



Masterarbeit

Untersuchungen zur Vorhersagbarkeit der Reibung zwischen  
Polymeren und beschichteten sowie unbeschichteten  
Werkzeugoberflächen durch Benetzungsparameter

verfasst von

Ing. Clemens Steffel, BSc

Matr. Nr.: 0835079

eingereicht am

Lehrstuhl für Spritzgießen von Kunststoffen



Vorstand: Univ.-Prof. Dr. Walter Friesenbichler

Betreuer:

Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gerald Berger

Leoben, Oktober 2014

---

Diese Arbeit wurde im Rahmen des PCCL-Projektes IV-4.04 „Reduction of friction“ zusammen mit den Projektpartnern Lehrstuhl für Spritzgießen von Kunststoffen an der Montanuniversität Leoben, Oerlikon Balzers AG und Böhler Edelstahl GmbH & Co. KG durchgeführt. Die Abwicklung des Projektes IV-4.04 erfolgte im Rahmen des Kompetenzzentren-Programms COMET des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie unter Beteiligung der Montanuniversität Leoben und wurde mit Mitteln des Bundes und der Länder Steiermark und Oberösterreich gefördert.

**Eidesstattliche Erklärung:**

Ich erkläre an Eides Statt, dass die vorliegende Arbeit von mir selbstständig und nur unter Verwendung der angeführten Literatur erstellt wurde.

**Affidavit:**

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

---

Leoben, Datum

---

STEFFEL Clemens

---

## **Danksagung**

Mein Dank gilt meinem Betreuer Ass. Prof. DI Dr. mont. Gerald R Berger für die Möglichkeit diese Arbeit zu schreiben und für sein Vertrauen in meine Person. Er war stets mit fachkundigem Rat zur Stelle und ermöglichte dadurch ein angenehmes Arbeitsklima zur Durchführung dieser Arbeit.

Einen besonderen Dank möchte ich auch an DI Gernot Pacher vom Polymer Competence Center Leoben richten, der mich bei den praktischen Untersuchungen stets unterstützte.

Für die Korrektur und Beurteilung möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. DI Dr. mont. Walter Friesenbichler und Herrn Ass. Prof. DI Dr. mont. Gerald R Berger bedanken.

Zu guter Letzt gilt mein besonderer Dank meiner Familie, die mich während des gesamten Studiums unterstützte.

---

## Kurzfassung

In dieser Arbeit wurde untersucht, ob sich eine qualitative Vorhersage für Entformungskräfte im Spritzgießprozess durch Bestimmung von Benetzungsparametern der beteiligten Werkstoffe erstellen lässt. Das Benetzungsverhalten wurde für PA6, PC sowie für typische Werkzeugstähle und Werkzeugbeschichtungen mit den Testflüssigkeiten Ethylencarbonat und Bromonaphthalin in einem Temperaturbereich von 40°C bis 200°C untersucht.

Über die nach OWRK-Methode bestimmten polaren und dispersen Anteile der Oberflächenenergien wurde die Grenzflächenspannung der jeweiligen Kombination aus Kunststoff und (beschichteter) Stahloberfläche errechnet. Ein inverser Zusammenhang zwischen auftretender Reibung beim Entformungsvorgang und berechneter Grenzflächenspannung  $\gamma_{12}$  bei Entformungskontakttemperatur  $\vartheta$  wurde erwartet.

Bei einer Kontakttemperatur von 90°C weist MoN in Kombination mit PA6, wie durch den niedrigsten Wert von  $\gamma_{12}$ , vorausgesagt, die größte Reibung auf, gefolgt vom Stahl M268 VMR, CrN sowie CrC/a-C:H mit der niedrigsten Reibung. Die Stähle M333 IP und M268 verhielten sich durch die abweichende Rauigkeit nicht erwartungsgemäß. Bei PC weist CrC/a-C:H wie erwartet den niedrigsten Reibwert auf, gefolgt von CrN und den Stählen M268 VMR und M333 IP. MoN hingegen verhält sich mit dem zweitniedrigsten Reibwert gänzlich unerwartet. Ebenso zeigt M303 eine geringere Reibung als vorhergesagt.

Somit eignet sich zwar die Benetzungskenngröße Grenzflächenspannung zur qualitativen Vorhersage des Reibungsverhaltens für einige Kombinationen von Polymer und (beschichteter) Stahloberfläche, jedoch nicht ausreichend um zukünftige Stahl- und Beschichtungsentwicklung gänzlich ohne Reibwertversuche durchzuführen. Ein Grund hierfür ist, dass sich ein Rauigkeitsunterschied in der errechneten Grenzflächenspannung kaum, in den Reibwerten aber deutlich niederschlagen kann.

---

## Abstract

The aim of this thesis was to qualitatively predict demolding forces in the injection molding process by determining wetting parameters of the materials involved. By using test liquids Ethylene Carbonate and Bromonaphtaline the wetting behaviour was studied for PA6, PC and typical tool steels and tool coatings in a temperature range from 40°C to 200°C.

The polar and the disperse fractions of the surface energies, and the interfacial tension  $\gamma_{12}$  of each combination of polymer and (coated) steel surface was calculated by using OWRK method. An inverse relationship between friction while demolding and calculated interfacial tension  $\gamma_{12}$  was expected.

At a contact temperature of 90°C MoN and PA6 as mating partners show the greatest friction, which was predicted by the lowest interfacial tension  $\gamma_{12}$ . Steel grade M268, CrN and CrC/a-C:H succeed, the latter with the lowest friction to PA6. The M333 IP and M268 VMR steels do not behave as expected due to significant higher roughness.

As predicted, CrC/a-C:H and PC as mating partners show the lowest static coefficient of friction  $\mu_0$ , followed by CrN, M268 VMR and M333 IP, respectively. The second lowest  $\mu_0$  of MoN is unexpected. Moreover, friction of PC on M303 is much lower than anticipated.

Thus, the wetting parameter interfacial tension  $\gamma_{12}$  qualitatively predicts the friction behaviour of some combinations of polymer and (coated) steel surface very well. Nevertheless, this is not sufficient to develop future steels and coatings without friction tests. One reason for this is, that small roughness differences on mirror-finished mold surfaces do not affect the calculated interfacial tension, but they have a strong effect on coefficients of friction.

# Inhaltsverzeichnis

<b>KURZFASSUNG .....</b>	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>V</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>	<b>VI</b>
<b>1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2 GRUNDLAGEN .....</b>	<b>3</b>
2.1 Topographie .....	3
2.1.1 Rasterkraftmikroskopie (AFM).....	3
2.1.2 Konfokale Weißlichtmikroskopie.....	4
2.2 Oberflächenenergie .....	5
2.2.1 Oberflächenenergiemessung an Festkörperoberflächen (sessile drop) .....	6
2.2.2 Bekannte Werte von Oberflächenenergien.....	13
2.3 Kenngrößen von Oberflächen.....	14
2.3.1 Grenzflächenspannung $\gamma_{sl}$ , $\gamma_{12}$ .....	14
2.3.2 Arithmetischer Mittenrauwert $R_a$ , $S_a$ .....	15
2.3.3 Quadratischer Mittenrauwert $R_q$ , $RMS$ , $S_q$ .....	16
<b>3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG .....</b>	<b>17</b>
3.1 Verwendete Materialien .....	17
3.1.1 Stähle und Beschichtungen .....	17
3.1.2 Polymere.....	19
3.2 Probenreinigung.....	19
3.3 Verwendete Geräte .....	20
3.3.1 Rasterkraftmikroskop (AFM) .....	20
3.3.2 Konfokal-Mikroskop (FRT) .....	21
3.3.3 Kontaktwinkelmessgerät und Testflüssigkeiten .....	22
3.3.4 Spritzgießmaschine .....	26

3.4	Versuchsplan und Auswertung .....	31
<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE UND INTERPRETATION .....</b>	<b>36</b>
4.1	Oberflächenrauigkeiten .....	36
4.2	Ebenheit – FRT Messungen.....	43
4.3	Benetzungseigenschaften der Polymere.....	46
4.3.1	Polycarbonat Makrolon 2407 .....	47
4.3.2	Polyamid Durethan B30S.....	49
4.4	Oberflächenenergien der metallischen (beschichteten) Oberflächen ..	51
4.5	Grenzflächenspannungen .....	58
4.6	Reibwertuntersuchungen an der Spritzgießmaschine .....	60
4.7	Korrelation von Reibwerten und Benetzungsverhalten .....	62
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>64</b>
<b>6</b>	<b>LITERATURANGABE.....</b>	<b>68</b>
<b>7</b>	<b>ANHANG.....</b>	<b>71</b>
7.1	Materialdatenblatt Makrolon 2407 [2].....	71
7.2	Materialdatenblatt Durethan B30S [22].....	75
7.3	Zeitabhängige Kontaktwinkelmessung .....	78
7.4	Thermische Simulation mittels CAE Abaqus.....	79
7.5	Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen.....	81
7.6	Einfluss der wahren Oberfläche nach Wenzel auf die Grenzflächenspannung .....	83
7.7	Allgemeiner Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Grenzflächenspannung .....	88
7.8	Abbildungsverzeichnis .....	90
7.9	Tabellenverzeichnis .....	96

7.10 Verwendete Abkürzungen .....98



## 1 Einleitung und Zielsetzung

In der heutigen Kunststoffindustrie bestimmt größtenteils die Wirtschaftlichkeit den Markt. Daher wird eine möglichst kurze Zykluszeit bei der Produktion von Kunststoffbauteilen angestrebt.

Kunststoffbauteile werden heute vorzugsweise im Spritzgießverfahren hergestellt, wodurch hohe Stückzahlen in relativ kurzen Zeiten produziert werden können. Das Spritzgießen bezeichnet ein Formgebungsverfahren, bei dem eine durch eine Schnecke plastifizierte heiße Kunststoffschmelze in eine temperierte Form, auch Kavität genannt, unter hohem Druck eingespritzt wird. Während dieses Abformungsvorgangs wird ein Großteil der Qualität des Bauteils durch diverse Maschinen- und Prozessparameter bestimmt. Ebenso trägt die Entformung des Bauteils nach Abkühlung bei. Die Entformungskräfte werden bei der Bauteil- und Werkzeugauslegung oft vernachlässigt, obwohl sie einen wichtigen Teil zur Bauteilqualität sowie zur Reduktion der Zykluszeit beitragen können, beispielsweise bei Kernwerkzeugen oder Bauteilen mit „Hot Spots“. Bei zu hohen Entformungskräften kann es zur Deformation oder Beschädigung der Formteile kommen. Entformungskräfte hängen von der Adhäsion und der Reibung zwischen Polymer und Werkzeugoberfläche ab und können durch die richtige Wahl der Polymer/Werkzeugoberflächen-Kombination reduziert werden.

In früheren Arbeiten [24, 8] wurden bereits verschiedene Kombinationen aus Polymeren und Werkstoffoberflächen untersucht und es konnten Zusammenhänge zwischen diversen Kombinationen gefunden werden. Beispielsweise erläutert Lugger [24], dass zwei Festkörper umso leichter trennbar sind je unterschiedlicher die Polarität derer Oberflächenenergien ist und Burgsteiner [8] zeigte, dass CrN beschichtete Oberflächen verglichen mit unbeschichteten Oberflächen eine deutliche Reduktion der Reibungskoeffizienten bewirken.

Ziel dieser Arbeit ist es, einfache Methoden zu entwickeln, die das Reibverhalten zwischen Kunststoffbauteil und (beschichteter) Stahl-Werkzeugoberfläche vorhersagen. Der Spritzgießvorgang beginnt mit der Benetzung der

Werkzeugoberfläche durch schmelzflüssigen Kunststoff während des Einspritzvorganges und endet mit der Entnetzung beim Entformungsvorgang.

Ließe sich der Entformungsvorgang mittels Benetzungskenngrößen beschreiben, so könnte die Grenzflächenspannung  $\gamma_{sl}$  als ein inverses Maß für den Trennungsaufwand dieser beiden Reibpartner verwendet werden. Dadurch könnte eine Vorhersage des Reibverhaltens zwischen Kunststoff- und Werkzeugoberfläche ohne aufwendige Reibversuche getroffen werden [6]. Diese Hypothese soll in dieser Arbeit untersucht und durch praxisnahe Reibversuche überprüft werden.

## 2 Grundlagen

Um die Eigenschaften der zu untersuchenden Oberflächen bestimmen zu können, ist es notwendig, Grundkenntnisse über Rauigkeit sowie Oberflächenenergie zu besitzen. In den folgenden Kapiteln wird auf die verschiedenen Messgeräte und die damit ermittelbaren Ergebnisse eingegangen.

### 2.1 Topographie

Die Topographie ist die quantitativ räumliche Wiedergabe einer Oberfläche, welche durch Bestimmung der Oberflächenkontur entlang der drei Raumkoordinaten ermittelt wird. Die Topographiemessung wurde an den zu untersuchenden Stahloberflächen durchgeführt, um festzustellen, ob die Ergebnisse aus den Reibwertuntersuchungen vergleichbar sind, da unterschiedliche Oberflächenrauigkeiten auch unterschiedliche Entformungskräfte, unabhängig vom chemischen Zustand der Reibpartner, verursachen. Es gibt eine Vielzahl an Möglichkeiten, die Topographie einer Oberfläche zu messen. Aufgrund der sehr guten lateralen Auflösung wurde das Rasterkraftmikroskop, auch AFM (atomic force microscopy) genannt, gewählt.

#### 2.1.1 Rasterkraftmikroskopie (AFM)

Die Darstellung mittels AFM funktioniert auf der Basis des Abrasterns der Oberfläche mit einer kleinen Spitze, welche an einem Biegebalken befestigt ist. Mittels Lichtzeigermethode werden kleinste Abweichungen des Biegebalkens von einer positionsempfindlichen Diode registriert und daraus Höheninformationen ermittelt (siehe Abbildung 1 links). Im Gegensatz zum zuvor entwickelten Rastertunnelmikroskop, welches nur an elektrisch leitenden bzw. halbleitenden Oberflächen funktioniert, ist es möglich, das Rasterkraftmikroskop auch auf isolierenden Oberflächen anzuwenden. Der große Vorteil des Rasterkraftmikroskops liegt in der vertikalen und lateralen Auflösung, welche im sub-Nanobereich möglich ist. Dabei sind der Spitzenradius und der halbe Öffnungswinkel der Spitze die größten Einflussfaktoren auf die laterale Auflösung (siehe Abbildung 1 rechts). Die Nachteile

sind geringe Höhenbereiche ( $< 20 \mu\text{m}$ ), kleine maximale Messfeldgröße ( $< 90 \mu\text{m} \times 90 \mu\text{m}$ ) und relativ lange Messdauer von mehr als einer Stunde [27].

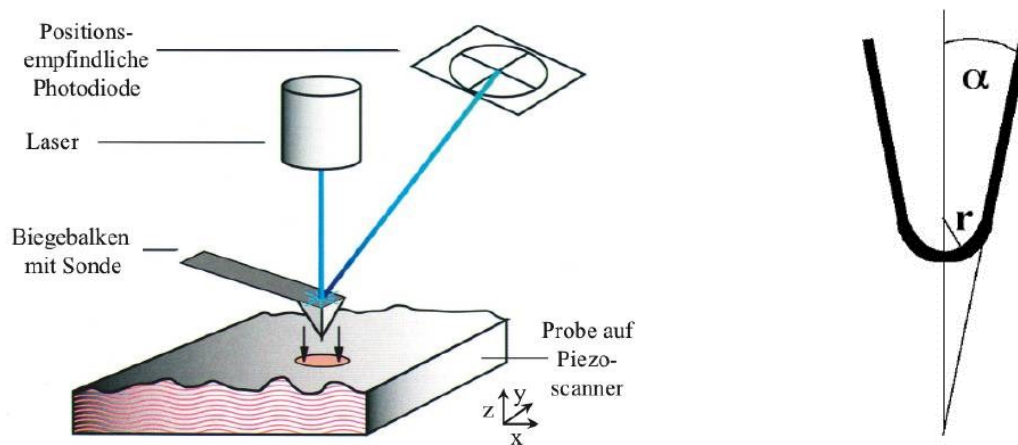


Abbildung 1: Messprinzip des Rasterkraftmikroskops (links), Geometrie-Parameter einer AFM-Sonde: Spitzenradius  $r$  und halber Öffnungswinkel  $\alpha$  (rechts) [27].

Um eine Beschädigung der Oberfläche zu verhindern, wird das Rasterkraftmikroskop im „tapping mode“ betrieben. Dabei wird der Piezokristall (Biegebalken) nahe seiner Resonanzfrequenz ( $\approx 100 \text{ kHz}$ ) zu Oszillationen angeregt. Die entstandene Dämpfung des Biegebalkens in der Probennähe wird durch Lichtzeigermethode zur Höhendetektierung eingesetzt [27]. Es können zusätzliche Informationen durch Phasenverschiebung aus dem sogenannten „phase imaging“ gewonnen werden. Dabei wird die Differenz zwischen Anregungsschwingung und der Oszillation des Biegebalkens zur Bestimmung der viskoelastischen Eigenschaften der Probe verwendet [24].

### 2.1.2 Konfokale Weißlichtmikroskopie

Bei konfokalen Weißlichtmikroskopen wird das Licht, von einer Lichtquelle kommend, durch verschiedene Lochblenden und konfokale Linsen fokussiert. Der fokussierte Lichtstrahl wird auf die zu untersuchende Oberfläche projiziert, reflektiert und über verschiedene Linsen, einen Strahlteiler und Lochblenden zu einem Detektor geleitet (siehe Abbildung 2) [24].

Befindet sich das Objekt auf gleicher Fokusebene wie der Detektor und die Lichtquelle, so ergibt sich ein maximales Signal am Detektor. Sollte sich das Objekt nicht in der Fokusebene des Detektors befinden, so ergibt sich eine unscharfe Beleuchtung der Oberfläche und die unscharfe Abbildung wird unterdrückt. Durch schrittweise Verschiebung des Fokus kann eine sehr genaue Höheninformation ermittelt werden [12].

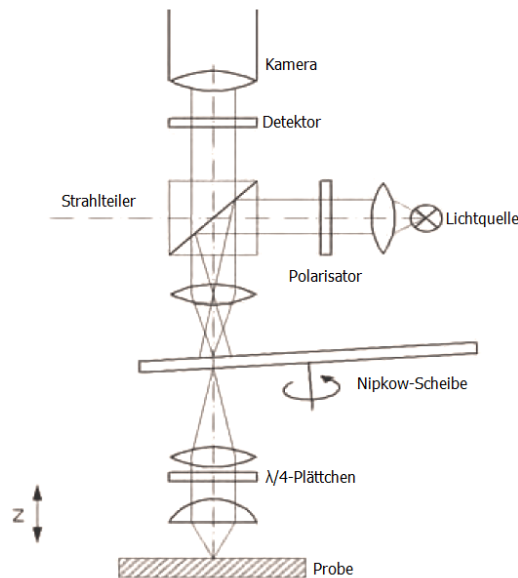


Abbildung 2: Strahlengang von konfokalen Mikroskopen [12].

### 2.2 Oberflächenenergie

Bei Kontakt einer Flüssigkeit mit einem nicht in der Flüssigkeit löslichen, flüssigen oder gasförmigen Stoff bilden sich Wechselwirkungen zwischen den Molekülen der jeweiligen Stoffe aus. Diese Wechselwirkungen bewirken die Ausbildung einer Grenzfläche, welche nur durch Einwirkung von Energie verformt werden kann. Diese zur Verformung erforderliche Energie der Ober- bzw. Grenzfläche wird Oberflächen- bzw. Grenzflächenspannung genannt [20].

Der Begriff Oberflächenenergie ist lediglich für Festkörper zu verwenden, wohingegen für Flüssigkeiten der Begriff Oberflächenspannung benutzt wird.

Um die Oberflächenenergie bestimmen zu können, wird vorzugsweise die Kontaktwinkelmessung verwendet, wobei es unterschiedliche Methoden für

Feststoffe und Flüssigkeiten gibt, welche zum Beispiel in [16] oder [19] dargestellt sind.

