum bei einem Kontaktdruck von 1,68 N/mm ²
F_N	Normalkraft
F_R	Haftreibungskraft
$F_{R0\max}$	maximale Haftreibungskraft
F_V	Vertikalkraft
F_V	Vertikalkraft
HCCP	High Crystalline Polypropylene Copolymer
IKFF	Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik,
IKV-Aachen	Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, Deutschland
IWpK	Institut für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe,
L/D Verhältnis	Verhältnis von Länge und Durchmesser

MFR	Melt Flow Rate
PA66	Polyamid 66
PCCL	Polymer Competence Center Leoben GmbH
PE	Polyethylen
p_E	Einspritzdruck
p_F, p	Flächenpressung
p_{Hyd}	Hydraulikdruck
p_K	Kontaktdruck
p_N	Nachdruckhöhe
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
p-T-Sensor	Kombinierter Druck- und Temperatur-Sensor
PVD	Physical Vapour Deposition
QVA	Steuerungsmodul für Forminnendruckumschaltung
R_a	Arithmetischer Mittenrauwert
s	Entformungsweg
t_E	Entformungszeit
T_{Form}	Werkzeugtemperatur
TiN	Titannitrid
t_k	Kühlzeit
t_N	Nachdruckzeit
TPE	Thermoplastisches Elastomer
TPO	Thermoplastische Olefine
v	Entformungsgeschwindigkeit
v_E	Einspritzgeschwindigkeit
WC/C	Wolframcarbid/ Kohlenstoffbeschichtung
σ	Standardabweichung

7.2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entformungskraftkurve für Polypropylen in Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit des umspritzten Kerns [14].	3
Abbildung 2: Wirkung von Oberflächenrauigkeit und Kontaktkraft auf den Gleitreibwert [15].	5
Abbildung 3: Kunststoff-Probekörper, Geometrie und Abmessungen [12].	10
Abbildung 4: Stahl-Probekörper: Geometrie und Abmessungen [12].	11
Abbildung 5: Haft- und Entformungskraft-Messapparatur, Schnittbild [1].	13
Abbildung 6: Formhälften der Haft- und Entformungskraft-Messapparatur [13].	14
Abbildung 7: Versuchsablauf, Werkzeugschließvorgang und Abdichten des Werkzeuges [12].	24
Abbildung 8: Versuchsablauf, Spritzen des Kunststoff-Probekörpers und Entformungskraftmessung [12].	25
Abbildung 9: Versuchsablauf, Werkzeugöffnung und Entformung [12].	25
Abbildung 10: Beispielhafter Messzyklus für die Entformungskraftmessung: Entformungskraft und Forminnendruck als Funktion der Zykluszeit [13].	26
Abbildung 11: Horizontalkraft als Funktion der Zykluszeit vor der Nachbearbeitung im Versuch für Pulse A35-110 [13].	28
Abbildung 12: Nachbearbeiteter Horizontalkraftverlauf als Funktion des Messweges im Versuch für Pulse A35-110 [13].	28
Abbildung 13: Grafikausgabe für 5 Messzyklen im Versuch für Pulse A35-110 [13].	30
Abbildung 14: Entformungskraftverläufe für PP INSPIRE™ 702 bei einer Vorlauftemperatur von 15°C und 40°C und einer Vertikalkraft von 11,78 kN ($p_k = 3,37 \text{ N/mm}^2$).	32
Abbildung 15: Entformungskraftverläufe von PP INSPIRE™ 702 bei einer Vorlauftemperatur von 40°C, strichpolierter Oberfläche (Pos.6, $R_a = 0,311 \mu\text{m}$) und 5 verschiedenen Vertikalkräften.	33
Abbildung 16: Entformungskraftverläufe von PP INSPIRE™ 702 bei einer Vorlauftemperatur von 40°C, hochglanzpolierter Oberfläche (Pos.8, $R_a = 0,021 \mu\text{m}$) und 5 verschiedenen Vertikalkräften.	34
Abbildung 17: Unterschiedlich stark abgescherte Kunststoff-Probekörper aus Hostacom PPU X9067HS nach dem Reibversuch mit einem hochglanzpolierten Stahl-Probekörper aus Böhler M333 Isoplast, beschichtet mit Balinit A bei einer Vertikalkraft von 3.927 N (links) bzw. 23.662 N (rechts) [13].	35
Abbildung 18: Temperaturverlauf am Wechseleinsatz Pos.8 während eines gesamten Messzyklus.	36