### 2.2.1 Oberflächenenergiemessung an Festkörperoberflächen (sessile drop)

Kontaktwinkelmessungen werden verwendet, um die Oberflächenenergie von Festkörpern bzw. die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten bestimmen zu können.

Jede beliebige Flüssigkeit weist, je nach ihrer Polarität, ein unterschiedliches Benetzungsverhalten gegenüber einer Oberfläche mit bestimmter Polarität auf. Dieses Verhalten wird in der Kontaktwinkelmessung ausgenutzt, um Oberflächen- bzw. Flüssigkeitseigenschaften bestimmen zu können.

Je nach Differenz zwischen der Oberflächenspannung der flüssigen Phase und der Oberflächenenergie der festen Phase, ergibt sich ein charakteristischer Kontaktwinkel  $\theta$ . Wenn die Kohäsionsarbeit  $W_K$  wesentlich größer als die Adhäsionsarbeit  $W_A$  ist, ergibt sich ein größerer Kontaktwinkel  $\theta$ , da ein schlechtes Benetzungsverhalten vorliegt (siehe Abbildung 3 rechts). Ist die Adhäsionsarbeit hingegen nur wenig geringer als die Kohäsionsarbeit, so wird auch der Kontaktwinkel reduziert und es kommt zur Benetzung der Oberfläche (siehe Abbildung 4 mitte). Fällt der Kontaktwinkel  $\theta$  auf den Wert Null ab, spricht man von vollständiger Benetzung [21].

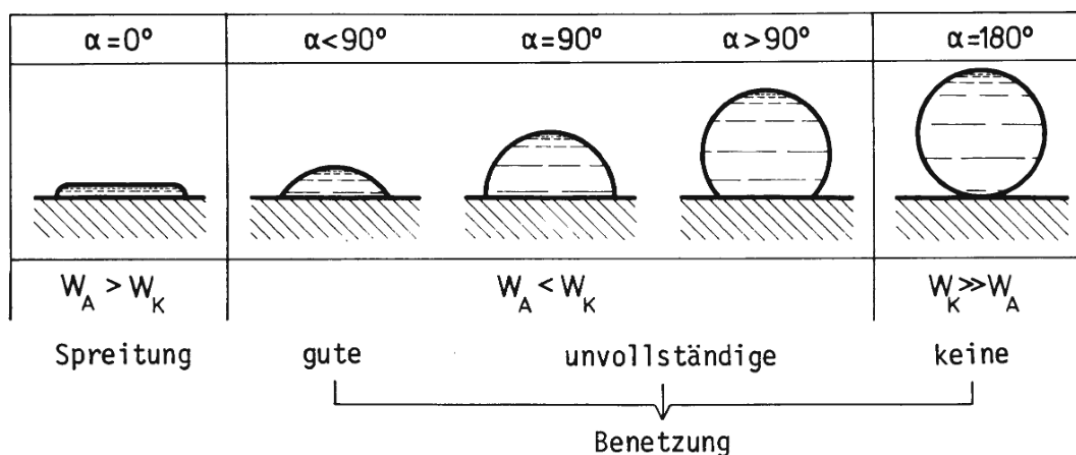


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Benetzungswinkel und Benetzungsverhalten von Klebstoffen [13].

Bei der „sessile drop“ Methode (liegender Tropfen) wird dazu ein Flüssigkeitstropfen, mit bekannter Polarität, auf eine zu untersuchende Oberfläche abgelegt und der Kontaktwinkel  $\theta$  am 3-Phasenpunkt bestimmt (siehe Abbildung 4).

Prinzipiell muss zwischen zwei Arten der Kontaktwinkelmessung unterschieden werden:

- Messung des Kontaktwinkels an einem statischen Tropfen bzw.
- Messung des Kontaktwinkels an einem dynamischen Tropfen.

$\sigma_s$  ... Oberflächenenergie der festen Phase (mN/m),  
 $\gamma_{sl}$  ... Grenzflächenspannung zwischen der festen und flüssigen Phase (mN/m),  
 $\sigma_l$  ... Oberflächenspannung der flüssigen Phase (mN/m) und  
 $\theta$  ... Kontaktwinkel ( $^\circ$  bzw. deg).

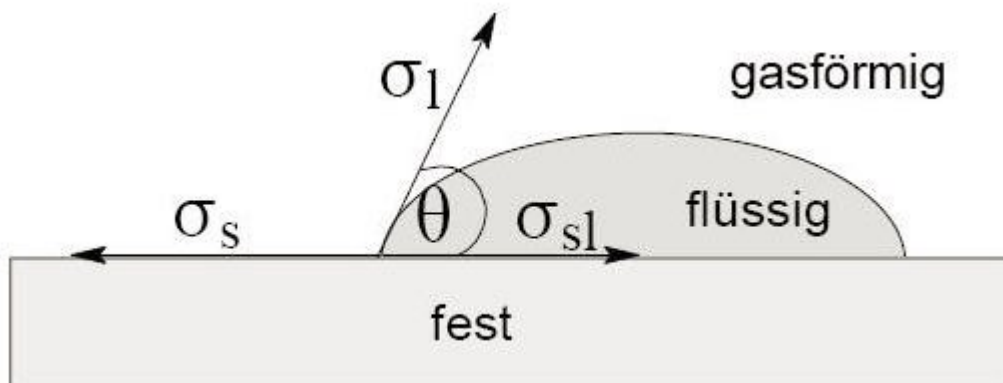


Abbildung 4: Ausbildung des Randwinkels eines Tropfens auf einer Festkörperoberfläche [21].

### 2.2.1.1 Der statische Kontaktwinkel

Bei der statischen Kontaktwinkelmessung bleibt das Volumen des Tropfens konstant. Dabei kann es allerdings vorkommen, dass der Kontaktwinkel sich aufgrund von Wechselwirkungen über die Zeit verändert (siehe Abbildung 5). Somit kann auch eine mögliche Zeitabhängigkeit des Kontaktwinkels gemessen werden [16].

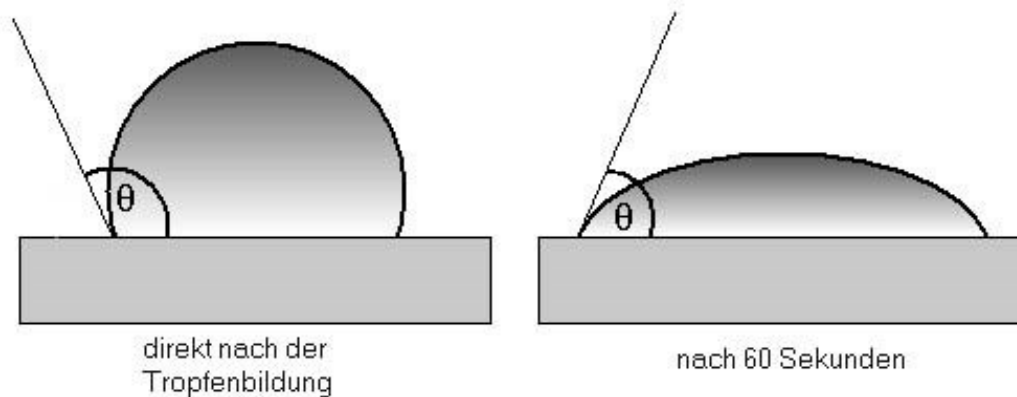


Abbildung 5: Zeitliche Veränderung des statischen Kontaktwinkels [16].

Diese zeitlichen Veränderungen des Kontaktwinkels können unterschiedliche Ursachen haben:

- Verdampfungsvorgänge der Testflüssigkeit,
- Wanderung von gelösten Stoffen zur oder weg von der Grenzfläche,
- Migration oberflächenaktiver Stoffe vom Feststoff in die Grenzfläche,
- chemische Reaktionen zwischen Festkörper und Flüssigkeit sowie
- Anlösen oder Anquellen des Festkörpers durch die Flüssigkeit [16].

### 2.2.1.2 Der dynamische Kontaktwinkel

Bei dynamischen Kontaktwinkelmessungen wird der Kontaktwinkel gemessen während das Tropfenvolumen entweder vergrößert oder verkleinert wird. Dadurch wird während der Messung die Grenzfläche ständig neu gebildet [16]. Der Vorteil von dynamischen Kontaktwinkelmessungen liegt darin, dass raue Oberflächen, wie auch chemische Reaktionen zwischen Flüssigkeit und Feststoff den Kontaktwinkel nicht beeinflussen [21].

### 2.2.1.3 Berechnung der Oberflächenenergie [18, 19]

Je nach Oberflächenenergie des Festkörpers  $\sigma_s$ , der Oberflächenspannung der Flüssigkeit  $\sigma_l$  und der Grenzflächenspannung in der Kontaktfläche der beiden Materialien  $\gamma_{sl}$ , bildet sich laut Young (siehe Gleichung ( 1 )) im 3-Phasenpunkt ein unterschiedlicher Kontaktwinkel  $\theta$  aus [18]:



$$\sigma_s = \gamma_{sl} + \sigma_l \times \cos(\theta) \quad (1)$$

Um die Oberflächenenergie aus den ermittelten Kontaktwinkeln berechnen zu können, stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung, wobei die OWRK-Methode, nach Owens, Wendt, Rabel und Kaelble, die am meisten verwendete Methode darstellt.

Aus früheren Überlegungen nach Fowkes, dass nur gleichartige Wechselwirkungen zwischen einer festen und einer flüssigen Phase stattfinden können, entwickelten Owens, Wendt, Rabel und Kaelble die Vorstellung, dass sich die Oberflächenenergie in einen polaren und einen dispersen Anteil aufspalten lässt (siehe Gleichungen (2) und (3)).

Disperse Wechselwirkungen wirken zwischen allen Atomen und Molekülen wie beispielsweise van der Waals-Wechselwirkungen, wohingegen polare Wechselwirkungen nur in bestimmten Molekülen, aufgrund der unterschiedlichen Elektronegativität der Atome bzw. Moleküle, wirken [18]:

$$\sigma_s = \sigma_s^P + \sigma_s^D \quad (2)$$

$$\sigma_l = \sigma_l^P + \sigma_l^D \quad (3)$$

$\sigma_s$  ... Oberflächenenergie der festen Phase (mJ/m),

$\sigma_s^P$  ... polarer Anteil der Oberflächenenergie (mN/m),

$\sigma_s^D$  ... disperser Anteil der Oberflächenenergie (mN/m),

$\sigma_l$  ... Oberflächenspannung der flüssigen Phase (mN/m),

$\sigma_l^P$  ... polarer Anteil der Oberflächenspannung (mN/m) sowie

$\sigma_l^D$  ... disperser Anteil der Oberflächenspannung (mN/m)

Nach der OWRK-Methode sollen mindestens zwei unterschiedliche Flüssigkeiten mit bekannter Oberflächenspannung verwendet werden. Die Flüssigkeiten müssen sich allerdings nicht nur in der Oberflächenspannung, sondern auch in ihrem polaren Anteil unterscheiden. Meist wird als erste Flüssigkeit deionisiertes Wasser verwendet, welches einen sehr hohen polaren Anteil besitzt. Als zweite Flüssigkeit wird oft Diiodomethan verwendet, welches einen sehr niedrigen polaren Anteil aufweist.

Nach OWENS und WENDT wird die Grenzflächenspannung, wie in Gleichung ( 4 ) dargestellt, definiert:

$$\gamma_{sl} = \sigma_s + \sigma_l - 2\left(\sqrt{\sigma_s^D \sigma_l^D} + \sqrt{\sigma_s^P \sigma_l^P}\right) \quad (4)$$

Kombiniert man nun Gleichung ( 4 ) mit Gleichung ( 1 ) und löst dieses Konstrukt nach  $\gamma_{sl}$  auf, so können, bei bekannten Werten der Flüssigkeiten, durch lineare Regression die Terme  $y$ ,  $m$ ,  $x$  und  $b$  aus Gleichung ( 5 ), in einem Diagramm dargestellt werden (siehe Abbildung 6). Durch Quadrieren der Geradensteigung  $m$  kann der polare ( $\sigma_s^P$ ) Anteil ermittelt werden. Durch das Quadrat des Ordinatenabschnitts  $b$  kann der disperse ( $\sigma_s^D$ ) Anteil der Oberflächenenergie berechnet werden [19].

$$\underbrace{\sigma_l \times \frac{(1 + \cos(\theta))}{2\sqrt{\sigma_l^D}}}_{y} = \underbrace{\sqrt{\sigma_s^P}}_m \times \underbrace{\sqrt{\frac{\sigma_l^P}{\sigma_l^D}}}_x + \underbrace{\sqrt{\sigma_s^D}}_b \quad (5)$$

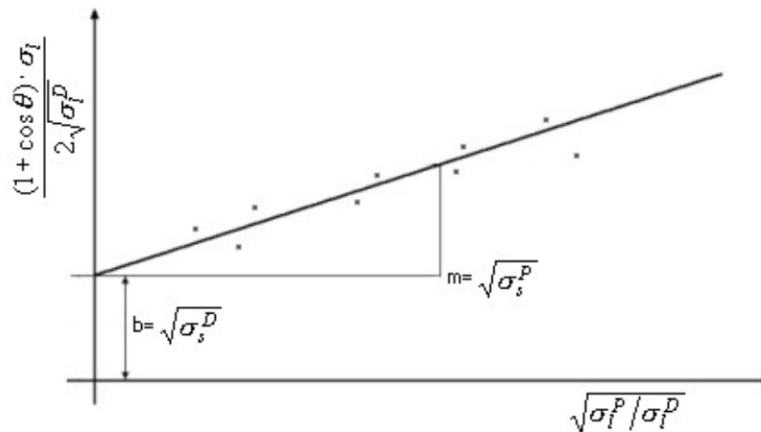


Abbildung 6: Berechnung des polaren und dispersen Anteils der Oberflächenenergie [19].

#### 2.2.1.4 Oberflächenspannungsmessung von Flüssigkeiten (pendant drop)

Im Gegensatz zur „sessile drop“ Methode wird zur Bestimmung der Oberflächenspannung von Flüssigkeiten die „pendant drop“ Methode (hängender Tropfen) angewandt.

Wenn ein Flüssigkeitstropfen an einer Spritzenkanüle hängt, so kann aufgrund seiner Form und Größe, dessen Oberflächenspannung ermittelt werden. Die Voraussetzung für Messungen an hängenden Tropfen ist, dass der Tropfen sich im hydromechanischen Gleichgewicht befindet. Je nach Höhe am Tropfen entspricht dann die jeweilige Gravitationskraft (Gleichung ( 6 )) dem LAPLACE-Druck.

$$\Delta p = \Delta \rho \times g \times l \quad ( 6 )$$

$\Delta p$  ... hydrostatischer Druck (Pa),

$\Delta \rho$  ... Dichtedifferenz zwischen schwerer und leichter Phase ( $\text{kg/m}^3$ ),

$g$  ... Erdbeschleunigung ( $\text{m/s}^2$ ) und

$l$  ... vertikaler Abstand zwischen Messpunkt und Kanülenöffnung (m)

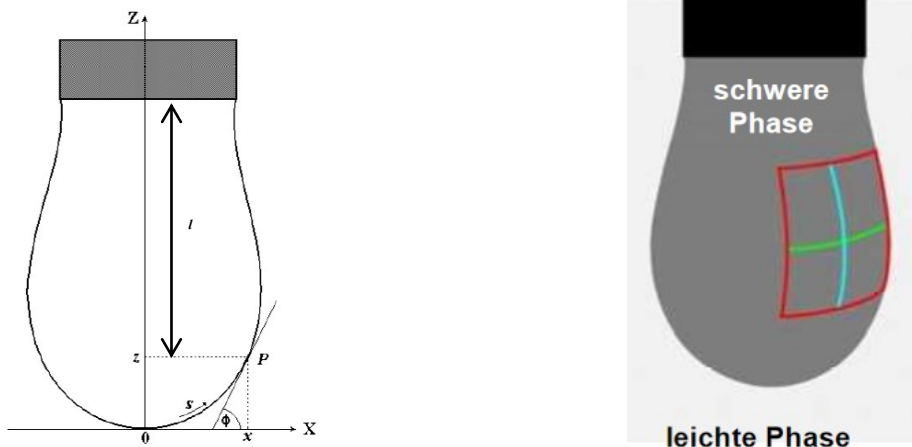
(siehe Abbildung 7 links).

Der LAPLACE-Druck ergibt sich aus der Krümmung der Tropfenkontur an der jeweiligen Höhe des Tropfens und resultiert aus den senkrecht aufeinander

stehenden Krümmungsradien  $r_1$  und  $r_2$  (siehe Abbildung 7 rechts). Daraus ergibt sich für den LAPLACE-Druck die Gleichung ( 7 ) [16].

$$\Delta p = \sigma \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad ( 7 )$$

- $\Delta p$  ... Druckdifferenz zwischen schwerer und leichter Phase (Pa),
- $\sigma$  ... Oberflächenspannung der schweren Phase (mN/m),
- $r_1$  ... Radius des horizontalen Krümmungskreises (m) (Abbildung 7 grüner Krümmungskreisabschnitt) sowie
- $r_2$  ... Radius des vertikalen Krümmungskreises (m) (Abbildung 7 blauer Krümmungskreisabschnitt)



*Abbildung 7: Geometrie des hängenden Tropfens (links), Darstellung der Tropfenkontur mit eingezeichneten Hauptkrümmungskreisabschnitten (Radius  $r_1$ , grün und Radius  $r_2$ , blau) (rechts) [15].*

Durch Gleichsetzen der Gleichungen ( 6 ) und ( 7 ) kann, bei bekannter Dichte der Flüssigkeit und ermittelter Tropfengeometrie, durch Umformen die Oberflächenspannung des Tropfens ermittelt werden.

Um die jeweiligen Anteile der Oberflächenspannung zu ermitteln, muss der Flüssigkeitstropfen einer zusätzlichen Messung unterzogen werden. Dazu wird mittels

„sessile drop“ Methode der Flüssigkeitstropfen auf ein unpolares PTFE-Plättchen (Polytetrafluorethylen) abgelegt.

Durch den daraus erhaltenen Kontaktwinkel und der Gleichung ( 8 ) erhält man den dispersen Anteil der Oberflächenspannung des Tropfens.

$$\sigma_l^D = \frac{\sigma_l^2}{4\sigma_s} (1 + \cos \Theta)^2 \quad ( 8 )$$

$\sigma_l^D$  ... disperser Anteil der Oberflächenspannung des Tropfens,

$\sigma_l$  ... ermittelte Oberflächenspannung aus der „pendant drop“ Messung,

$\sigma_s$  ... Oberflächenenergie des PTFE-Plättchens und

$\Theta$  ... Kontaktwinkel des Tropfens auf dem PTFE-Plättchen.

Durch weiteres Einsetzen in die Gleichung ( 9 ) kann schlussendlich auch der polare Anteil der Oberflächenspannung  $\sigma_l^P$  ermittelt werden.

$$\sigma_l^P = \sigma_l - \sigma_l^D \quad ( 9 )$$

Diese Methode der Oberflächenspannungsmessung konnte in dieser Arbeit allerdings nicht eingesetzt werden, da die verwendeten Polymerschmelzen während der Messung thermisch geschädigt werden und so keine zuverlässigen Ergebnisse liefern. Als Ursache für die thermische Schädigung wird die chemische Alterung des Materials in Kombination mit den längeren Verweilzeiten im Messgerät (bis zu einer Stunde) vermutet.

### 2.2.2 Bekannte Werte von Oberflächenenergien

In Tabelle 1 sind typische Oberflächenenergien von verschiedenen Oberflächen angegeben. Diese Werte wurden aus der Stoffdatenbank der Firma Krüss GmbH entnommen und stellen keine allgemein gültigen Werte für den jeweiligen Werkstoff dar.

Tabelle 1: Auflistung von Oberflächenenergien verschiedener Oberflächen, mittels Kontaktwinkelmessung der Firma Krüss GmbH [17].

Substance	Surface tension (Surface energy) mN/m	Dispersive part mN/m	Polar part mN/m
water	67.80 - 72.80	18.70 - 26.00	46.80 - 53.60
Mercury	484.00	200.00	284.00
Diodo-Methane	50.80	47.40 - 50.80	0.00 - 2.60
Carbon	34.80	33.00	1.80
Silica	35.05 - 35.13	30.07 - 32.59	2.55 - 4.98
Glass	43.10 - 112.90	15.70 - 40.40	27.40 - 72.50
Steel	29.00 - 56.00	18.80 - 34.00	0.30 - 27.50
Human skin	31.40 - 43.70	30.60 - 35.70	1.00 - 8
CrAlN	38.00	28.00	10.00
CrN	38.00	35.00	3.00
TiAlN	41.00	33.00	8.00
Titanium nitride	43.00	34.00	9.00
ZrN	40.00	29.00	11.00
Aluminium oxide	31.00 - 50.50	23.00 - 46.96	1.25 - 10.36
Iron Oxide	28.00 - 32.90	20.00	12.90
Titanium-dioxide	27.70 - 43.88	16.30 - 41.47	1.10 - 13.30
Y2O3	43.27 - 43.37	34.95 - 35.73	7.99 - 8.37
ZrO2	42.04 - 42.75	34.56 - 35.45	7.12 - 7.81
WC	46.30	25.30	21.00
ABS	41.90	41.90	0.00
PC	29.00 - 38.80	37.00	1.80
PE	27.00 - 36.30	31.60 - 36.30	0.00 - 2.21
PP	28.00 - 34.10	29.40 - 31.30	0.00 - 2.80
PS	29.20 - 42.80	33.90 - 42.80	0.00 - 2.17
PTFE	15.56 - 21.77	14.54 - 21.72	0.00 - 1.02
PA 6	15.68		
PA 6.6	33.8 - 45.90	28.91	17.49

## 2.3 Kenngrößen von Oberflächen

In diesem Kapitel werden zusätzlich jene Parameter behandelt, die in dieser Arbeit Verwendung gefunden haben.

### 2.3.1 Grenzflächenspannung $\gamma_{sl}$ , $\gamma_{12}$

Die Spannung, die durch die Kräfte zwischen zwei in Kontakt stehenden Phasen auftritt, wird auch als Grenzflächenspannung  $\gamma_{sl}$  bezeichnet (siehe Gleichung ( 4 ) auf Seite 10). Diese Spannung wird auch als Vergleichswert für die Entformungskraft, welche für die Trennung dieser Phasen benötigt wird, herangezogen. Bei höheren Grenzflächenspannungen wird laut Berg [4] eine niedrigere Entformungskraft vermutet.

Es wird angenommen, dass Gleichung ( 4 ) auch für zwei Festkörper gilt, wobei einer der beiden vorher im schmelzflüssigen Zustand vorlag und den Anderen benetzt hatte. Gleichung ( 4 ) wird somit zu Gleichung ( 10 )( 11 ).

$$\gamma_{12} = \sigma_1 + \sigma_2 - 2 \left( \sqrt{\sigma_1^D \sigma_2^D} + \sqrt{\sigma_1^P \sigma_2^P} \right) \quad ( 10 )$$

$\gamma_{12}$  ... Grenzflächenspannung (mN/m),

$\sigma_1$  ... Oberflächenenergie der festen Phase von Festkörper 1 (mN/m),

$\sigma_1^P$  ... polarer Anteil der Oberflächenenergie von Festkörper 1 (mN/m),

$\sigma_1^D$  ... disperser Anteil der Oberflächenenergie von Festkörper 1 (mN/m),

$\sigma_2$  ... Oberflächenenergie der festen Phase von Festkörper 2 (mN/m),

$\sigma_2^P$  ... polarer Anteil der Oberflächenenergie von Festkörper 2 (mN/m) sowie

$\sigma_2^D$  ... disperser Anteil der Oberflächenenergie von Festkörper 2 (mN/m)

### 2.3.2 Arithmetischer Mittenrauwert $R_a$ , $S_a$

„...Der Mittenrauwert  $R_a$  is der arithmetische Mittelwert der absoluten Beträge der Abweichungen  $Z(x)$  des Rauheitsprofils von der Mittellinie innerhalb der Gesamtmessstrecke  $l_m$  nach Ausfiltern der Welligkeit...“ [25] (siehe Abbildung 8). Der arithmetische Mittenrauwert  $R_a$  wird berechnet wie in Gleichung ( 11 ) dargestellt.

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |Z(x)| dx \quad ( 11 )$$

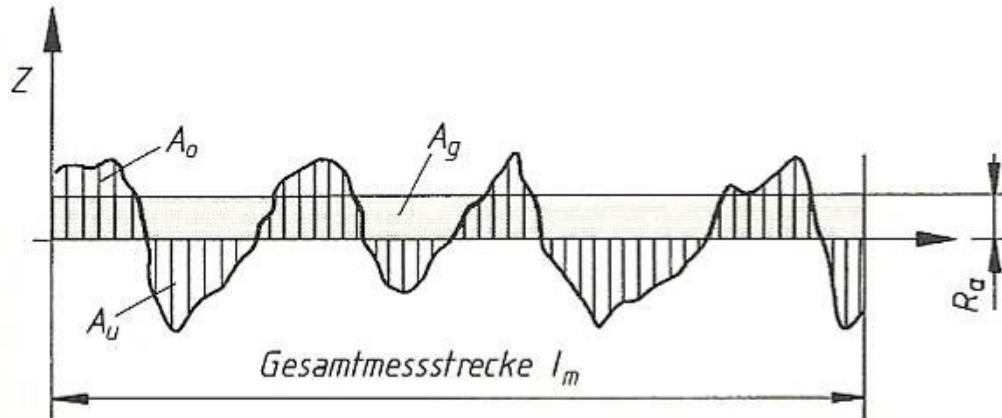


Abbildung 8: Arithmetischer Mittenrauwert  $R_a$  [25].

Wird der arithmetische Mittenrauwert auf Flächenmessungen angewendet, so wird dieser als  $sR_a$  oder  $S_a$  bezeichnet.

### 2.3.3 Quadratischer Mittenrauwert $R_q$ , RMS, $S_q$

Der quadratische Mittenrauwert  $R_q$ , auch als RMS bezeichnet, ist der quadratische Mittelwert der Abweichungen  $Z(x)$  von der Mittellinie des Rauheitsprofils. Der quadratische Mittenrauwert ist empfindlicher auf Spitzen und Riefen als der arithmetische Mittenrauwert und wird, wie in Gleichung ( 12 ) dargestellt, berechnet [28]. Wird der quadratische Mittenrauwert auf Flächenmessungen angewendet, so wird dieser als  $sR_q$ ,  $sRMS$  oder  $S_q$  bezeichnet.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_m} \int_{x=0}^{x=l_m} Z(x)^2 dx} \quad ( 12 )$$



## 3 Experimentelle Untersuchung

In diesem Kapitel wird näher auf die verwendeten Geräte, verwendeten Materialien und die gesamte experimentelle Durchführung eingegangen.

### 3.1 Verwendete Materialien

In diesem Kapitel werden die zu untersuchenden Stahl-Probekörper bzw. die Probekörper mit Beschichtung sowie die verwendeten Polymere angeführt. Alle beschichteten und unbeschichteten Probekörper weisen eine Soll-Härte von 45,8 HRC auf.

#### 3.1.1 Stähle und Beschichtungen

Für die Stahlprobekörper wurden ausschließlich Produkte der Firma Böhler Edelstahl GmbH und Co KG, Kapfenberg/Österreich, verwendet. Die Beschichtungen wurden von Oerlikon Balzers AG, Balzers/Liechtenstein, aufgebracht. Die verwendeten Oberflächen sind in Tabelle 2 aufgelistet.

*Tabelle 2: Verwendete Probekörper mit den jeweiligen Oberflächenbeschichtungen.*

<b>Probekörper Grundmaterial</b>	<b>Beschichtung</b>	<b>Ist-Härte (HRC)</b>
Böhler M333 Isoplast	keine	50,4 ± 0,66
Böhler M268 VMR	keine	45,8 ± 0,22
Böhler M303 Extra	keine	45,6 ± 0,47
Böhler M333 Isoplast	MoN (Molybdänitrid)	46,0 ± 0,27
Böhler M333 Isoplast	CrN (Chromnitrid)	45,8 ± 0,33
Böhler M333 Isoplast	CrC/a-C:H (Chromcarbid DLC)	45,9 ± 0,13

#### **Böhler M333 Isoplast**

Der Böhler M333 Isoplast ist ein korrosionsbeständiger Kunststoffformenstahl, der für Formen und Formeinsätze verwendet wird, die eine Hochglanzoberfläche aufweisen müssen. Laut Hersteller besitzt dieser Werkstoff die Vorteile der optimalen Hochglanzpolierbarkeit, der verbesserten Wärmeleitfähigkeit sowie eine

außergewöhnliche Zähigkeit und Härte [10]. Die chemische Zusammensetzung des Böhler M333 Isoplast ist in Tabelle 3 dargestellt.

*Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung des Böhler M333 Isoplast [10].*

<b>Chemische Zusammensetzung (%)</b>			
<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>
0,28	0,3	0,3	13,5

#### **Böhler M268 VMR**

Der Böhler M268 VMR ist ein vorvergüteter Kunststoffformenstahl, der sich für höchste Polierbarkeit verwenden lässt. Dieser Werkstoff wird vorzugsweise für Formen in der Kunststoffverarbeitung, sowie für allgemeine Maschinen- und Werkzeugbauteile verwendet, die eine hohe Polierbarkeit bzw. Dauerfestigkeit aufweisen müssen. Aufgrund seines geringen Chromgehalts ist er nicht sehr korrosionsbeständig [11]. Die chemische Zusammensetzung des Böhler M268 VMR ist in Tabelle 4 dargestellt.

*Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung des Böhler M268 VMR [11].*

<b>Chemische Zusammensetzung (%)</b>					
<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>
0,38	0,3	1,5	2,0	1,1	0,2

#### **Böhler M303 Extra**

Der Böhler M303 Extra ist ein nichtrostender, martensitischer Chromstahl der für Formenwerkzeuge verwendet wird, die für die Verarbeitung chemisch aggressiver Kunststoffe ausgelegt sind. Er wird außerdem für Extrusions- sowie Fittingwerkzeuge verwendet. Er zeichnet sich laut Hersteller durch seine sehr gute Zähigkeit, Korrosionsbeständigkeit, gutem Verschleißwiderstand sowie verbesserter Zerspan- und Polierbarkeit aus [9]. Die chemische Zusammensetzung des Böhler M303 Extra ist in Tabelle 5 dargestellt.

*Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung des Böhler M303 Extra [9].*

<b>Chemische Zusammensetzung (%)</b>					
<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>
0,27	0,3	0,65	14,5	0,85	1,0

#### **3.1.2 Polymere**

Bei der Wahl der Polymere wurde darauf geachtet, dass sich diese in ihrer Polarität unterscheiden. Dabei fiel die Wahl auf eine Polycarbonat- sowie eine Polyamid-Type. Für die jeweiligen Untersuchungen wurden die Polymere laut Materialdatenblatt (siehe Anhänge 7.1 und 7.2) getrocknet.

##### **Polycarbonat**

Als Polycarbonat wurde Makrolon 2407 der Firma Bayer MaterialScience AG, Leverkusen/Deutschland, verwendet. Dieses Material wird vorzugsweise in der Elektro- und Elektronikindustrie verwendet [3]. Technische Daten über dieses Material sind im Anhang 7.1 vermerkt.

##### **Polyamid 6**

Als Polyamid wurde Durethan B30S der Firma Lanxess Deutschland GmbH, Köln/Deutschland, verwendet. Dieses Material wird für vor allem für dünnwandige technische Bauteile verwendet [23]. Technische Daten über dieses Material sind im Anhang 7.2 vermerkt.

#### **3.2 Probenreinigung**

Die Probenreinigung stellte einen wichtigen Punkt in dieser Arbeit dar, da Kontaktwinkelmessungen sehr empfindlich auf diverse Verschmutzungen reagieren.

Um die zu untersuchenden Stahloberflächen bzw. die beschichteten Oberflächen vor Korrosion zu schützen, wurden diese zwischen den Messungen immer wiederkehrend mit Öl versiegelt. Vor den jeweiligen Untersuchungen wurden die Oberflächen dreimal mit Aceton gespült und anschließend mit einem weichen Tuch trocken gestrichen, um keine Reste vom verdampfenden Aceton zu hinterlassen.

Die Kunststoffproben wurden lediglich mit einem weichen Baumwolltuch abgewischt. Auf die Reinigung mit Aceton wurde aufgrund der Gefahr von chemischen Reaktionen verzichtet. Auch mit deionisiertem Wasser wurden die Kunststoffproben nicht gereinigt, um eine mögliche Wasseraufnahme zu verhindern.

Während dieser Arbeit stellte sich heraus, dass es ratsam ist, die Stahl-Probekörper sowie jene mit Beschichtung zusätzlich zum beschriebenen Reinigungsvorgang in einem Ofen bei 200°C auszuheizen. Dadurch werden Reste der Oberflächenkonservierung beseitigt, welche die Kontaktwinkelmessungen beeinflussen könnten. In dieser Arbeit wurden nur jene Probekörper ausgeheizt, bei denen Messergebnisse wiederkehrend als Ausreißer auftraten.

### **3.3 Verwendete Geräte**

Zur Durchführung dieser Arbeit wurden einige Geräte bzw. Maschinen benötigt, welche in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben werden.

Zur Oberflächencharakterisierung wurden ein Rasterkraftmikroskop, ein Konfokal-Mikroskop sowie ein Kontaktwinkelmessgerät verwendet. Für die Reibwertversuche wurden eine Spritzgießmaschine, ein Reibwert-Spritzgießversuchswerkzeug sowie ein Roboter für die Entnahme der Kunststoffteile verwendet.

#### **3.3.1 Rasterkraftmikroskop (AFM)**

Als Rasterkraftmikroskop wurde jenes von der Firma Asylum Research, Santa Barbara/USA, mit der Typenbezeichnung MFP-3D (siehe Abbildung 9) verwendet. Mit diesem Gerät sind Messungen an Proben möglich, welche eine maximale Größe von bis zu 80 x 80 x 15 mm<sup>3</sup> aufweisen. Das laterale Auflösungsvermögen liegt im Bereich von 0,1 – 10 nm und die vertikale Auflösung beträgt 0,05 nm. Das Rasterkraftmikroskop befindet sich am Institut für Physik der Montanuniversität Leoben. Um die Probenoberfläche zu schützen, wurde das Rasterkraftmikroskop im „tapping mode“ betrieben. Der verwendete Cantilever des Typs OMCL-AC 240TS-E, der Firma Olympus Inc., besitzt eine Resonanzfrequenz zwischen 61 – 77 kHz und eine Federkonstante von 1,2-2,5 N/m. Der Spitzenradius liegt unter 10 nm und die

Höhe der Spitze beträgt 10  $\mu\text{m}$ . Die Messfeldgröße wurde mit 60 x 60  $\mu\text{m}$  festgelegt, wodurch sich eine Messdauer von 45 Minuten pro Messung ergab.



Abbildung 9: Rasterkraftmikroskop MFP-3D [1].

#### 3.3.2 Konfokal-Mikroskop (FRT)

Das konfokale Weißlichtmikroskop wurde in dieser Arbeit zur Charakterisierung der Ebenheit der zu untersuchenden Oberflächen verwendet. Um mögliche unerwartete Verläufe aus den Reibwertversuchen besser interpretieren zu können bzw. um die Oberflächen überhaupt für Reibwertuntersuchungen zuzulassen, wurde diese Messung durchgeführt. Würden die Probekörper keine einheitliche Ebenheit aufweisen, so würde sich das im Reibwertverlauf niederschlagen und damit wäre die Vergleichbarkeit der Reibwtergebnisse nicht gegeben.

Als Messgerät wurde das Konfokal-Mikroskop der Firma Fries Research & Technology GmbH, Bergisch Gladbach/Deutschland, mit der Bezeichnung FRT MicroProf<sup>®</sup> verwendet (siehe Abbildung 10), welches sich am Polymer Competence Center Leoben befindet. Die maximale Messfläche beträgt 200 x 200  $\text{mm}^2$ , die laterale Auflösung 1  $\mu\text{m}$  und die vertikale Auflösung 10  $\text{nm}$ .



*Abbildung 10: Konfokales Weißlichtmikroskop MicroProf® (chromatisch kodierter, konfokaler Punktsensor).*

#### **3.3.3 Kontaktwinkelmessgerät und Testflüssigkeiten**

Als Kontaktwinkelmessgerät wurde ein DSA100 mit adaptierter Hochtemperaturkammer HT400 (Firma Krüss GmbH, Hamburg/Deutschland), verwendet (siehe Abbildung 13 links). Dieses Messgerät ist mit einem elektronischen Dosiersystem für Flüssigkeiten ausgestattet, wodurch ein konstantes Tropfenvolumen bei jeder Messung garantiert werden kann. Die verwendeten Testflüssigkeiten sind in Tabelle 6 aufgelistet. Die Kontaktwinkelmessungen wurden bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt, um eine mögliche Temperaturabhängigkeit der Kontaktwinkel untersuchen zu können. Dabei wurden die Kontaktwinkel bei den Temperaturen 40°C, 60°C, 85°C, 110°C, 135°C, 160°C, 185°C und 200°C gemessen. Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen die Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung sowie des polaren Anteils der Oberflächenspannung von Ethylencarbonat und Bromonaphthalin. Dieser Zusammenhang ist notwendig für die anschließenden Berechnungen der Oberflächenenergien der beschichteten und unbeschichteten Probekörper bei unterschiedlichen Temperaturen. In Abbildung 11 und Abbildung 12 sind lediglich die von der Firma Krüss GmbH bekannten Messpunkte bei bestimmten Temperaturen angegeben. Da sich diese Temperaturen nicht mit den Messtemperaturen dieser Arbeit decken, wurde eine Ausgleichsgerade durch die Messpunkte gelegt und mittels Interpolation laut angegebener Formel die Oberflächenspannungen bei den notwendigen Temperaturen berechnet.

Die Messungen wurden drei Sekunden nach dem Ablegen des Tropfens auf dem erwärmten Probekörper automatisch durchgeführt, da sich nach dieser Zeit eine homogene Temperatur des Flüssigkeitstropfens einstellt. Dies geht aus den zeitabhängigen Kontaktwinkelmessungen hervor (siehe Anhang 7.3). Um dies zu bestätigen wurde, eine vereinfachte thermische Simulation mit CAE Abaqus durchgeführt (siehe Anhang 7.4).

Tabelle 6: Übersicht über verwendete Testflüssigkeiten bei den jeweiligen Messmodi [14].

<b>Messmodus</b>	<b>Flüssigkeit</b>	<b>T (°C)</b>	<b><math>\sigma_{\text{ges}}</math> (T) (mN/m)</b>	<b><math>\sigma^D</math> (T) (mN/m)</b>	<b><math>\sigma^P</math> (T) (mN/m)</b>	<b><math>\rho</math> (T) (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Raum- temperatur	deionisiertes Wasser	25	72,8	26,4	46,4	0,988
	Diiodomethan	20	50,8	50,8	0	3,325
Temperatur- abhängig	Ethylencarbonat	25	54,1	19,8	34,3	1,321
	1-Bromo- naphthalin	20	44,6	44,6	0	1,483
Temperaturstufen: 40°C, 60°C, 85°C, 110°C, 135°C, 160°C, 185°C und 200°C						

Aufgrund der hohen Temperaturen mussten Testflüssigkeiten verwendet werden, die bis 200°C noch beständig sind. Daher fiel die Wahl auf Bromonaphthalin und Ethylencarbonat. Da Ethylencarbonat bei Raumtemperatur als Feststoff vorliegt und die Flüssigkeitsspritzen nicht temperiert werden konnten, ergaben sich Handhabungsprobleme mit dieser Chemikalie. Um Ethylencarbonat verwenden zu können, wurde der Feststoff in einem verschlossenen Behältnis im Wasserbad bei konstanten 50°C gelöst. Um Ethylencarbonat anschließend in der Spritze ebenfalls in flüssiger Form zu halten, wurde ein 500 Watt Strahler in definiertem Abstand platziert (siehe Nr. I in Abbildung 13 links) und die notwendige Wärme mittels Wärmestrahlung übertragen. Da Ethylencarbonat erst ab 36°C in flüssiger Form vorliegt, wurde der Strahler so platziert, dass ein an der Spritze angebrachter Lufttemperatursensor (siehe Nr. II in Abbildung 13 rechts) eine Temperatur von 40°C messen konnte. Um die empfindliche Kamera vor Lichteinfall zu schützen, wurde das Kontaktwinkelmessgerät mit einem Abschirmblech (siehe Nr. III in Abbildung 13 rechts) aufgerüstet. Weiters wurde auch eine Abschirmung gegen Wärmestrahlung

### 3. Experimentelle Untersuchung

für den Elektromotor (siehe Nr. IV in Abbildung 13 rechts) der Spritzendosierung aufgerüstet (siehe Nr. V in Abbildung 13 rechts), da dieser bei zu hoher Erwärmung seine Funktion einstellte.