Abbildung 19: Haftreibungswerte von PP INSPIRE™ 702 über steigendem Kontaktdruck bei 15°C und 40°C Vorlauftemperatur für den strichpolierten (Pos.6) und den hochglanzpolierten (Pos.8) Formeinsatz.....	37
Abbildung 20: Entformungskraftverläufe für PP C705-44NA bei einer Vorlauftemperatur von 15°C und 40°C mit den Formeinsätzen Pos.6, Pos.8, Pos.29 und Pos.32 und einer Vertikalkraft von 11,78 kN ($p_k = 3,37 \text{ N/mm}^2$).....	38
Abbildung 21: Entformungskraftverläufe von PP C705-44NA bei einer Vorlauftemperatur von 40°C mit dem Formeinsatz Pos.6 ($R_a = 0,311 \mu\text{m}$) bei 5 verschiedenen Kontaktdrücken.	40
Abbildung 22: Entformungskraftverlauf von PP C705-44NA bei einer Vorlauftemperatur von 40°C mit dem Formeinsatz Pos.8 ($R_a = 0,021 \mu\text{m}$) bei 5 verschiedenen Kontaktdrücken.	40
Abbildung 23: Entformungskraftverläufe von PP C705-44NA bei einer Vorlauftemperatur von 40°C mit dem Formeinsatz Pos.29 (VST-DLC-Beschichtung, $R_a = 0,056 \mu\text{m}$) bei 5 verschiedenen Kontaktdrücken.	41
Abbildung 24: Entformungskraftverläufe von PP C705-44NA bei einer Vorlauftemperatur von 40°C mit dem Formeinsatz Pos.32 (DLC-Flex-Beschichtung, $R_a = 0,059 \mu\text{m}$) bei 5 verschiedenen Kontaktdrücken.	42
Abbildung 25: Haftreibwerte von PP C705-44NA: Vorlauftemperatur 15°C und 40°C bei strichpolierten (Pos.6), hochglanzpolierten (Pos.8) und VST-DLC (Pos.29) und DLC-Flex (Pos.32) beschichteten Formeinsätzen.....	44
Abbildung 26: Entformungskraftverläufe für PP DR7023 bei einer Vorlauftemperatur von 15°C und 40°C mit den Formeinsätzen Pos.6 und Pos.8 bei einer Vertikalkraft von 11,78 kN ($p_k = 3,37 \text{ N/mm}^2$).....	45
Abbildung 27: Entformungskraftverläufe von PP DR7023 bei einer Vorlauftemperatur von 40°C, dem Formeinsatz Pos.6 ($R_a = 0,311 \mu\text{m}$) und 5 verschiedenen Vertikalkraftstufen.	47
Abbildung 28: Entformungskraftverläufe von PP DR7023 bei einer Vorlauftemperatur von 40°C, dem Formeinsatz Pos.8 ($R_a = 0,021 \mu\text{m}$) und 5 verschiedenen Vertikalkraftstufen.	47
Abbildung 29: Haftreibwerte von PP DR7023 bei 15°C und 40°C Vorlauftemperatur, strichpolierten (Pos.6) und hochglanzpolierten (Pos.8) Formeinsatz.	49
Abbildung 30: Entformungskraftverläufe für PP C791-30NA bei einer Vorlauftemperatur von 15°C und 40°C mit den Formeinsätzen Pos.6 und Pos.8 bei einer Vertikalkraft von 11,78 kN ($p_k = 3,37 \text{ N/mm}^2$).....	50

Abbildung 31: Entformungskraftverläufe von PP C791-30NA bei einer Vorlauftemperatur von 40°C, dem Formeinsatz Pos.6 ($R_a = 0,311 \mu\text{m}$) und 5 verschiedenen Vertikalkraftstufen.	51
Abbildung 32: Entformungskraftverläufe von PP C791-30NA bei einer Vorlauftemperatur von 40°C, dem Formeinsatz Pos.8 ($R_a = 0,021 \mu\text{m}$) und 5 verschiedenen Vertikalkraftstufen.	52
Abbildung 33: Haftreibwerte von PP C791-30NA bei 15°C und 40°C Vorlauftemperatur, strichpolierten (Pos.6) und hochglanzpolierten (Pos.8) Formeinsätzen.	53
Abbildung 34: Entformungskraft für die Polypropylentypen C705-44NA, DR7023, Inspire702 und C791-30NA bei einer Vertikalkraft von 11,78 kN, einer Vorlauftemperatur von 15°C und strichpolierter Stahl-Probekörper-Oberfläche (Pos.6, $R_a = 0,311 \mu\text{m}$).	55
Abbildung 35: Entformungskraft für die Polypropylentypen C705-44NA, DR7023, Inspire702 und C791-30NA bei einer Vertikalkraft von 11,78 kN, einer Vorlauftemperatur von 40°C und strichpolierter Stahl-Probekörper-Oberfläche (Pos.6, $R_a = 0,311 \mu\text{m}$).	55
Abbildung 36: Entformungskraft für die Polypropylentypen C705-44NA, DR7023, Inspire702 und C791-30NA bei einer Vertikalkraft von 11,78 kN, einer Vorlauftemperatur von 15°C und hochglanzpolierter Stahl-Probekörper-Oberfläche (Pos.8, $R_a = 0,021 \mu\text{m}$).	56
Abbildung 37: Entformungskraft für die Polypropylentypen C705-44NA, DR7023, Inspire702 und C791-30NA bei einer Vertikalkraft von 11,78 kN, einer Vorlauftemperatur von 40°C und hochglanzpolierter Stahl-Probekörper-Oberfläche (Pos.8, $R_a = 0,021 \mu\text{m}$).	56
Abbildung 38: Haftreibwert für die Polypropylen-Typen C705-44NA, DR7023, Inspire702 und C791-30NA bei einer Vorlauftemperatur von 15°C und strichpolierter Stahl-Probekörper-Oberfläche (Pos.6, $R_a = 0,311 \mu\text{m}$).	59
Abbildung 39: Haftreibwert für die Polypropylen-Typen C705-44NA, DR7023, Inspire702 und C791-30NA bei einer Vorlauftemperatur von 40°C und strichpolierter Stahl-Probekörper-Oberfläche (Pos.6, $R_a = 0,311 \mu\text{m}$).	60
Abbildung 40: Haftreibwert für die Polypropylen-Typen C705-44NA, DR7023, Inspire702 und C791-30NA bei einer Vorlauftemperatur von 15°C und hochglanzpolierter Stahl-Probekörper-Oberfläche (Pos.8, $R_a = 0,021 \mu\text{m}$).	60
Abbildung 41: Haftreibwert für die Polypropylen-Typen C705-44NA, DR7023, Inspire702 und C791-30NA bei einer Vorlauftemperatur von 40°C und hochglanzpolierter Stahl-Probekörper-Oberfläche (Pos.8, $R_a = 0,021 \mu\text{m}$).	61
Abbildung 42: Entformungskraftverläufe für POM C27021 bei einer Vorlauftemperatur von 60°C mit den Formeinsätzen Pos.29, Pos.30, Pos.32 und Pos.34 bei einer Vertikalkraft 13,74 kN ($p_k = 3,93 \text{ N/mm}^2$).	63