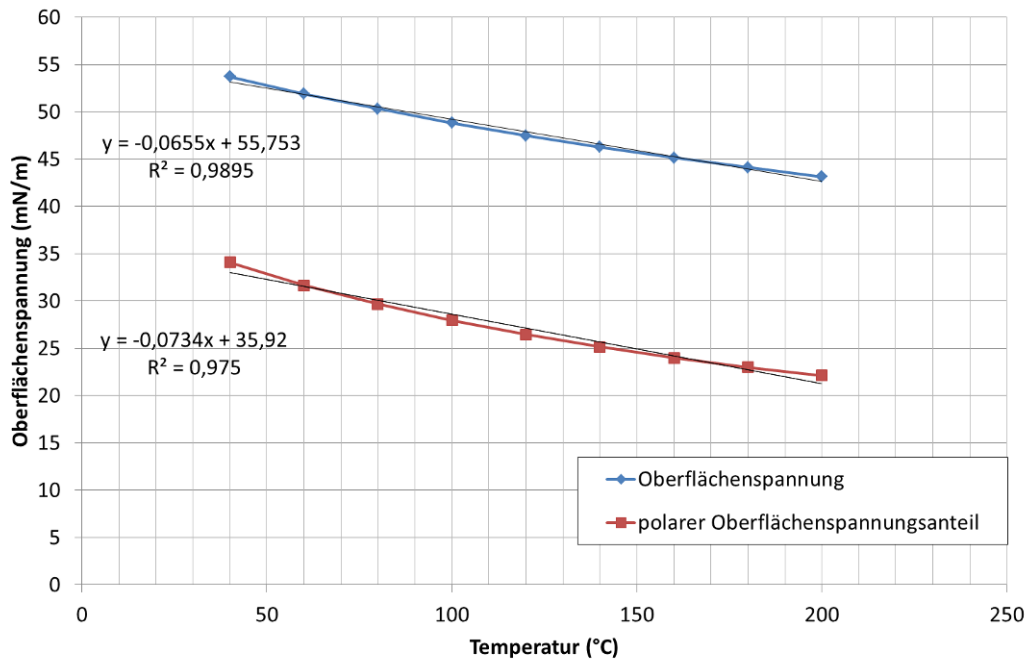


Abbildung 11: Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung und dessen polarer Anteil von Ethylencarbonat.



### 3. Experimentelle Untersuchung

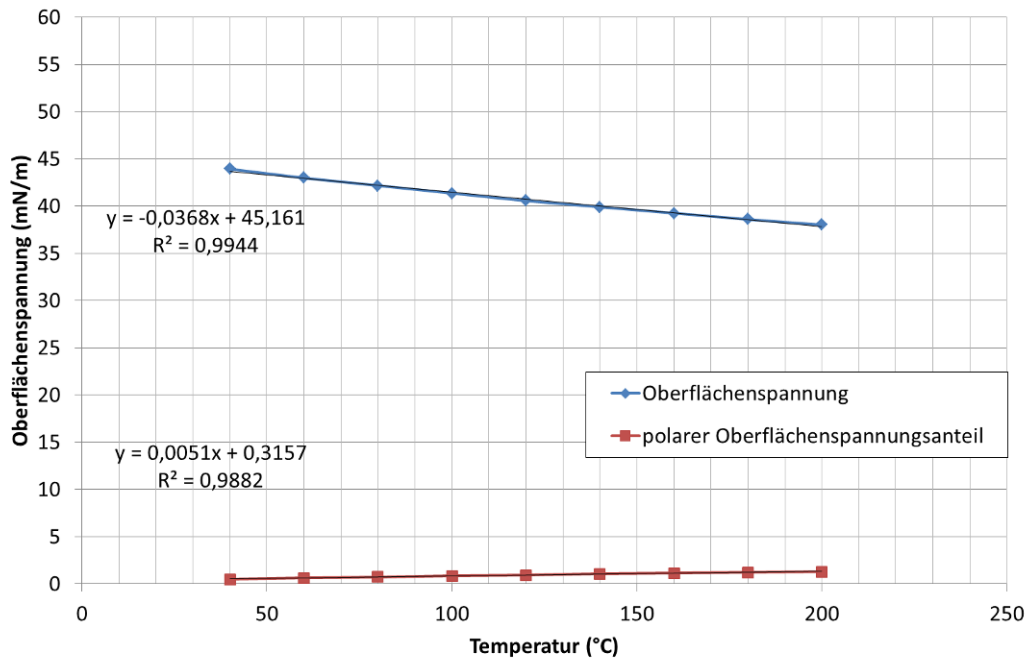


Abbildung 12: Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung und dessen polarer Anteil von Bromonaphthalin.

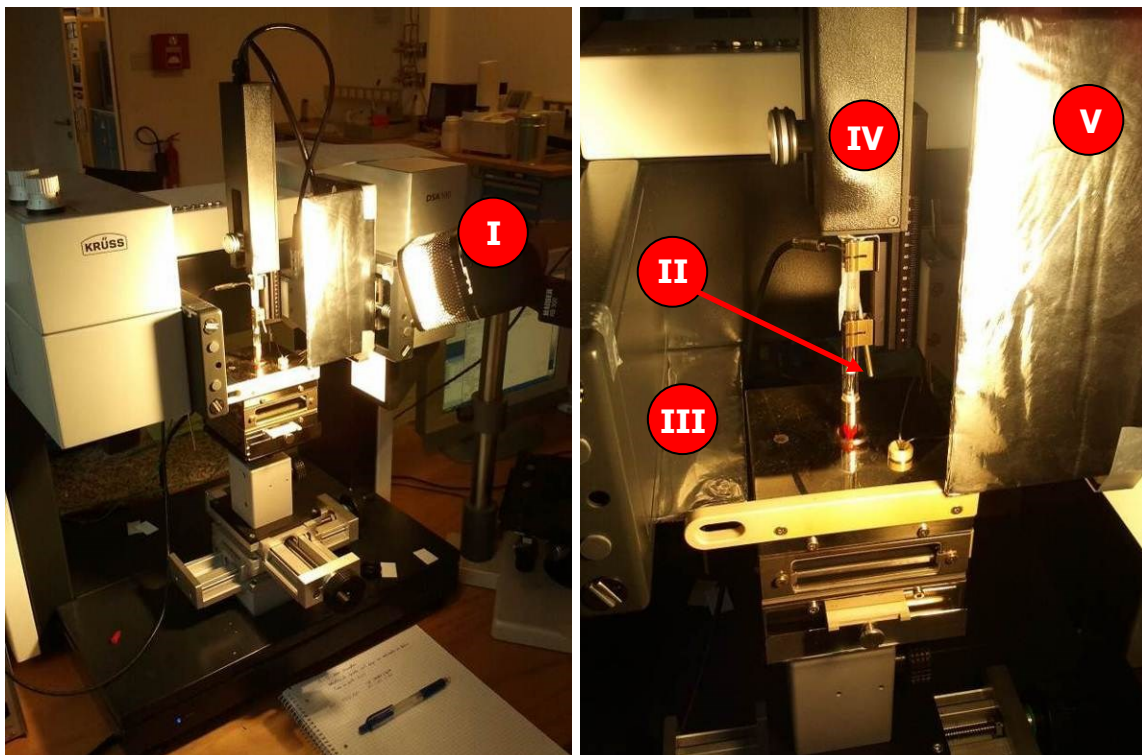


Abbildung 13: Kontaktwinkelmessgerät DSA100 (links), mit adaptiven Aufrüstungen gegen Licht- und Wärmestrahlung (rechts).

Der gesamte Messablauf wurde elektronisch in das DSA100 Messgerät programmiert und jede Einzelmessung vollautomatisch durchgeführt, um eine möglichst hohe Reproduzierbarkeit der Messungen zu gewährleisten.

#### 3.3.4 Spritzgießmaschine

Für die Reibwertversuche wurde als Spritzgießmaschine die HM 110/350H (Firma Wittmann Battenfeld GmbH, Kottlingbrunn/Österreich, siehe Abbildung 14) im Technikum des Lehrstuhls für Spritzgießen von Kunststoffen an der Montanuniversität Leoben verwendet. Bei dieser Spritzgießmaschine handelt es sich um eine 2-Komponenten Spritzgießmaschine mit einer Schließkraft von 1100 kN und einer horizontalen Spritzeinheit mit einer Schnecke mit einem Durchmesser von 35 mm. In Tabelle 7 sind die wesentlichen technischen Daten der Spritzgießmaschine zusammengefasst.



Abbildung 14: *Spritzgießmaschine Wittmann Battenfeld HM 110/350H.*

Tabelle 7: Technische Daten der Spritzgießmaschine Wittmann Battenfeld HM110/350H/130V.

Schließkraft	1100 kN
Schneckendurchmesser	35 mm
Spezifischer Spritzdruck	2083 bar
Rechnerisches Hubvolumen	169 cm <sup>3</sup>
L/D Verhältnis der Schnecke	22
Maximale Schneckendrehzahl	350 min <sup>-1</sup>
Schneckenweg	175 mm

#### 3.3.4.1 Reibwertwerkzeug und Funktionsprinzip

Für die Reibwertversuche wurde ein speziell für diesen Versuch entwickeltes Spritzgießwerkzeug verwendet (siehe Abbildung 15). Dieses Werkzeug ermöglicht es, Reibwertversuche während des Öffnungsvorganges im Spritzgießzyklus durchzuführen.

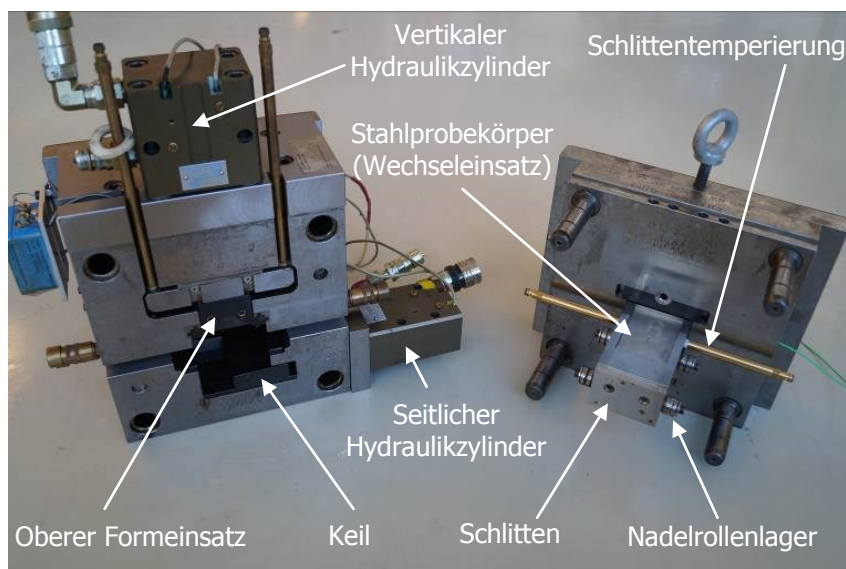


Abbildung 15: Spritzgießwerkzeug für die Reibwertuntersuchungen.

Für die Reibwertmessung wird zu Beginn der Kunststoff-Probekörper konventionell im Spritzgießverfahren hergestellt. Die Nachdruckumschaltung erfolgt über einen Forminnendrucksensor in der Werkzeugkavität. Der Kunststoff-Probekörper besitzt aufgrund der Werkzeugkontur auf seiner Oberseite ein Sägezahnprofil (siehe Abbildung 16).

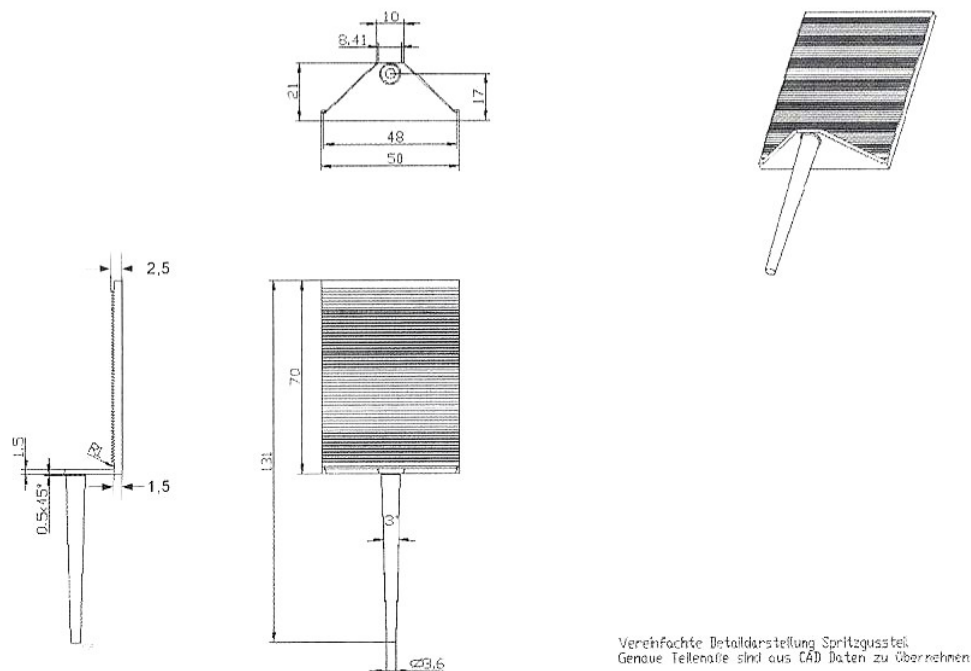


Abbildung 16: Kunststoff-Probekörper und Geometrie für Reibwertversuche [26].

Während der Kompressions-, Abkühl- und Entformungsphase können durch einen vertikal angeordneten Hydraulikzylinder Kräfte über den gezahnten Formeinsatz auf den Kunststoff-Probekörper übertragen werden. Damit kann ein Aufschumpfen des Formteils auf einen Kern, d.h. die Ausbildung von Kontaktdrücken aufgrund von Schrumpfeigenschaften, simuliert werden, wie es bei herkömmlichen Kunststoff-Bauteilen oft vorkommen kann. Mit dem Hydraulikzylinder sind Kontaktdrücke bis zu  $6,7 \text{ N/mm}^2$  realisierbar. Während des Öffnungsvorgangs des Werkzeuges wird der Kunststoff-Probekörper, für einen Öffnungsweg von 15 mm, mit einer konstanten Vertikalkraft beaufschlagt. Durch das Sägezahnprofil wird ein Durchrutschen des Probekörpers an der Oberseite während des Reibwertversuchs verhindert. Die Unterseite der Kavität besteht aus einem Schlitten, auf dem die diversen Stahl-Probekörper befestigt werden können. Der Schlitten ist düsenseitig an einer

Kraftmessdose befestigt, wodurch die Haft- und Reibkräfte gemessen und aufgezeichnet werden können. Am Schlitten sind seitlich Nadelrollenlager befestigt, die während der Messung auf, im Werkzeug befestigten, Leisten gleiten. Dadurch wird verhindert, dass ein durch die Vertikalkraft resultierendes Moment auf die Kraftmessdose die Messungen beeinflusst. Um die Nadelrollenlager während des Einspritzvorgangs nicht zu beschädigen, wird vor dem Einspritzen ein Keil unter den Schlitten gefahren, um diesen anzuheben, die Nadelrollen zu entlasten und zusätzlich die Kavität dabei abzudichten. Abbildung 17 zeigt die Schnittdarstellung des Haft- und Reibwertmesswerkzeuges mit den wichtigsten Komponenten.

Die Reibwertuntersuchungen wurden mit den Hydraulikdruckstufen 30 bar, 40 bar, 50 bar, 60 bar, 70 bar sowie 100 bar durchgeführt. Die Produktionsparameter/-daten sind in Tabelle 8 dargestellt. Bei beiden Materialien wurde forminnendruckabhängig bei 70 bar auf den Nachdruck umgeschaltet.

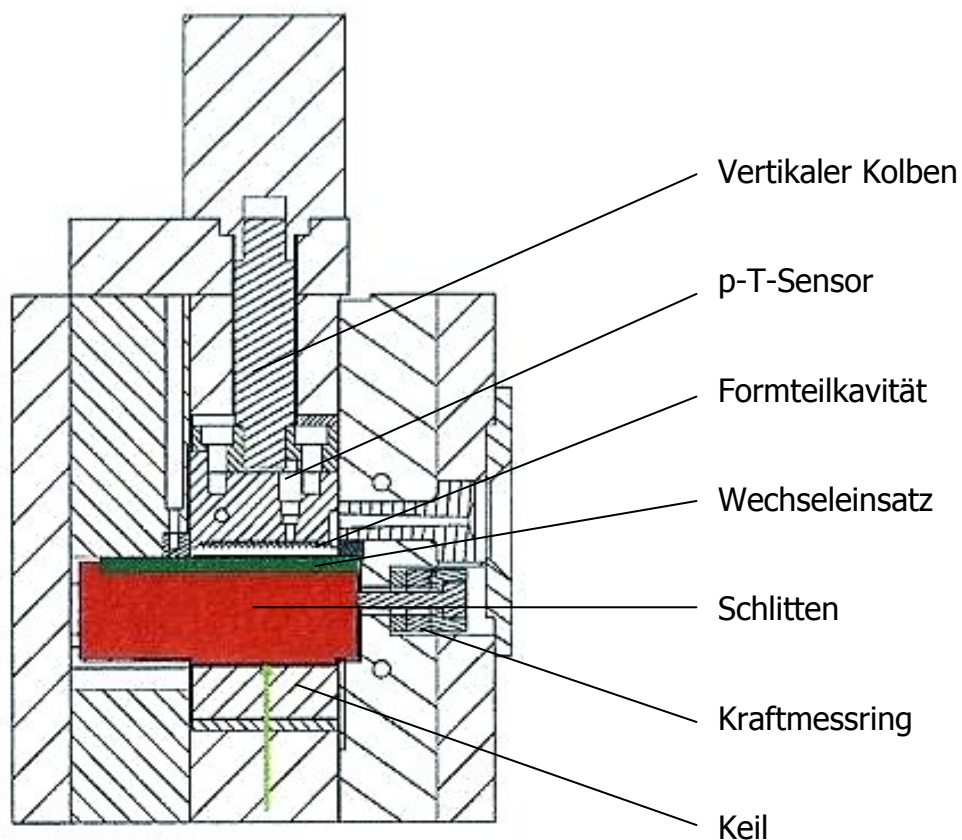


Abbildung 17: Schnittbild des Reibwertwerkzeugs [26].

*Tabelle 8: Produktionsparameter/-daten für die praktischen Reibwertuntersuchungen.*

		<b>PA6</b>	<b>PC</b>
<b>T<sub>zyl</sub></b>	<b>(°C)</b>	260/255/255/250	275/280/275/260
<b>T<sub>Vorlauf</sub></b>	<b>(°C)</b>	80	80
<b>Zykluszeit</b>	<b>(s)</b>	66,27	63,26
<b>Schließkraft</b>	<b>(kN)</b>	400	400
<b>Staudruck</b>	<b>(bar)</b>	25	25
<b>Nachdruck</b>	<b>(bar)</b>	350	400
<b>Nachdruckzeit</b>	<b>(s)</b>	10	10
<b>Kühlzeit</b>	<b>(s)</b>	15	15
<b>Öffnungsgeschwindigkeit</b>	<b>(mm/s)</b>	25	25

#### **3.3.4.2 Entnahmeroboter**

In vorherigen Arbeiten wurden die Kunststoff-Probekörper manuell entnommen, wodurch sich Unregelmäßigkeiten in der Zykluszeit ergaben. Jede Veränderung des Zyklus kann die Temperaturstabilität des Spritzgießprozesses beeinflussen. Um diese Einflussgröße auszuschließen, wurde für die Entnahme der Kunststoff-Probekörper ein Roboter, der Firma Kuka Roboter GmbH, Augsburg/Deutschland, verwendet (siehe Abbildung 18).