Abbildung 43: Entformungskraftverläufe für POM C27021 bei einer Vorlauftemperatur von 80°C mit den Formeinsätzen Pos.29, Pos.30, Pos.32 und Pos.34 bei einer Vertikalkraft 13,74 kN ($p_k = 3,93 \text{ N/mm}^2$).....	63
Abbildung 44: Entformungskraftverläufe für POM C27021 bei einer Vorlauftemperatur von 60°C bei DLC-Flex-beschichtetem Formeinsatz Pos.30 ($R_a = 0,074 \mu\text{m}$) und 5 verschiedenen Vertikalkraftstufen.....	65
Abbildung 45: Haftreibungswert μ_0 von POM C27021 über steigendem Kontaktdruck bei 60°C Vorlauftemperatur für die VST-DLC (Pos.29, Pos.34) und die DLC-Flex (Pos.32, Pos.30) beschichteten Formeinsätze.....	66
Abbildung 46: Haftreibungswert μ_0 von POM C27021 über steigendem Kontaktdruck bei 80°C Vorlauftemperatur für die VST-DLC (Pos.29, Pos.34) und die DLC-Flex (Pos.32) beschichteten Formeinsätze.....	66
Abbildung 47: Haftreibungswert μ_0 von POM C27021 über steigendem Kontaktdruck bei einer Vorlauftemperatur von 60°C und 80°C und DLC-VST (Pos.29) und DLC-Flex (Pos.32) beschichteten Formeinsätzen.....	68
Abbildung 48: Maximaler Reibungskoeffizient μ_{max} von POM C27021 über steigendem Kontaktdruck bei 60°C Vorlauftemperatur für die DLC-VST (Pos.29, Pos.34) und die DLC-Flex (Pos.32, Pos.30) beschichteten Formeinsätze.....	69
Abbildung 49: Maximaler Reibungskoeffizient μ_{max} von POM C27021 über steigendem Kontaktdruck bei einer Vorlauftemperatur von 80°C für die DLC-VST (Pos.29, Pos.34) und die DLC-Flex (Pos.32) beschichteten Formeinsätze.....	70
Abbildung 50: Maximaler Reibungskoeffizient μ_{max} von POM C27021 über steigendem Kontaktdruck bei 60°C und 80°C Vorlauftemperatur für die DLC-VST (Pos.29) und die DLC-Flex (Pos.32) beschichteten Formeinsätze.....	71
Abbildung 51: Entformungskraftverlauf von Surlyn 1652 bei einer Vorlauftemperatur von 15°C und 40°C bei strichpolierter und hochglanzpolierter Oberfläche bei einem Kontaktdruck von etwa 2,5 N/mm ²	73
Abbildung 52: Entformungskraftverlauf von Surlyn 1652 bei einer Vorlauftemperatur von 15°C bei strichpolierter Oberfläche (Pos.6, $R_a = 0,311 \mu\text{m}$) und bei 3 verschiedenen Kontaktdrücken.....	74
Abbildung 53: Entformungskraftverlauf von Surlyn 1652 bei einer Vorlauftemperatur von 15°C bei hochglanzpolierter Oberfläche (Pos.8, $R_a = 0,021 \mu\text{m}$) und bei 3 verschiedenen Kontaktdrücken.....	74
Abbildung 54: Haftreibungswerte von Surlyn 1652 bei einer Vorlauftemperatur von 15°C und 40°C bei strichpolierter und hochglanzpolierter Oberfläche und steigendem Kontaktdruck.....	76

Abbildung 55: Entformungskraftverlauf von Iotek 8030 bei einer Vorlauftemperatur von 40°C mit dem hochglanzpolierten Formeinsatz (Pos.8, $R_a = 0,021 \mu\text{m}$) bei einem Kontaktdruck von 1,40 N/mm ² für 3 Messversuche.	77
Abbildung 56: Entformungskraftverlauf von Iotek 8030 bei einer Vorlauftemperatur von 40°C mit dem strichpolierten Formeinsatz (Pos.6, $R_a = 0,311 \mu\text{m}$) bei 4 verschiedenen Kontaktdruckstufen.....	78
Abbildung 57: Entformungskraftverlauf von Iotek 8030 bei einer Vorlauftemperatur von 40°C bei strichpolierter und hochglanzpolierter Oberfläche und einem Kontaktdruckdruck von 1,40 N/mm ²	79
Abbildung 58: Haftreibwert in Abhängigkeit vom Kontaktdruck bei einer Vorlauftemperatur von 40°C und dem strichpolierten Formeinsatz (Pos.6, $R_a = 0,311 \mu\text{m}$).....	80

7.3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Technische Daten der Spritzgießmaschine Battenfeld 1000/200 CDK-SE.....	9
Tabelle 2:	Materialeigenschaften der verwendeten Kunststoffe [5] – [11]......	19
Tabelle 3:	Auflistung der verwendeten Stahl-Probekörper.....	20
Tabelle 4:	Versuchsplan.....	21
Tabelle 5:	Empfohlene Werkzeugtemperaturbereiche und Vorlaufemperatur-Planstufen [5] – [11], sowie deren Ist-Mittelwerte am Wechseleinsatz.	22
Tabelle 6:	Hydraulikdruckstufen, Vertikalkräfte und Kontaktdrücke.	22
Tabelle 7:	Effekt von Rauigkeit und Beschichtung auf die Entformungskraft ...	82
Tabelle 8:	Werte für Haftreibwert μ_0 , Kontaktdruck p_k und Standardabweichung σ von PP INSPIRE™ 702 bei verschiedenen Oberflächenstrukturen und Vorlaufemperaturen.	95
Tabelle 9:	Werte für Haftreibwert μ_0 , Kontaktdruck p_k und Standardabweichung σ von DOW™ C705-44NA bei verschiedenen Oberflächenstrukturen und Vorlaufemperaturen.	95
Tabelle 10:	Werte für Haftreibwert μ_0 , Kontaktdruck p_k und Standardabweichung σ von PP DR7023 bei verschiedenen Oberflächenstrukturen und Vorlaufemperaturen.	96
Tabelle 11:	Werte für Haftreibwert μ_0 , Kontaktdruck p_k und Standardabweichung σ für von PP C791–30NA bei verschiedenen Oberflächenstrukturen und Vorlaufemperaturen.	97
Tabelle 12:	Haftreibwert μ_0 , Standardabweichung σ und Kontaktdruck p_k von POM C27021 bei den verschiedenen DLC beschichteten Werkzeugoberflächen und den Vorlaufemperaturen 60°C und 80°C.	98
Tabelle 13:	Haftreibwert μ_0 , Standardabweichung σ und Kontaktdruck p_k von Surlyn ^R 1652 bei strichpolierter und hochglanzpolierter Oberfläche und einer Vorlaufemperaturen von 15°C und 40°C.	99
Tabelle 14:	Haftreibwert μ_0 , Standardabweichung σ und Kontaktdruck p_k von lotek 8030 bei strichpolierter Oberfläche und einer Vorlaufemperatur von 40°C.....	99

7.4. Wertetabellen aller Berechnungen zum Haftreibwert

Tabelle 8: Werte für Haftreibwert μ_0 , Kontaktdruck p_K und Standardabweichung σ von PP INSPIRE™ 702 bei verschiedenen Oberflächenstrukturen und Vorlauftemperaturen.