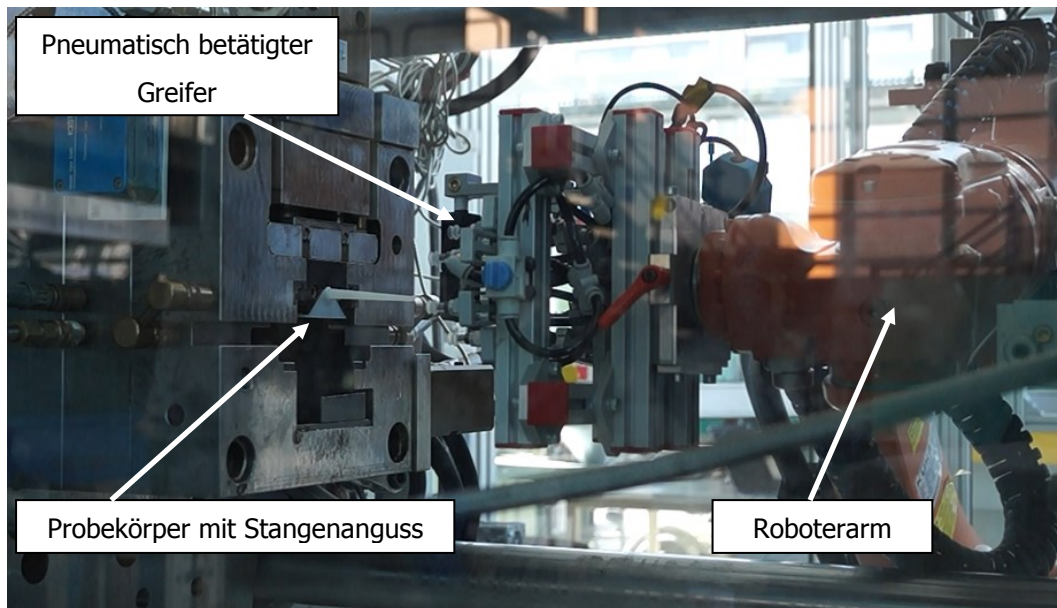


Abbildung 18: Entnahmesituation mit Roboter und pneumatisch betätigtem Greifer.

### 3.4 Versuchsplan und Auswertung

Die experimentellen Untersuchungen wurden systematisch wie folgt durchgeführt:

#### a) AFM-Messungen:

Zur Charakterisierung der Oberflächenrauigkeit der Stahlprobekörper sowie der beschichteten Probekörper, werden diese jeweils durch 5 Messungen bestimmt (siehe Abbildung 19).

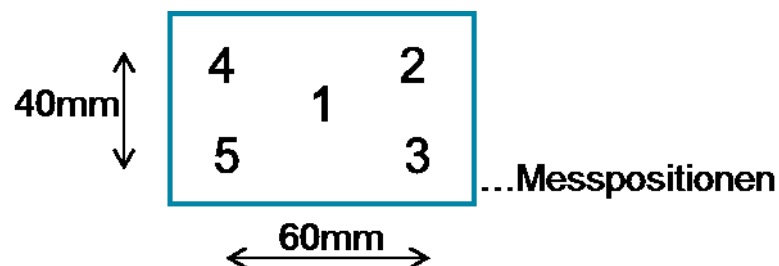


Abbildung 19: Verteilung der Messpositionen für die Oberflächencharakterisierung.

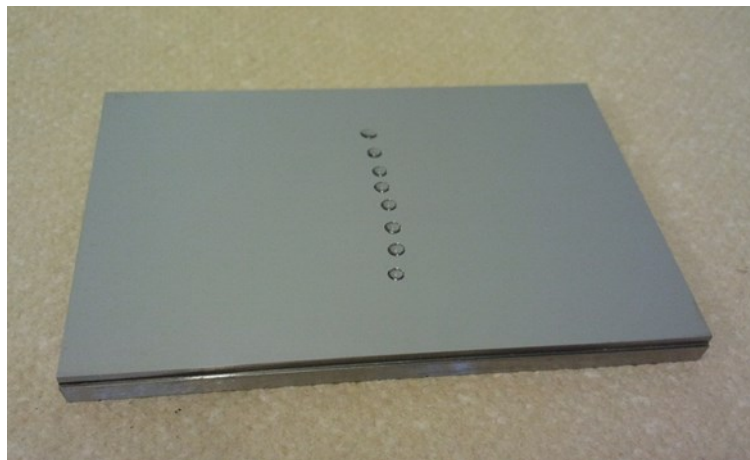
#### b) FRT-Messungen:

Messung der Ebenheit der Probekörper, um die Vergleichbarkeit der Reibwertverläufe garantieren zu können. Dazu werden Rastermessungen über

die gesamte Probekörperfläche durchgeführt und die maximale Höhendifferenz ermittelt.

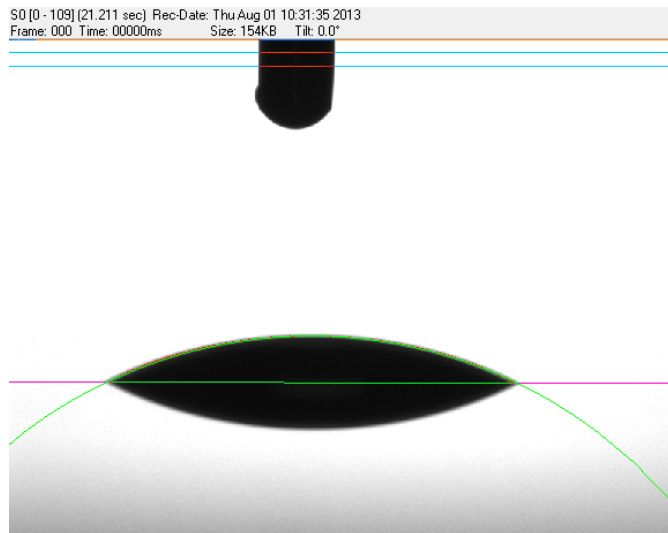
#### **c) Kontaktwinkelmessungen:**

Messung der Kontaktwinkel mit zwei verschiedenen Testflüssigkeiten bei den Temperaturen 40°C, 60°C, 85°C, 110°C, 135°C, 160°C, 185°C und 200°C. Als Fitmethode, zur Bestimmung der Tropfengeometrie, wurde aus der Software für die Temperaturen 40°C - 160°C die *sessile drop* Methode verwendet. Für die Temperaturen 185°C und 200°C wurde die Methode *circle fitting* angewendet, da sich diese Methode laut Krüss GmbH besser für niedrige Kontaktwinkel ( $<30^\circ$ ) eignet. Die Kontaktwinkelmessungen wurden aufgrund der baulichen Gegebenheiten der Hochtemperaturkammer ausschließlich in der Mitte der Probekörper mit jeweils 6-8 Messungen durchgeführt (siehe Abbildung 20). Abbildung 21 zeigt die Messung eines Kontaktwinkels mit automatischer Auswertung.



*Abbildung 20: Darstellung der Messpositionen der Kontaktwinkelmessungen auf einem Probekörper.*





*Abbildung 21: Automatische Kontaktwinkelmessung mittels Software von BrNa auf einer CrC/a-C:H Beschichtung bei 85°C.*

#### **d) Charakterisierung der Polymere:**

Für die Ermittlung der Grenzflächenspannung zu den Stahlprobekörpern sowie den beschichteten Probekörpern ist es notwendig, den polaren- und dispersen Anteil der Oberflächenenergie der Polymere zu bestimmen. Dazu werden mittels Spritzgießen Probepplatten hergestellt und auf diesen mittels der beiden Testflüssigkeiten temperaturabhängig die Kontaktwinkel bestimmt. Anschließend werden die Oberflächenenergien, wie in Kapitel 2.2.1.3 beschrieben, ermittelt.

#### **e) Auswertung der Kontaktwinkelmessungen:**

Mit den gemessenen Kontaktwinkeln werden wie in Kapitel 2.2.1.3 beschrieben, die Oberflächenenergien der Stähle, der Beschichtungen und der Kunststoffe temperaturabhängig berechnet.

#### **f) Ermittlung der Grenzflächenspannung:**

Mit den gewonnenen Ergebnissen wird mittels der Gleichung ( 4 ) auf Seite 10 die Grenzflächenspannung für die jeweilige Stahl/Polymer- bzw. Beschichtung/Polymer-Kombination berechnet. Mit dem Kehrwert dieser berechneten Grenzflächenspannungen soll eine Vorhersage des Reibverhaltens zwischen Kunststoffbauteil und (beschichteter) Stahl-Werkzeugoberfläche möglich sein.

**g) Reibwertversuche:**

Um das vorhergesagte Reibverhalten überprüfen zu können, werden Reibwertversuche, wie in Kapitel 3.3.4.1 beschrieben, durchgeführt. Abbildung 22 zeigt den symbolischen Reibwertversuch mit den auftretenden Parametern.

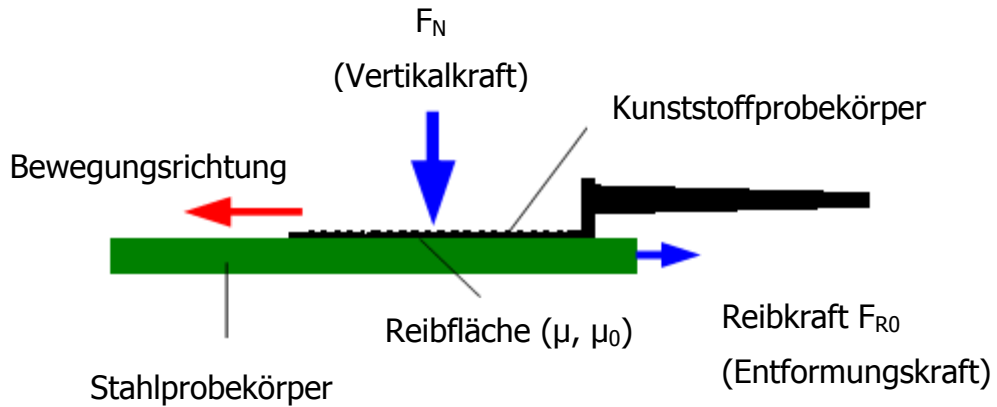


Abbildung 22: Symbolische Darstellung des Reibwertversuches [5].

Abbildung 23 zeigt einen symbolischen Reibkraftverlauf, woraus der resultierende Haftreibwert  $\mu_0$  mittels Gleichung ( 13 ) berechnet wird.

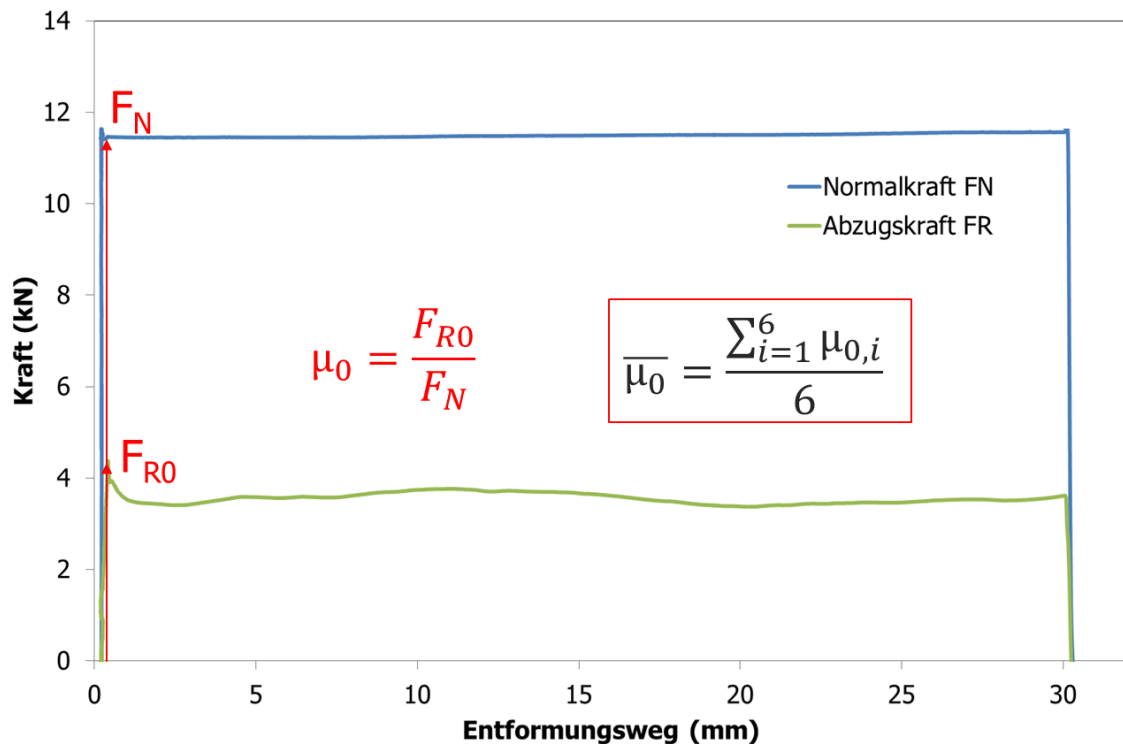


Abbildung 23: Beispielhafter Reibkraftverlauf über den Entformungsweg [5].

$$\mu_0 = \frac{F_{R0}}{F_N} \quad (13)$$

$F_{R0}$  ... Horizontale Haftreibungskraft (N),

$F_N$  ... Vertikale Normalkraft (N),

$\mu_0$  ... Haftreibungswert (-) und

$\overline{\mu_0}$  ... mittlerer Haftreibungswert (-) aus 6 Messzyklen.

Der mittlere Haftreibungswert  $\overline{\mu_0}$  wird anschließend aus dem arithmetischen Mittelwert von sechs Messungen gebildet.

## 4 Ergebnisse und Interpretation

Dieses Kapitel behandelt alle Ergebnisse, welche während dieser Diplomarbeit erarbeitet wurden.

### 4.1 Oberflächenrauigkeiten

In diesem Kapitel werden alle Ergebnisse aus den AFM-Messungen der verschiedenen Stahloberflächen und beschichteten Oberflächen erläutert. In Tabelle 9 sind die Mittelwerte der arithmetischen Mittenrauwerte und die Mittelwerte der quadratischen Mittenrauwerte der Stahlprobekörper sowie der beschichteten Probekörper aufgelistet. Die beschichteten Oberflächen weisen aufgrund ihrer Herstellung höhere Rauigkeitswerte auf als die unbeschichteten. Der Einfluss der Rauigkeiten auf das Reibverhalten kann somit nicht außer Acht gelassen werden.

*Tabelle 9: Übersicht über die Ergebnisse aus den AFM-Messungen der verschiedenen Oberflächen.*

<b>Oberfläche</b>	<b>sRa (nm)</b>	<b>sRMS (nm)</b>
M268 VMR unbeschichtet	4,93 ± 0,88	6,34 ± 1,04
M303 unbeschichtet	3,96 ± 0,41	5,15 ± 0,52
M333 IP unbeschichtet	9,47 ± 1,27	12,51 ± 1,78
MoN	12,82 ± 1,22	23,38 ± 3,48
CrC/a-C:H	14,78 ± 1,23	20,98 ± 3,53
CrN	19,56 ± 1,01	24,74 ± 1,36

### M268 VMR unbeschichtet

In Tabelle 10 sind die Rauigkeitswerte des unbeschichteten M268 VMR mit den jeweiligen Messpositionen angeführt. In Abbildung 24 sind die 2D- und 3D-Topographiebilder der Messposition 1 dargestellt. Diese zeigen ein gleichmäßiges Polierbild.

Tabelle 10: Ergebnisse der Rauigkeitsmessungen von M268 VMR unbeschichtet.

Messposition	sRa (nm)	sRMS (nm)
1	4,9	6,6
2	5,1	6,6
3	6,48	8,02
4	4,1	5,28
5	4,08	5,19
Mittelwert	4,93 ± 0,88	6,34 ± 1,04

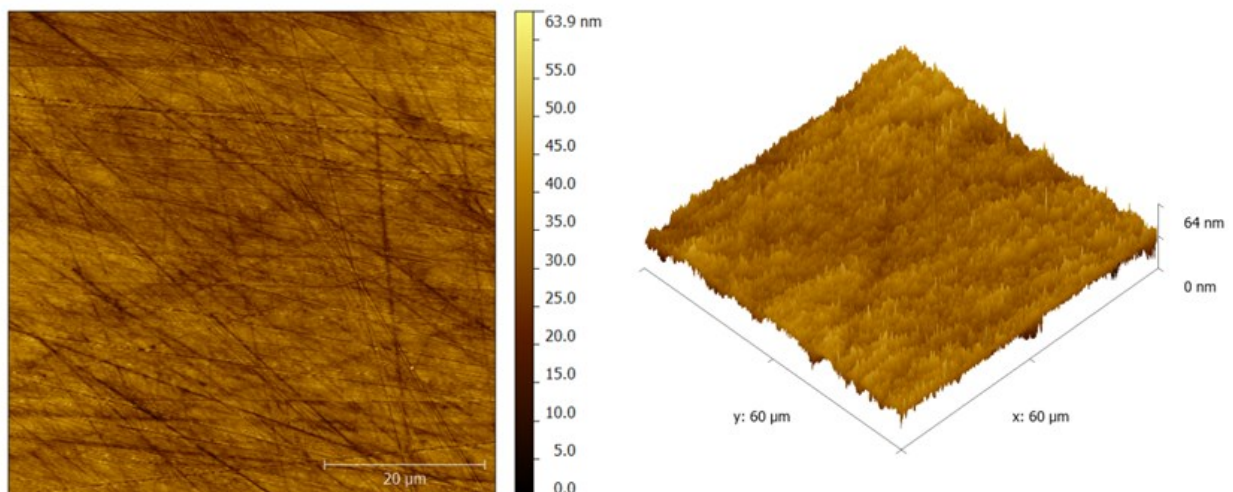


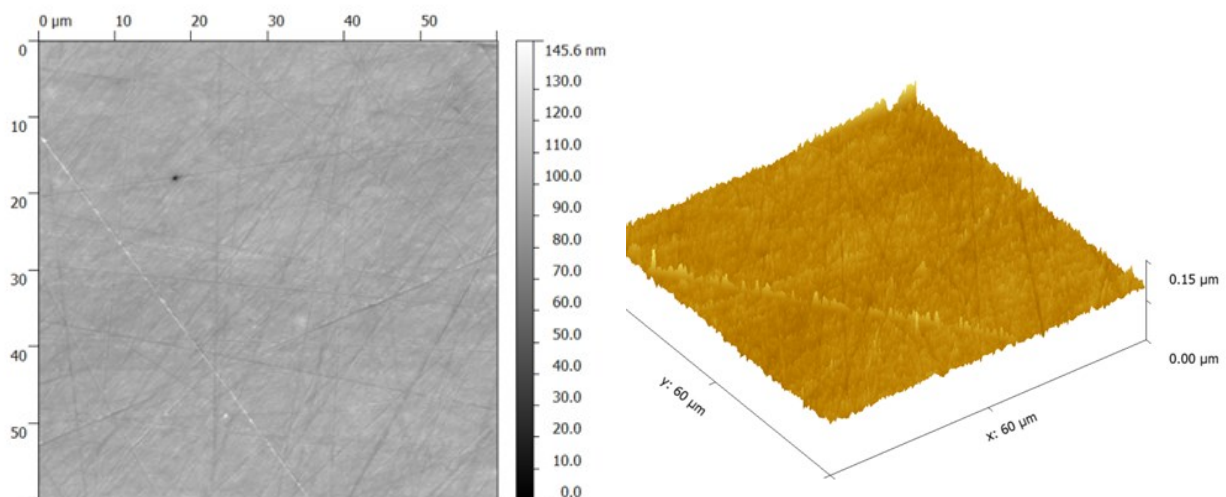
Abbildung 24: M268 VMR unbeschichtet als 2D-Topographiebild (links) und 3D-Topographiebild (rechts).