Vorlauftemperatur 15°C			Vorlauftemperatur 40°C		
Kontaktdruck p_K , N/mm ²	Haftreibwert μ_0	σ	Kontaktdruck p_K , N/mm ²	Haftreibwert μ_0	σ
Haftreibwerte für die strichpolierte Oberfläche (Pos 6.)					
1,45	0,147	0,011	1,45	0,061	0,012
3,36	0,191	0,009	2,52	0,126	0,011
3,94	0,189	0,008	3,38	0,160	0,005
4,52	0,197	0,010	3,91	0,133	0,007
5,03	0,200	0,007	4,50	0,137	0,013
5,61	0,209	0,008	5,04	0,137	0,005
			5,62	0,149	0,012
Haftreibwerte für die hochglanzpolierte Oberfläche (Pos 8.)					
1,40	0,202	0,013	1,46	0,286	0,018
2,55	0,285	0,010	2,55	0,322	0,011
3,42	0,340	0,009	3,42	0,266	0,007
3,95	0,334	0,009	3,91	0,245	0,012
4,54	0,327	0,008	4,47	0,234	0,007
5,05	0,321	0,010	5,04	0,209	0,007
5,62	0,319	0,008	5,62	0,192	0,010

Tabelle 9: Werte für Haftreibwert μ_0 , Kontaktdruck p_K und Standardabweichung σ von DOW™ C705-44NA bei verschiedenen Oberflächenstrukturen und Vorlauftemperaturen.

Vorlauftemperatur 15°C			Vorlauftemperatur 40°C		
Kontaktdruck p_K , N/mm ²	Haftreibwert μ_0	σ	Kontaktdruck p_K , N/mm ²	Haftreibwert μ_0	σ
Haftreibwerte bei strichpolierter Oberfläche (Pos 6.)					
1,47	0,289	0,015	1,47	0,091	0,013
2,54	0,239	0,018	2,52	0,177	0,015
3,39	0,260	0,011	3,38	0,207	0,009
3,93	0,266	0,010	3,91	0,211	0,009
4,52	0,289	0,013	4,50	0,202	0,007
5,05	0,292	0,012	5,04	0,219	0,005
5,64	0,291	0,009	5,63	0,216	0,007

Fortsetzung Tabelle 9:

Haftreibwerte bei hochglanzpolierter Oberfläche (Pos 8.)					
1,43	0,275	0,030	1,45	0,295	0,028
2,56	0,344	0,013	2,53	0,395	0,008
3,43	0,376	0,009	3,39	0,342	0,008
3,98	0,367	0,008	3,96	0,342	0,017
4,53	0,367	0,009	4,51	0,307	0,007
5,10	0,357	0,009	5,07	0,279	0,054
5,64	0,357	0,009	5,60	0,280	0,009
Haftreibwerte bei VST-DLC beschichteter Oberfläche (Pos.29)					
			1,45	0,050	0,005
			2,52	0,098	0,011
			3,35	0,144	0,007
			3,93	0,152	0,006
			4,46	0,150	0,005
			5,04	0,159	0,004
			5,62	0,158	0,005
Haftreibwerte bei DLC-Flex beschichteter Oberfläche (Pos.32)					
			1,40	0,064	0,008
			2,55	0,132	0,006
			3,39	0,129	0,007
			3,91	0,137	0,004
			4,48	0,146	0,005
			5,05	0,152	0,005
			5,63	0,158	0,004

Tabelle 10: Werte für Haftreibwert μ_0 , Kontaktdruck p_K und Standardabweichung σ von PP DR7023 bei verschiedenen Oberflächenstrukturen und Vorlauftemperaturen.

Vorlauftemperatur 15°C			Vorlauftemperatur 40°C		
Kontaktdruck p_K , N/mm ²	Haftreibwert μ_0	σ	Kontaktdruck p_K , N/mm ²	Haftreibwert μ_0	σ
Haftreibwerte bei strichpolierter Oberfläche (Pos 6.)					
1,41	0,191	0,009	1,52	0,047	0,006
2,56	0,329	0,009	2,52	0,113	0,010
3,40	0,289	0,019	3,36	0,198	0,009
3,98	0,287	0,004	3,92	0,161	0,006
4,51	0,287	0,007	4,49	0,216	0,007

Fortsetzung Tabelle 10:

5,09	0,288	0,005	5,06	0,172	0,008
5,63	0,290	0,005	5,59	0,179	0,007
Haftreibwerte bei hochglanzpolierter Oberfläche (Pos 8.)					
1,41	0,249	0,011	1,43	0,454	0,015
2,54	0,342	0,010	2,56	0,497	0,007
3,42	0,367	0,018	3,38	0,446	0,012
3,95	0,343	0,007	3,92	0,425	0,008
4,49	0,325	0,003	4,49	0,380	0,011
5,10	0,321	0,010	5,07	0,399	0,012
5,64	0,324	0,002	5,62	0,379	0,003

Tabelle 11: Werte für Haftreibwert μ_0 , Kontaktdruck p_K und Standardabweichung σ für von PP C791–30NA bei verschiedenen Oberflächenstrukturen und Vorlauftemperaturen.

Vorlauftemperatur 15°C			Vorlauftemperatur 40°C		
Kontaktdruck p_K , N/mm ²	Haftreibwert μ_0	σ	Kontaktdruck p_K , N/mm ²	Haftreibwert μ_0	σ
Haftreibwerte bei strichpolierter Oberfläche (Pos 6.)					
1,39	0,108	0,011	1,42	0,051	0,009
2,53	0,162	0,009	2,53	0,108	0,012
3,38	0,180	0,006	3,35	0,121	0,008
3,93	0,185	0,006	3,92	0,128	0,007
4,48	0,188	0,006	4,50	0,131	0,007
5,03	0,195	0,007	5,02	0,135	0,005
5,60	0,211	0,012	5,60	0,140	0,005
Haftreibwerte bei hochglanzpolierter Oberfläche (Pos 8.)					
1,39	0,200	0,019	1,48	0,407	0,008
2,56	0,256	0,011	2,57	0,380	0,013
3,43	0,293	0,010	3,41	0,344	0,008
3,98	0,309	0,014	3,92	0,332	0,009
4,49	0,307	0,008	4,49	0,316	0,006
5,08	0,305	0,007	5,05	0,288	0,006
5,62	0,305	0,008	5,62	0,273	0,010

Tabelle 12: Haftreibungwert μ_0 , Standardabweichung σ und Kontaktdruck p_k von POM C27021 bei den verschiedenen DLC beschichteten Werkzeugoberflächen und den Vorlauftemperaturen 60°C und 80°C.

Vorlauftemperatur 60°C			Vorlauftemperatur 80°C		
Kontaktdruck p_k , N/mm ²	Haftreibungwert μ_H	σ	Kontaktdruck p_k , N/mm ²	Haftreibungwert μ_H	σ
Haftreibungswerte bei DLC-VST Oberfläche (Pos.29, $R_a = 0,056 \mu\text{m}$)					
1,35	0,028	0,004	1,23	0,017	0,006
2,57	0,082	0,011	2,51	0,055	0,013
3,34	0,104	0,007	3,36	0,083	0,007
3,94	0,122	0,007	3,95	0,101	0,009
4,46	0,132	0,004	4,48	0,104	0,008
5,04	0,153	0,005	5,02	0,106	0,005
5,59	0,163	0,005	5,58	0,112	0,006
Haftreibungswerte bei DLC-VST Oberfläche (Pos.34, $R_a = 0,039 \mu\text{m}$)					
1,32	0,032	0,006	1,38	0,020	0,007
2,52	0,060	0,010	2,54	0,058	0,011
3,33	0,086	0,006	3,37	0,072	0,008
3,91	0,100	0,006	3,94	0,092	0,004
4,44	0,104	0,004	4,47	0,102	0,007
5,08	0,133	0,006	5,04	0,106	0,005
5,57	0,133	0,005	5,61	0,112	0,003
Haftreibungswerte bei DLC-Flex Oberfläche (Pos.30, $R_a = 0,074 \mu\text{m}$)					
1,34	0,045	0,008			
2,53	0,095	0,009			
3,37	0,130	0,008			
3,94	0,142	0,006			
4,48	0,156	0,007			
5,05	0,160	0,005			
5,58	0,162	0,003			
Haftreibungswerte bei DLC-Flex Oberfläche (Pos.32, $R_a = 0,059 \mu\text{m}$)					
1,31	0,031	0,002	1,36	0,015	0,002
2,53	0,054	0,006	2,52	0,054	0,008
3,34	0,075	0,003	3,37	0,083	0,005
3,90	0,087	0,003	3,90	0,099	0,006
4,47	0,102	0,004	4,49	0,105	0,006
5,06	0,123	0,005	5,02	0,107	0,004
5,60	0,139	0,003	5,60	0,109	0,003