### M303 unbeschichtet

In Tabelle 11 sind die Rauigkeitswerte des unbeschichteten M303 mit den jeweiligen Messpositionen angeführt. In Abbildung 25 sind die 2D- und 3D-Topographiebilder der Messposition 1 dargestellt. Diese zeigen ebenfalls ein gleichmäßiges Polierbild.

*Tabelle 11: Ergebnisse der Rauigkeitsmessungen von M303 unbeschichtet.*

Messposition	sRa (nm)	sRMS (nm)
1	3,5	4,6
2	4,7	6,1
3	3,89	5,12
4	3,99	5,21
5	3,7	4,74
Mittelwert	3,96 ± 0,41	5,15 ± 0,52



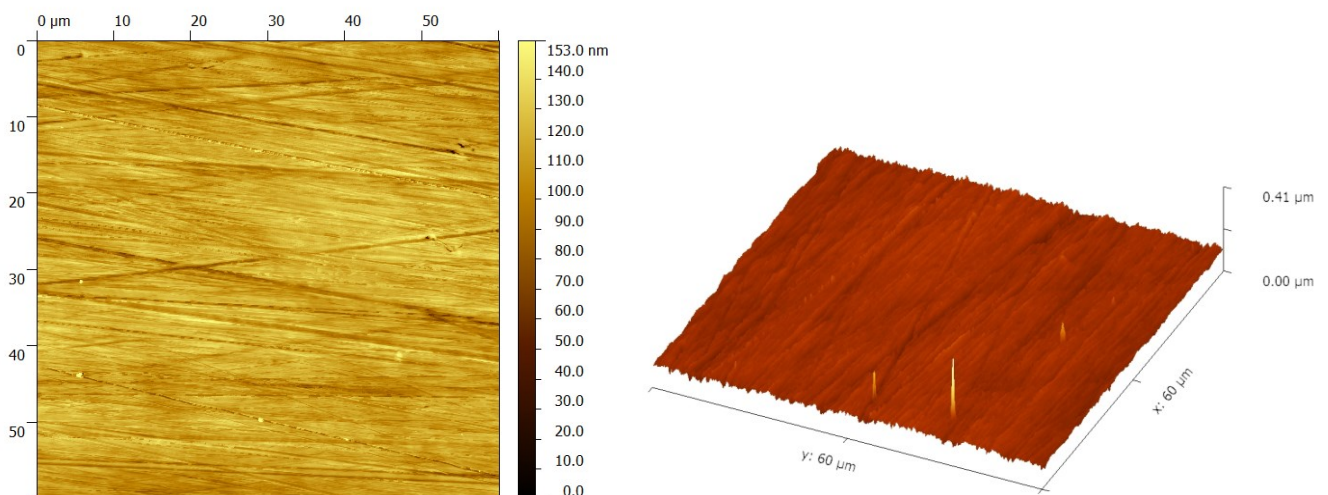
*Abbildung 25: M303 unbeschichtet als 2D-Topographiebild (links) und 3D-Topographiebild (rechts).*

### M333 IP unbeschichtet

In Tabelle 12 sind die Rauigkeitswerte des unbeschichteten M333 IP mit den jeweiligen Messpositionen angeführt. In Abbildung 26 sind die 2D- und 3D-Topographiebilder der Messposition 1 dargestellt. Diese zeigen ein gleichmäßiges Polierbild.

*Tabelle 12: Ergebnisse der Rauigkeitsmessungen von M333 IP unbeschichtet.*

Messposition	sRa (nm)	sRMS (nm)
1	10,80	13,90
2	10,50	13,80
3	10,00	14,00
4	8,70	11,30
5	7,38	9,57
Mittelwert	9,48 ± 1,27	12,51 ± 1,78



*Abbildung 26: M333 IP unbeschichtet als 2D-Topographiebild (links) und 3D-Topographiebild (rechts).*

## MoN

In Tabelle 13 sind die Rauigkeitswerte des mit Molybdänitrid beschichteten M333 IP mit den jeweiligen Messpositionen angeführt. In Abbildung 27 sind die 2D- und 3D-Topographiebilder der Messposition 1 dargestellt. Diese zeigen teilweise kraterähnliche Vertiefungen, die durch die Aufbringung der Beschichtung entstanden sind.

Tabelle 13: Ergebnisse der Rauigkeitsmessungen von MoN.

Messposition	sRa (nm)	sRMS (nm)
1	14,60	22,90
2	12,00	29,00
3	13,90	21,90
4	12,20	24,70
5	11,40	18,40
Mittelwert	12,82 ± 1,22	23,38 ± 3,48

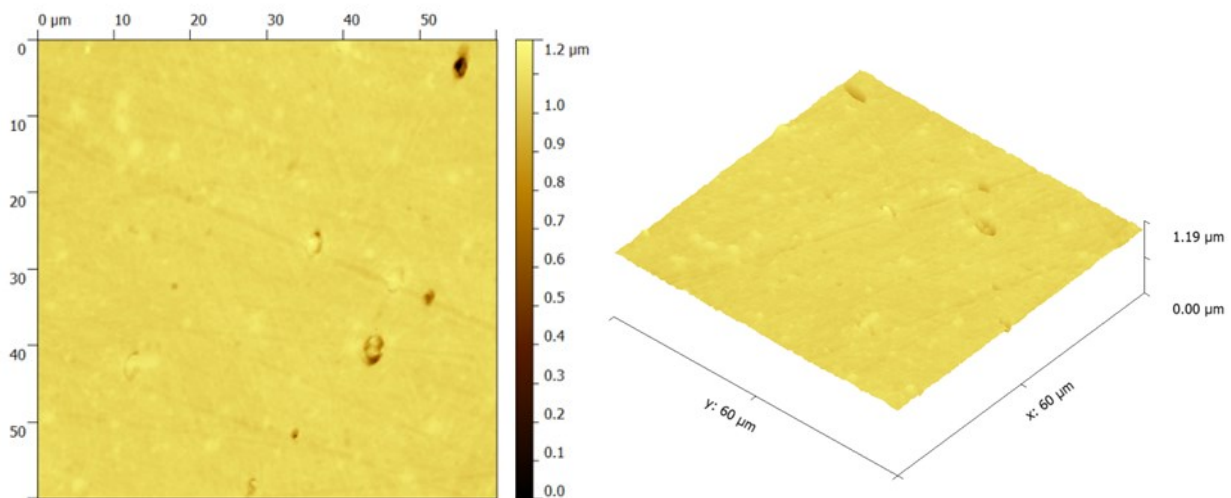


Abbildung 27: MoN als 2D-Topographiebild (links) und 3D-Topographiebild (rechts).



## CrN

In Tabelle 14 sind die Rauigkeitswerte des mit Chromnitrid beschichteten M333 IP mit den jeweiligen Messpositionen angeführt. In Abbildung 28 sind die 2D- und 3D-Topographiebilder der Messposition 1 dargestellt. Diese zeigen eine wesentlich rauere Oberfläche, die durch die Aufbringung der Beschichtung entstanden ist.

Tabelle 14: Ergebnisse der Rauigkeitsmessungen von CrN.

Messposition	sRa (nm)	sRMS (nm)
1	20,60	26,30
2	18,60	23,40
3	20,90	26,40
4	18,50	23,30
5	19,20	24,30
Mittelwert	19,56 ± 1,01	24,74 ± 1,36

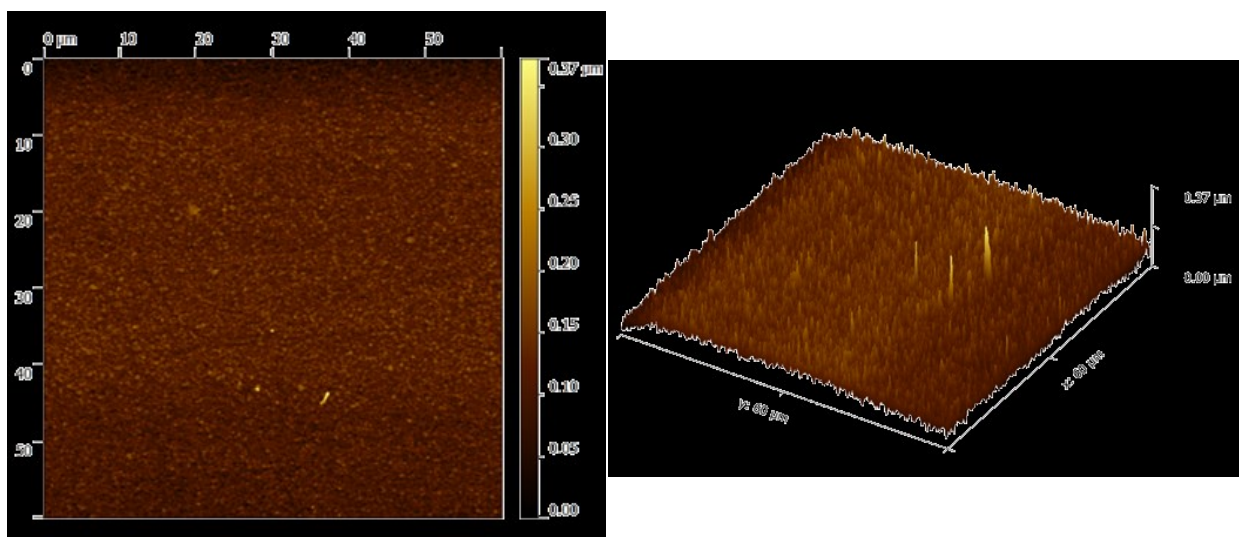


Abbildung 28: CrN als 2D-Topographiebild (links) und 3D-Topographiebild (rechts).

### CrC/a-C:H

In Tabelle 15 sind die Rauigkeitswerte der mit CrC/a-C:H beschichteten M333 IP Probe mit den jeweiligen Messpositionen angeführt. In Abbildung 29 sind die 2D- und 3D-Topographiebilder der Messposition 1 dargestellt. Diese zeigen eine wesentlich rauere Oberfläche, die durch die Aufbringung der Beschichtung entstanden ist. Die einzelnen Spitzen haben keinen Einfluss auf die Rauigkeitswerte, da sie eine verhältnismäßig kleine Fläche aufweisen.

Tabelle 15: Ergebnisse der Rauigkeitsmessungen von CrC/a-C:H.

Messposition	sRa (nm)	sRMS (nm)
1	14,40	19,60
2	15,50	27,30
3	15,20	20,40
4	12,60	16,50
5	16,20	21,10
Mittelwert	14,78 ± 1,23	20,98 ± 3,53

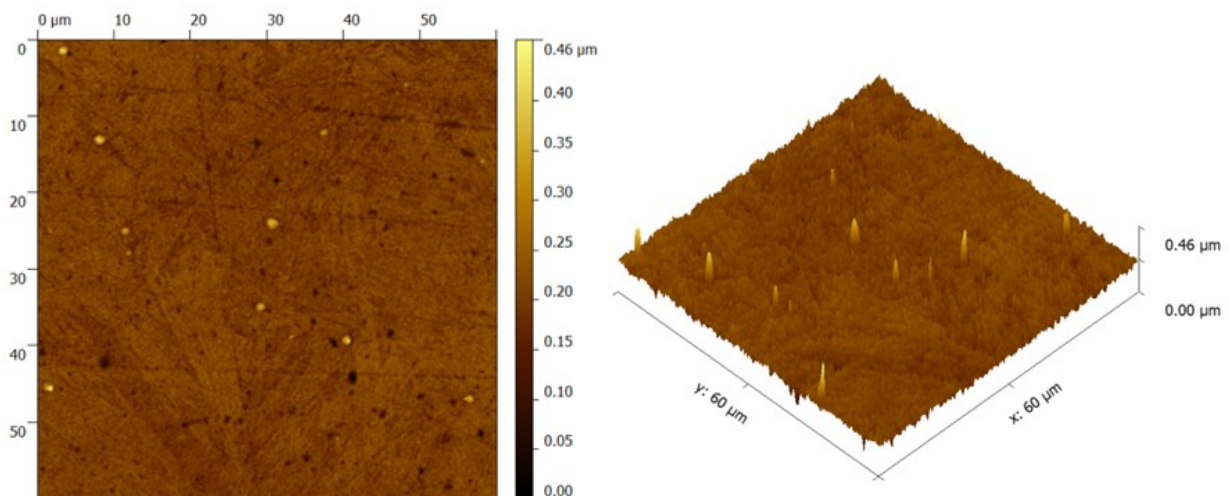


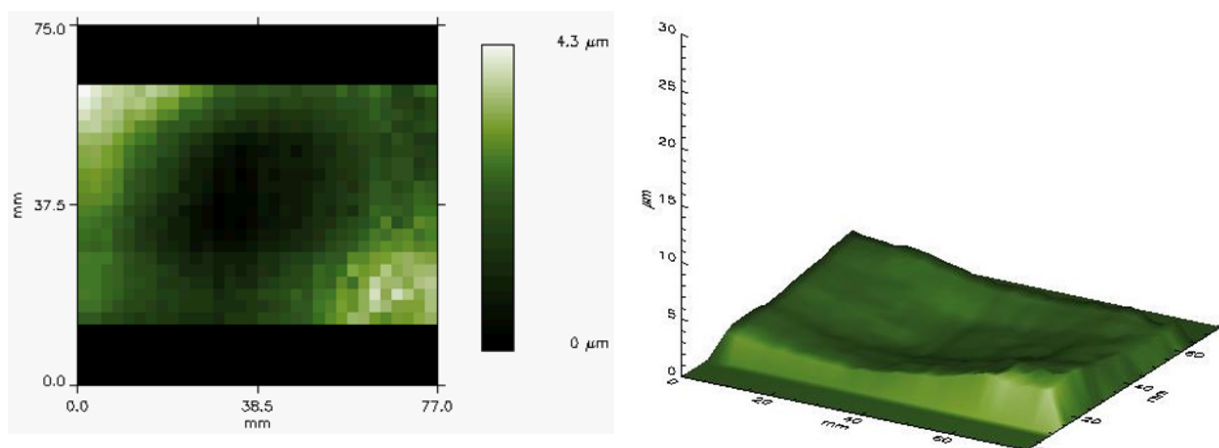
Abbildung 29: CrC/a-C:H als 2D-Topographiebild (links) und 3D-Topographiebild (rechts).

### 4.2 Ebenheit – FRT Messungen

In diesem Kapitel werden alle Ergebnisse aus den FRT-Messungen der verschiedenen Stahloberflächen und beschichteten Oberflächen erläutert. Die FRT-Messungen wurden durchgeführt, um die Ebenheit der Probekörper zu überprüfen und damit die Vergleichbarkeit der Reibwertverläufe zu garantieren. Die gemessene maximale Höhendifferenz eines jeden Prüfkörpers wurde durch Rücksprache mit Oerlikon Balzers AG und Böhler Edelstahl GmbH & Co KG für hochglanzpolierte Oberflächen als zulässig erklärt.

#### M268 VMR unbeschichtet

Abbildung 30 zeigt die Ebenheit der Probekörperoberfläche des unbeschichteten M268 VMR aus der Rastermessung. Daraus ist die maximale Höhendifferenz von 4,3  $\mu\text{m}$  ersichtlich.



*Abbildung 30: 2D-Darstellung der Rastermessung (links), 3D-Darstellung der Rastermessung (rechts) des unbeschichteten M268 VMR.*

#### M303 unbeschichtet

Abbildung 31 zeigt die Ebenheit der Probekörperoberfläche des unbeschichteten M303 aus der Rastermessung. Die maximale Höhendifferenz von 10  $\mu\text{m}$  ist für hochglanzpolierte Oberflächen zulässig und kann aus Abbildung 31 abgelesen werden.

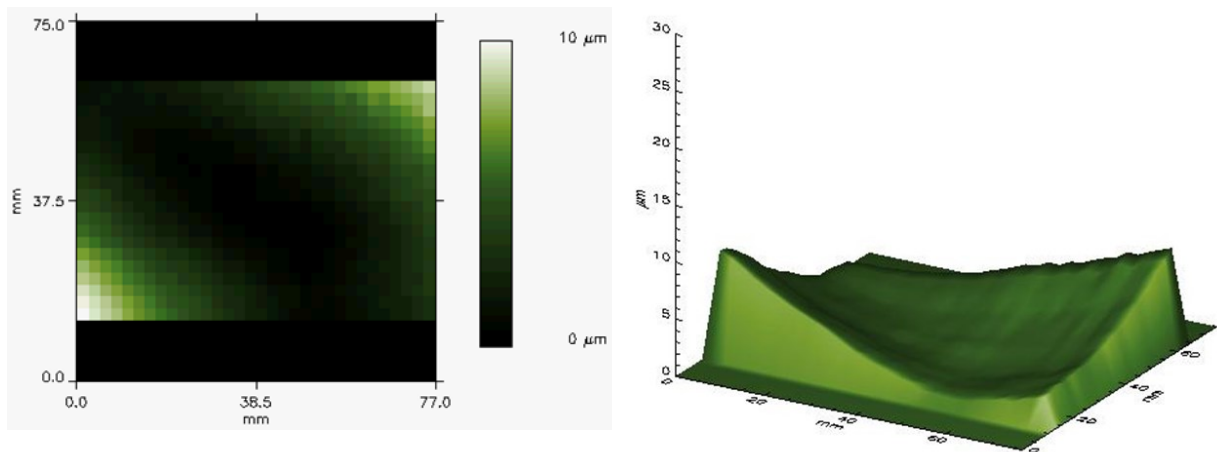


Abbildung 31: 2D-Darstellung der Rastermessung (links), 3D-Darstellung der Rastermessung (rechts) des unbeschichteten M303.

#### M333 IP unbeschichtet

Abbildung 32 zeigt die Ebenheit der Probekörperoberfläche des unbeschichteten M333 IP aus der Rastermessung. Daraus ist die maximale Höhendifferenz von 19 µm ersichtlich, welche für hochglanzpolierte Oberflächen zulässig ist. Der gewölbte Oberflächenverlauf resultiert aus dem Poliervorgang und ist ebenso zulässig.

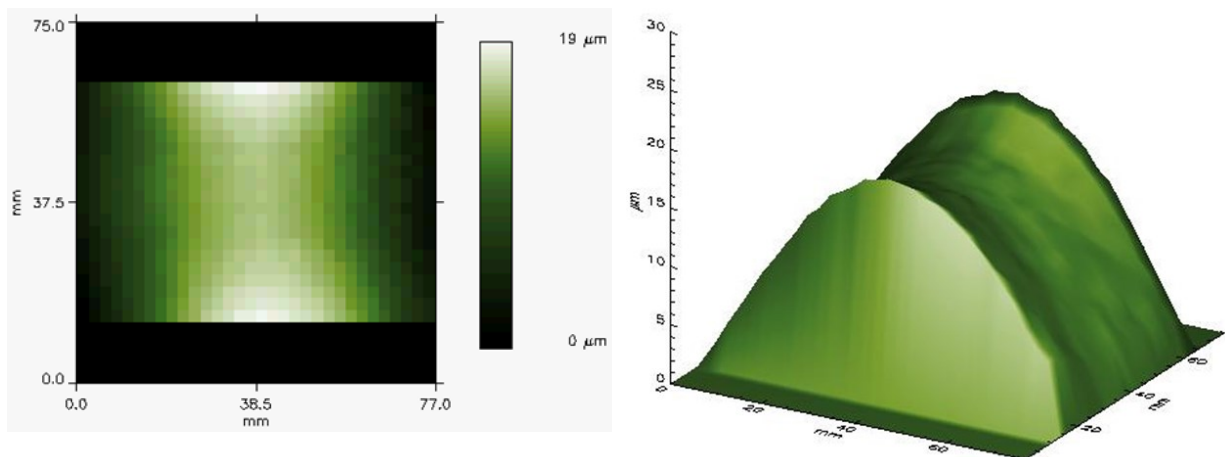


Abbildung 32: 2D-Darstellung der Rastermessung (links), 3D-Darstellung der Rastermessung (rechts) des unbeschichteten M333 IP.