Tabelle 13: Haftreibungwert μ_0 , Standardabweichung σ und Kontaktdruck p_k von Surlyn^R1652 bei strichpolierter und hochglanzpolierter Oberfläche und einer Vorlauftemperaturen von 15°C und 40°C.

Vorlauftemperatur 15°C			Vorlauftemperatur 40°C		
Kontaktdruck p_k , N/mm ²	Haftreibungwert μ_0	σ	Kontaktdruck p_k , N/mm ²	Haftreibungwert μ_0	σ
Haftreibungwerte bei strichpolierter Oberfläche (Pos.6)					
1,48	0,895	0,029	1,72	1,275	0,027
1,86	0,916	0,016	2,70	0,735	0,048
2,41	0,903	0,012			
2,70	0,870	0,016			
3,56	0,807	0,003			
Haftreibungwerte bei hochglanzpolierter Oberfläche (Pos.8)					
1,64	1,170	0,026	1,65	1,836	0,020
1,93	1,135	0,009	2,47	1,364	0,014
2,47	1,037	0,004			
2,77	0,982	0,004			
3,63	0,886	0,008			

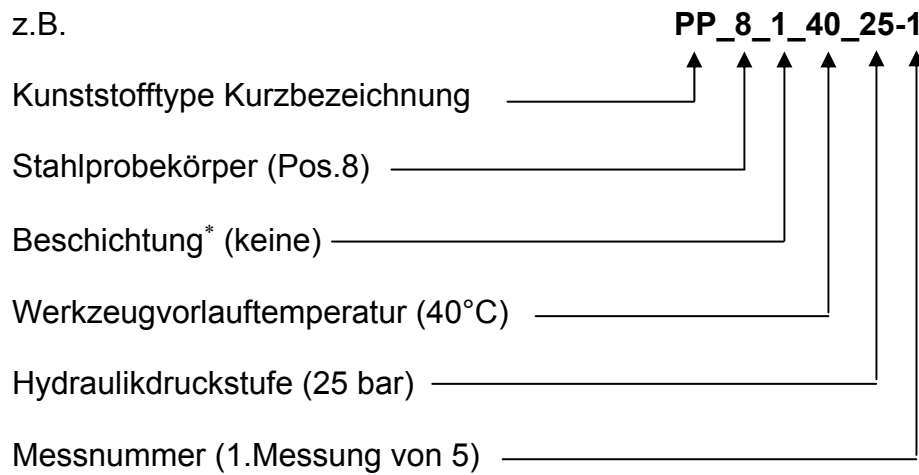
Tabelle 14: Haftreibungwert μ_0 , Standardabweichung σ und Kontaktdruck p_k von Iotek 8030 bei strichpolierter Oberfläche und einer Vorlauftemperatur von 40°C.

Haftreibungwerte bei strichpolierter Oberfläche (Pos.6)		
Vorlauftemperatur 40°C		
Kontaktdruck p_k , N/mm ²	Haftreibungwert μ_H	σ
1,52	1,985	0,161
1,77	2,407	0,157
2,39	1,785	0,022
2,74	1,474	0,058

7.5. Codierung der Probekörper

Die während der Reibversuche hergestellten Probekörper wurden am Fächerverteiler, wo auch der Stangenanguss ansetzt, mit folgender Codierung für eine exakte Zuordnung beschriftet:

z.B.



* Die Codierungszahl für den Beschichtungstyp steht in Tabelle 3 (Spalte 3, Seite 20).