#### MoN

Abbildung 33 zeigt die Ebenheit der Probekörperoberfläche des mit MoN beschichteten M333 IP aus der Rastermessung. Die maximale Höhendifferenz von

17  $\mu\text{m}$  und der auch hier auftretende gewölbte Oberflächenverlauf, welcher aus dem Poliervorgang resultiert, sind für hochglanzpolierte Oberflächen zulässig.

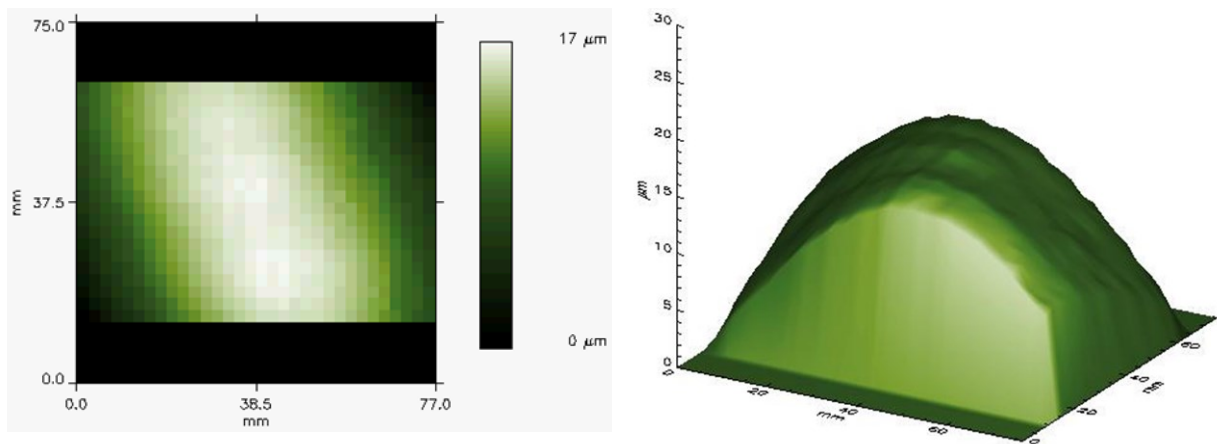


Abbildung 33: 2D-Darstellung der Rastermessung (links), 3D-Darstellung der Rastermessung (rechts) der MoN-Beschichtung.

#### CrN

Abbildung 34 zeigt die Ebenheit der Probekörperoberfläche des mit CrN beschichteten M333 IP aus der Rastermessung. Hier ist die ebenfalls tolerierbare Höhendifferenz von 15  $\mu\text{m}$  ersichtlich.

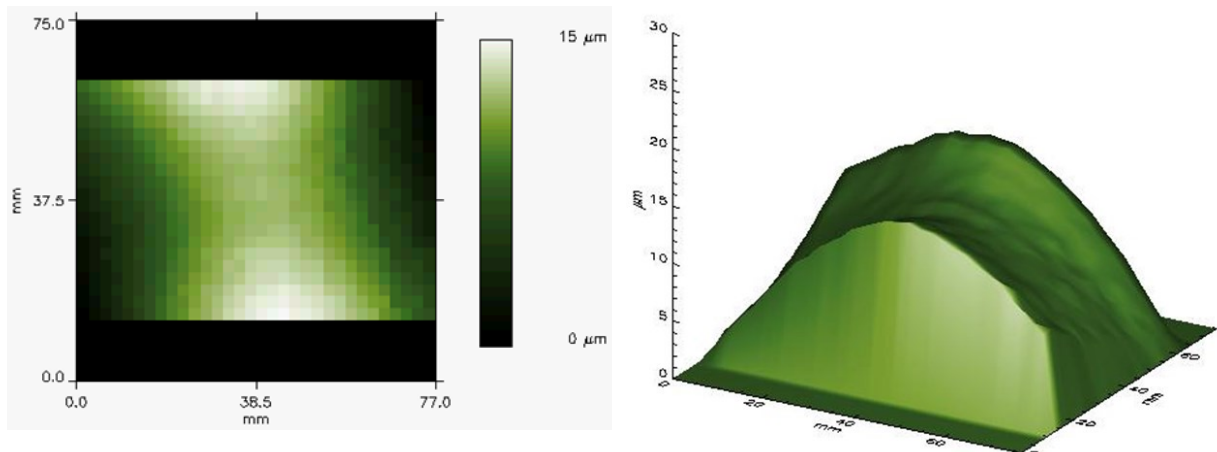


Abbildung 34: 2D-Darstellung der Rastermessung (links), 3D-Darstellung der Rastermessung (rechts) der CrN-Beschichtung.

### CrC/a-C:H

Abbildung 35 zeigt die Ebenheit der Probekörperoberfläche des mit CrC/a-C:H beschichteten M333 IP aus der Rastermessung. Daraus ist die maximale Höhendifferenz von 16  $\mu\text{m}$  ersichtlich, welche für hochglanzpolierte Oberflächen zulässig ist. Der aus dem Poliervorgang resultierende gewölbte Oberflächenverlauf ist ebenso zulässig.

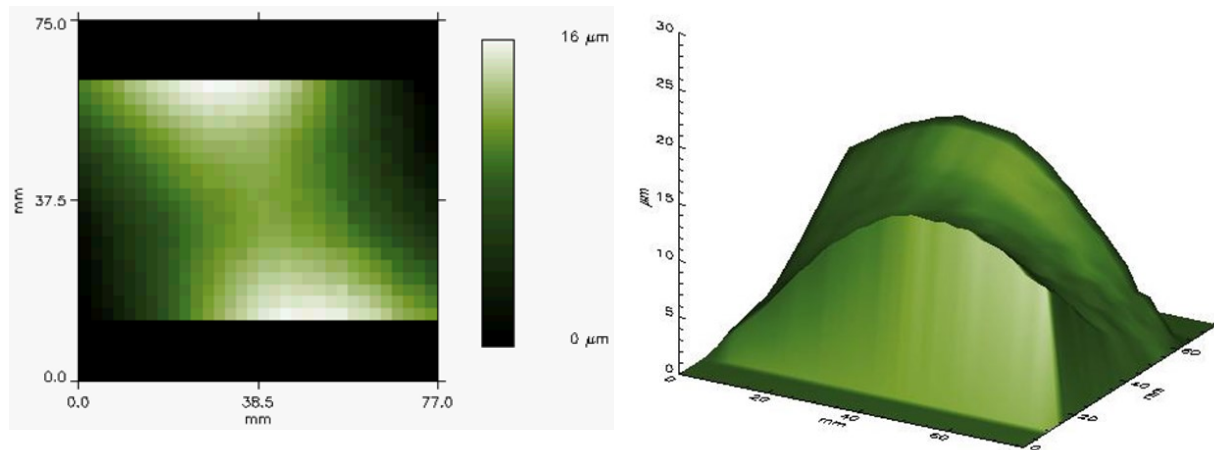


Abbildung 35: 2D-Darstellung der Rastermessung (links), 3D-Darstellung der Rastermessung (rechts) der CrC/a-C:H-Beschichtung.

### 4.3 Benetzungseigenschaften der Polymere

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen sowie die daraus resultierenden Oberflächenenergien der verwendeten Polymere erläutert. Die Messungen wurden für jede Temperatur auf neuen Kunststoff-Probeplatten durchgeführt, um Einflüsse wie Anquellen des Kunststoffes, Änderung des chemischen Oberflächenzustandes während des Aufheizvorgangs bis 160°C sowie Bauteilverzug durch Relaxation von eingefrorenen Spannungen möglichst auszuschließen. Die Kontaktwinkel wurden alle nach der Methode *circle fitting* ausgewertet, da sich diese Methode laut Krüss GmbH besser für niedrige Kontaktwinkel (<30°) eignet. Obwohl auch Kontaktwinkel größer 30° gemessen wurden, wurde diese Fitmethode für alle Temperaturen beibehalten, um keinen zusätzlichen Einfluss unterschiedlicher Auswertemethoden in die Ergebnisse einzubringen.

##### 4.3.1 Polycarbonat Makrolon 2407

In Abbildung 36 sind die Kontaktwinkel von Ethylencarbonat auf den PC-Probepplatten bei den verschiedenen Temperaturen dargestellt. Es ist der Trend zu beobachten, dass die Kontaktwinkel mit zunehmender Temperatur steigen. Der Ausreißer bei 60°C ist reproduzierbar, die Ursache ist nicht bekannt. Möglicherweise wird der Ausreißer durch das Verdampfen zuvor adhrierender Feuchtigkeit bei dieser Temperatur verursacht.

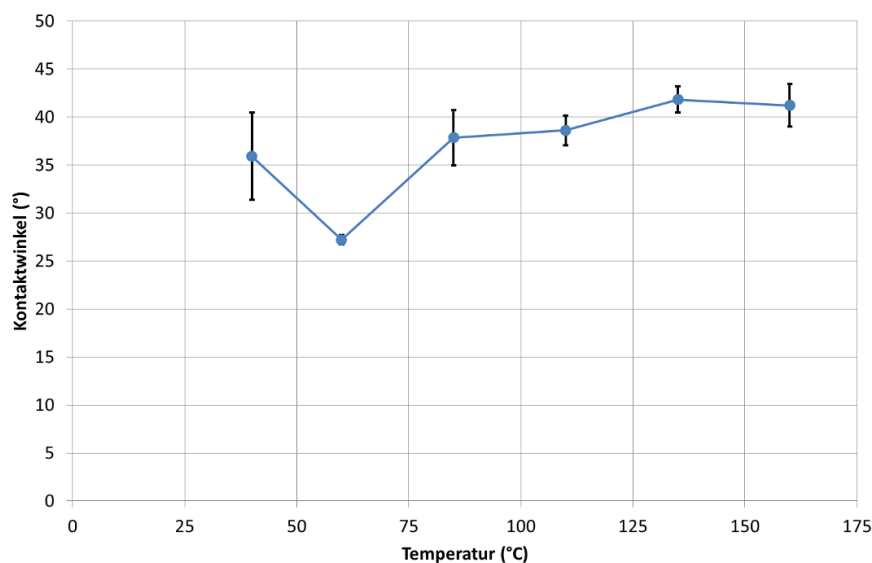


Abbildung 36: Kontaktwinkel von Ethylencarbonat auf PC-Probepplatten bei verschiedenen Temperaturen.

In Abbildung 37 sind die Kontaktwinkel von Bromonaphthalin auf den PC-Probepplatten bei den verschiedenen Temperaturen dargestellt. Die Kontaktwinkel steigen mit zunehmender Temperatur bis 85°C an und fallen anschließend wieder ab. Dieses Phänomen wurde noch nicht geklärt, wurde aber durch wiederholte Messungen bestätigt.

Mit den gemessenen Kontaktwinkeln wurde die Oberflächenenergie von Polycarbonat in Abhängigkeit der Temperatur berechnet und in Abbildung 38 dargestellt. Mit steigender Temperatur sinkt die Oberflächenenergie  $\sigma_s$  sowie deren polarer Anteil  $\sigma_s^P$  und disperser Anteil  $\sigma_s^D$ . Da die Oberflächenenergien aus Abbildung 38 keinen linearen Zusammenhang zeigen, wurde zur Beschreibung ein Polynom 2. Ordnung

#### 4. Ergebnisse und Interpretation

verwendet. Die niedrigen Standardabweichungen zeigen, dass die Versuche reproduzierbar sind.

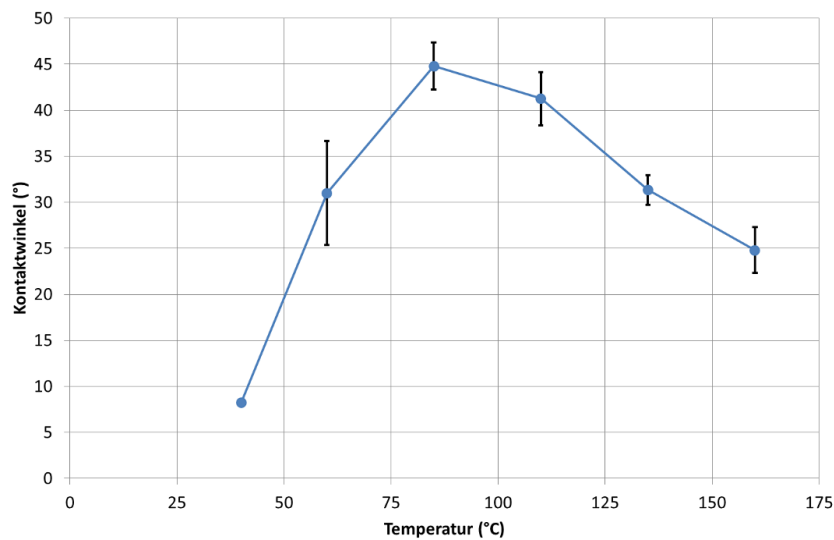


Abbildung 37: Kontaktwinkel von Bromonaphthalin auf PC-Probepplatten bei verschiedenen Temperaturen.

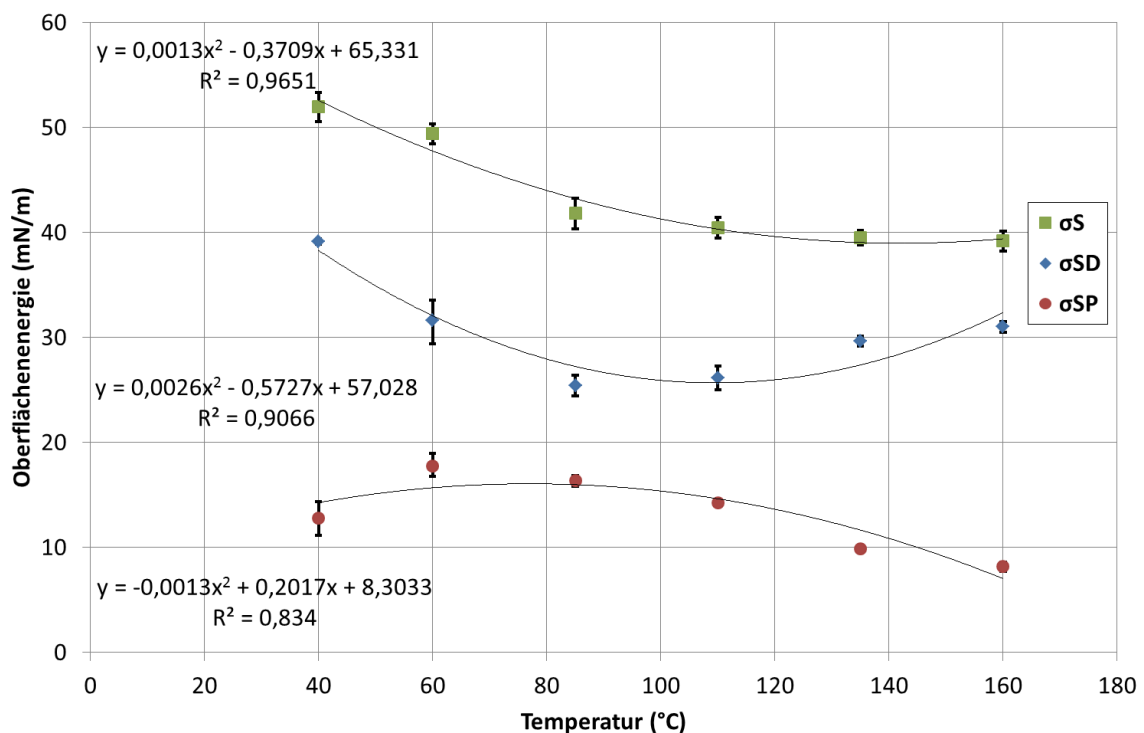
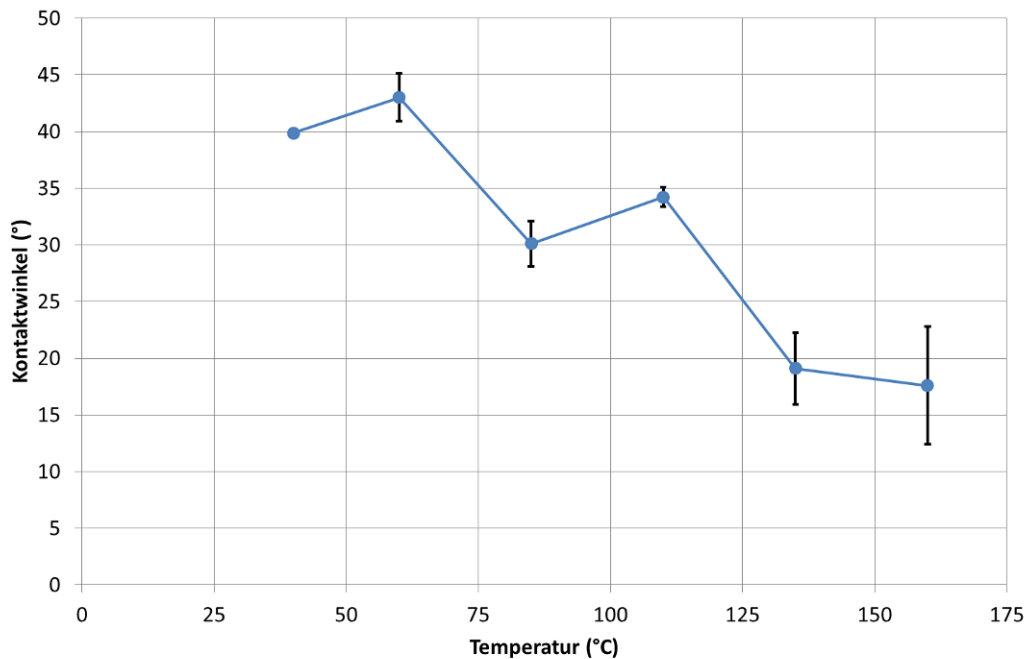


Abbildung 38: Oberflächenenergie von PC Makrolon in Abhängigkeit der Temperatur.



### 4.3.2 Polyamid Durethan B30S

In Abbildung 39 sind die Kontaktwinkel von Ethylencarbonat auf den PA6-Probeplatten bei den verschiedenen Temperaturen dargestellt. Es ist der Trend zu beobachten, dass die Kontaktwinkel mit zunehmender Temperatur sinken.



*Abbildung 39: Kontaktwinkel von Ethylencarbonat auf PA6-Probeplatten bei verschiedenen Temperaturen.*

In Abbildung 40 sind die Kontaktwinkel von Bromonaphthalin auf den PA6-Probeplatten bei den verschiedenen Temperaturen dargestellt. Die Kontaktwinkel von Bromonaphthalin sind über alle Temperaturen weitestgehend konstant.

Mit den gemessenen Kontaktwinkeln wurde die Oberflächenenergie von Polyamid6 in Abhängigkeit der Temperatur berechnet und in Abbildung 41 dargestellt. Mit steigender Temperatur nimmt die Oberflächenenergie  $\sigma_s$  und deren disperser Anteil  $\sigma_s^D$  ab. Der polare Anteil  $\sigma_s^P$  steigt hingegen mit zunehmender Temperaturen. Die niedrigen Standardabweichungen zeigen, dass die Versuche reproduzierbar sind.

#### 4. Ergebnisse und Interpretation

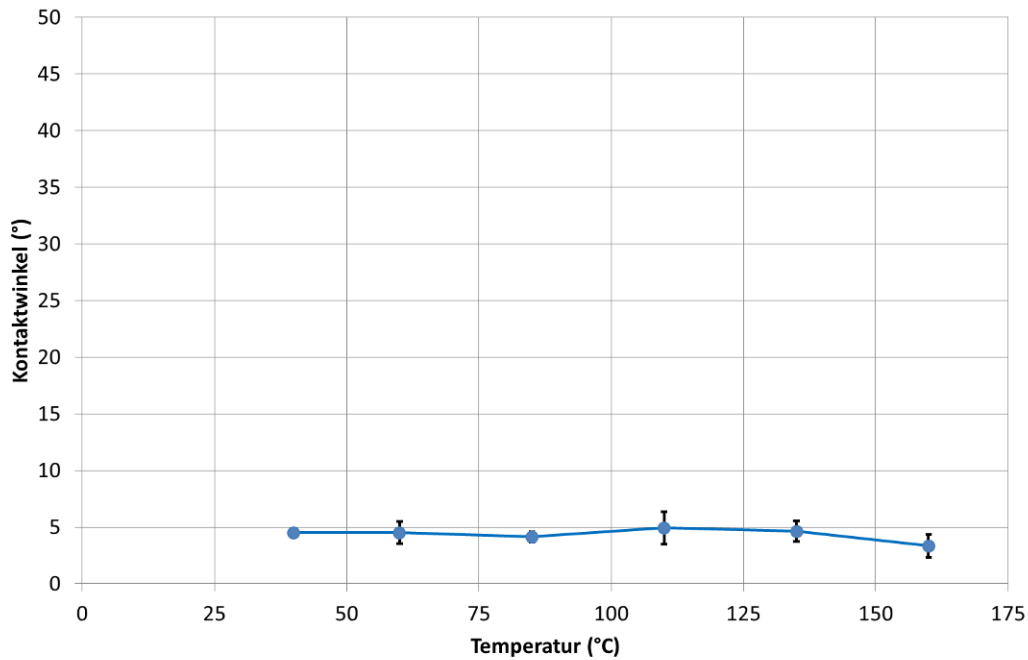


Abbildung 40: Kontaktwinkel von Bromonaphthalin auf PA6-Probeplatten bei verschiedenen Temperaturen.

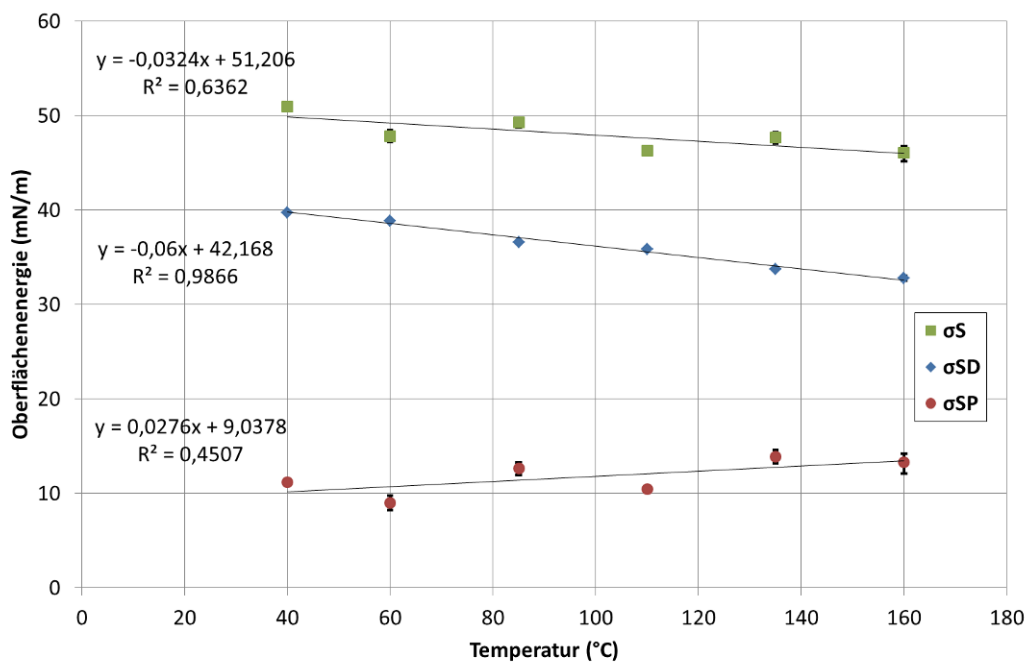


Abbildung 41: Oberflächenenergie von Durethan B30S (PA6) in Abhängigkeit der Temperatur.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass beide Kunststoffe eine Temperaturabhängigkeit der Oberflächenenergie aufweisen. Bei PC sowie bei PA6 sinkt die Oberflächenenergie mit steigender Temperatur. Der Grad der Temperaturabhängigkeit für PA6 lässt sich durch den Wert der Steigung  $k$  der Ausgleichsgeraden aus Abbildung 41 und für PC aus dem quadratischen sowie linearen Anteil des Ausgleichspolynoms aus Abbildung 38 beschreiben (siehe Tabelle 16).

*Tabelle 16: Werte für die Temperaturabhängigkeit der Oberflächenenergie von PC und PA6 ( $T$  in °C).*

	<b>PC</b>	<b>PA6</b>
<b>Temperaturabhängigkeit für <math>\sigma_s</math></b>	$0,0013 T^2 - 0,3709 T$	$-0,0324 T$
<b>Temperaturabhängigkeit für <math>\sigma_{SD}</math></b>	$0,0026 T^2 - 0,5727 T$	$-0,0600 T$
<b>Temperaturabhängigkeit für <math>\sigma_{SP}</math></b>	$-0,0013 T^2 + 0,2017 T$	$0,0276 T$

#### **4.4 Oberflächenenergien der metallischen (beschichteten) Oberflächen**

In diesem Kapitel werden die aus den Kontaktwinkelmessungen ermittelten Oberflächenenergien der Stahlprobekörper und der beschichteten Probekörper behandelt. Eine Darstellung aller Kontaktwinkel bei den unterschiedlichen Temperaturen ist im Anhang 7.5 ersichtlich.

Streng genommen müsste die nicht raugkeitskorrigierte Oberflächenenergie als scheinbare Oberflächenenergie bezeichnet werden. Darauf konnte in dieser Arbeit verzichtet werden, da bei den Raugkeitsunterschieden der gewählten Probekörper sich diese nicht signifikant in den Messergebnissen niederschlägt. Der Beweis hierzu ist im Anhang 7.6 aufgeführt.

**M268 VMR unbeschichtet**

Abbildung 42 zeigt die Oberflächenenergie ( $\sigma_S$ ) sowie ihren polaren und dispersen Anteil ( $\sigma_S^P$ ,  $\sigma_S^D$ ) in Abhängigkeit der Temperatur. Die gesamte Oberflächenenergie und ihr polarer Anteil erhöhen sich mit steigender Temperatur und weisen einen linearen Zusammenhang mit der Temperatur auf, welcher sich durch ein hohes Bestimmtheitsmaß  $R^2$  beweisen lässt. Der disperse Anteil der Oberflächenenergie sinkt hingegen mit steigender Temperatur.

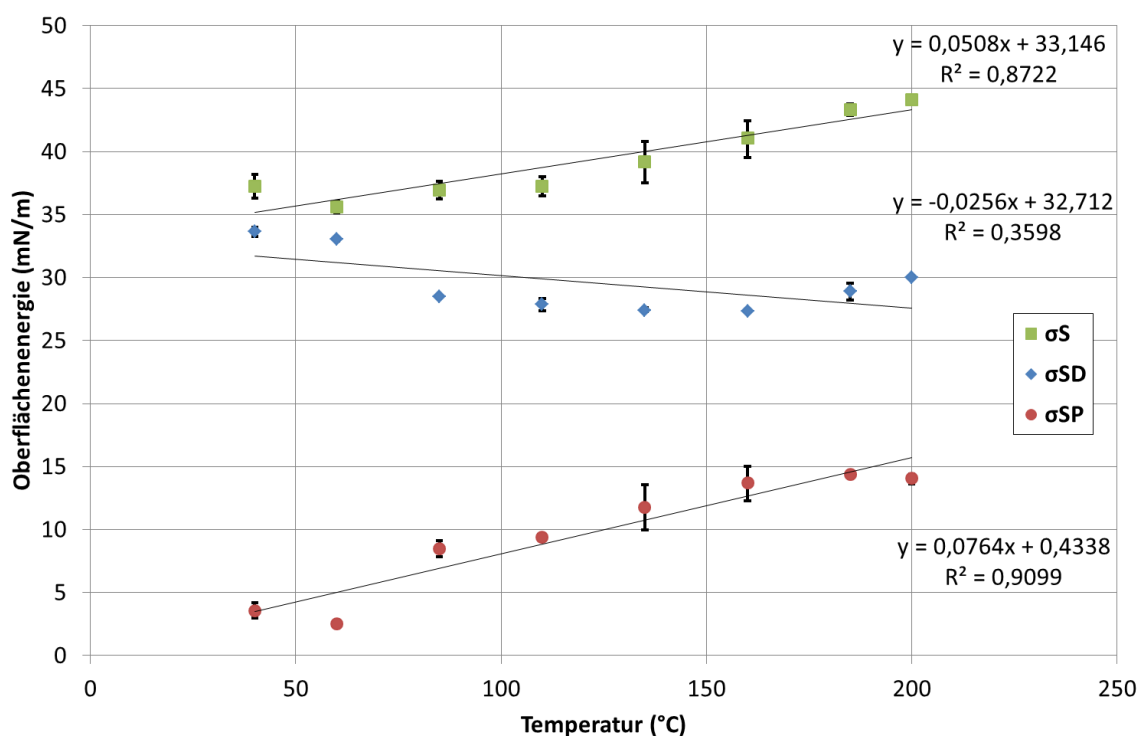


Abbildung 42: Oberflächenenergie von M268 VMR unbeschichtet in Abhängigkeit von der Temperatur.

**M303 unbeschichtet**

Abbildung 43 zeigt die Oberflächenenergie ( $\sigma_s$ ) sowie ihren polaren- und dispersen Anteil ( $\sigma_s^P$ ,  $\sigma_s^D$ ) in Abhängigkeit der Temperatur. Die gesamte Oberflächenenergie und ihr polarer Anteil erhöhen sich mit steigender Temperatur und zeigen den Trend eines linearen Zusammenhangs mit der Temperatur auf. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  weist bei dieser Oberfläche wesentlich schlechtere Werte auf, da die Ausreißer einen erheblichen Einfluss auf das Bestimmtheitsmaß haben. Der disperse Anteil der Oberflächenenergie sinkt hingegen leicht mit steigender Temperatur.

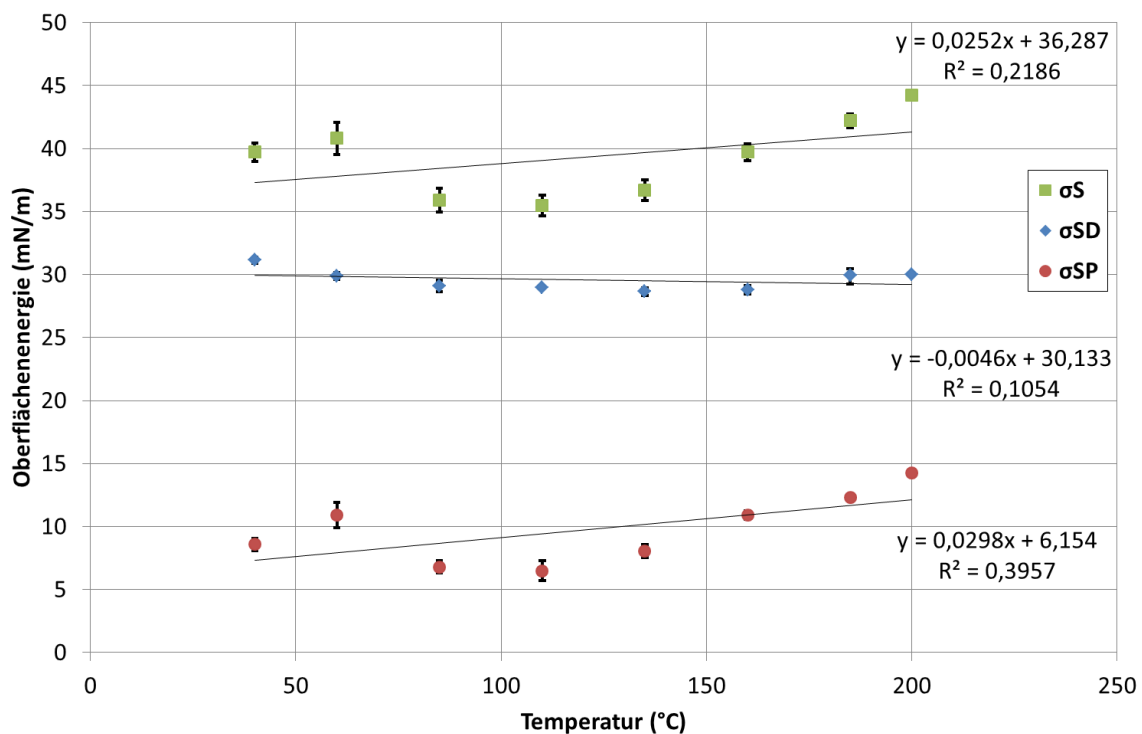


Abbildung 43: Oberflächenenergie von M303 unbeschichtet in Abhängigkeit von der Temperatur.

**M333 IP unbeschichtet**

Abbildung 44 zeigt die Oberflächenenergie ( $\sigma_s$ ) sowie ihren polaren- und dispersen Anteil ( $\sigma_s^P$ ,  $\sigma_s^D$ ) des unbeschichteten M333 IP in Abhängigkeit der Temperatur. Die gesamte Oberflächenenergie und ihr polarer Anteil erhöhen sich mit steigender Temperatur und weisen einen linearen Zusammenhang mit der Temperatur auf, welcher durch ein erhöhtes Bestimmtheitsmaß  $R^2$  bestätigt wird. Der disperse Anteil der Oberflächenenergie sinkt hingegen mit steigender Temperatur.

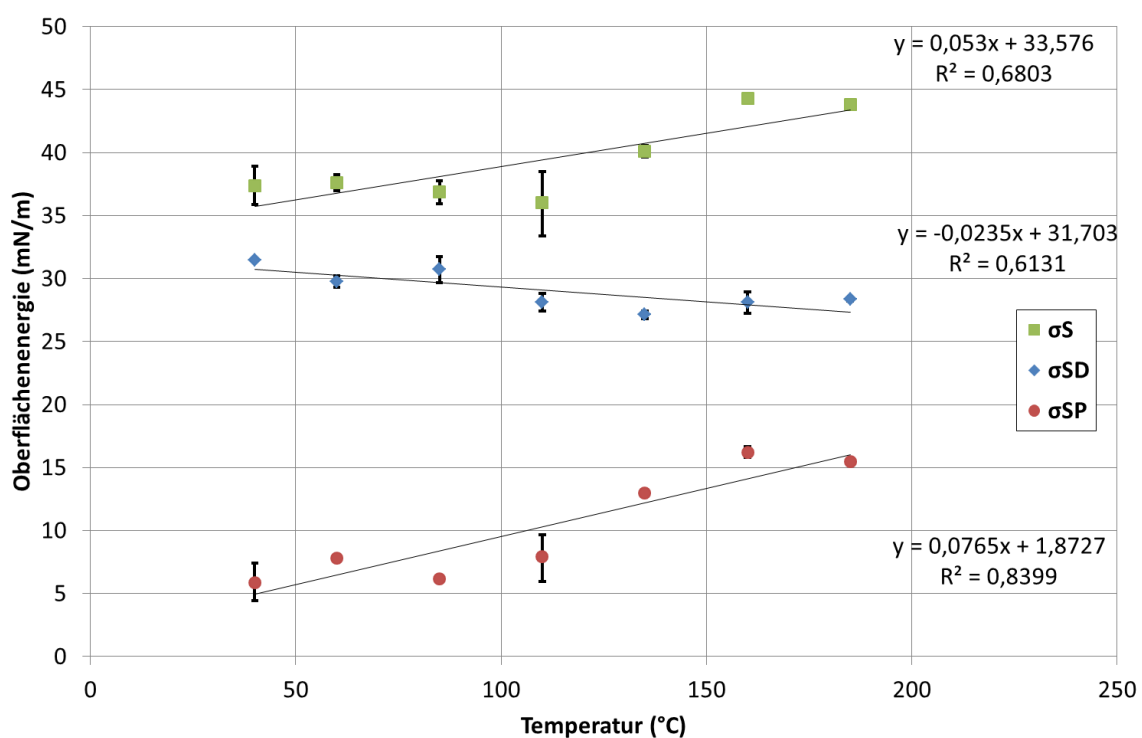


Abbildung 44: Oberflächenenergie von M333 IP unbeschichtet in Abhängigkeit von der Temperatur.

**MoN**

Abbildung 45 zeigt die Oberflächenenergie ( $\sigma_s$ ) sowie ihren polaren- und dispersen Anteil ( $\sigma_s^P$ ,  $\sigma_s^D$ ) der MoN-Beschichtung in Abhängigkeit der Temperatur. Die gesamte Oberflächenenergie und ihr disperser Anteil sinken mit steigender Temperatur und weisen einen linearen Zusammenhang mit der Temperatur auf. Der polare Anteil der Oberflächenenergie ist annähernd temperaturunabhängig bzw. zeigt den leichten Trend, sich mit steigender Temperatur zu erhöhen.

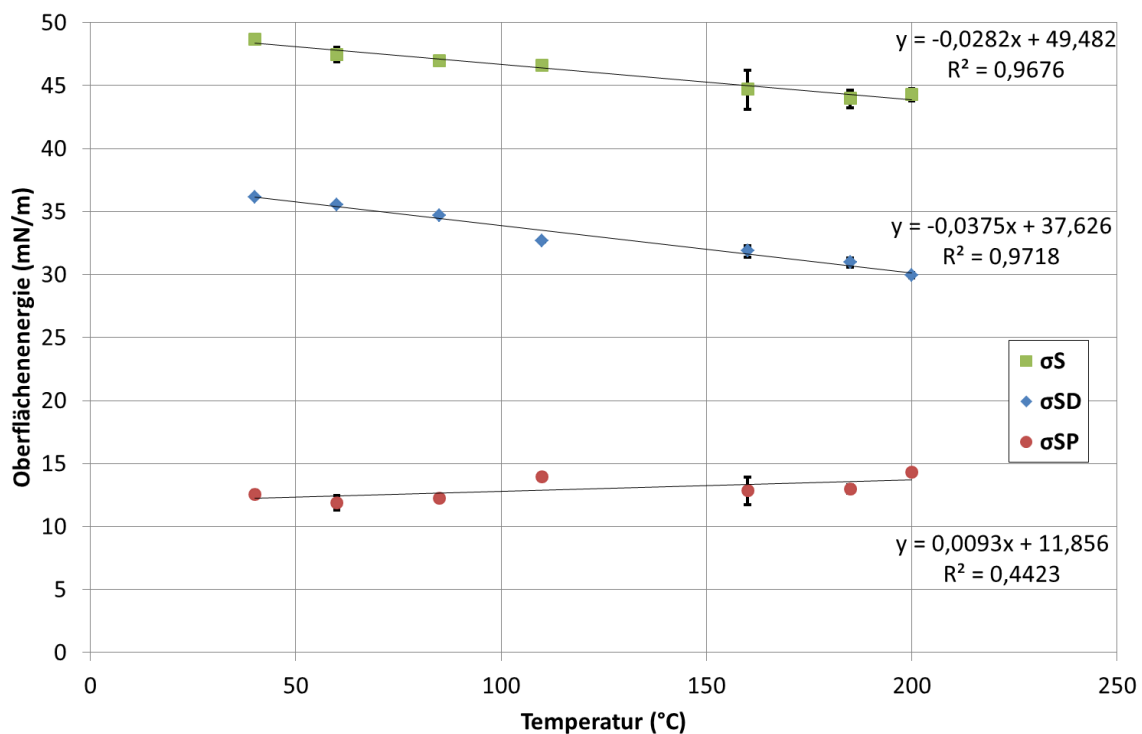


Abbildung 45: Oberflächenenergie von MoN in Abhängigkeit von der Temperatur.

**CrN**

Abbildung 46 zeigt die Oberflächenenergie ( $\sigma_S$ ) der CrN-Beschichtung sowie ihren polaren- und dispersen Anteil ( $\sigma_S^P$ ,  $\sigma_S^D$ ) in Abhängigkeit der Temperatur. Die gesamte Oberflächenenergie und ihr disperser Anteil sinken mit steigender Temperatur. Hier ist ebenfalls ein linearer Zusammenhang zwischen den Oberflächenenergien und der Temperatur zu beobachten, welcher sich durch ein hohes Bestimmtheitsmaß  $R^2$  beweisen lässt. Der polare Anteil der Oberflächenenergie zeigt den Trend, sich mit steigender Temperatur zu erhöhen.

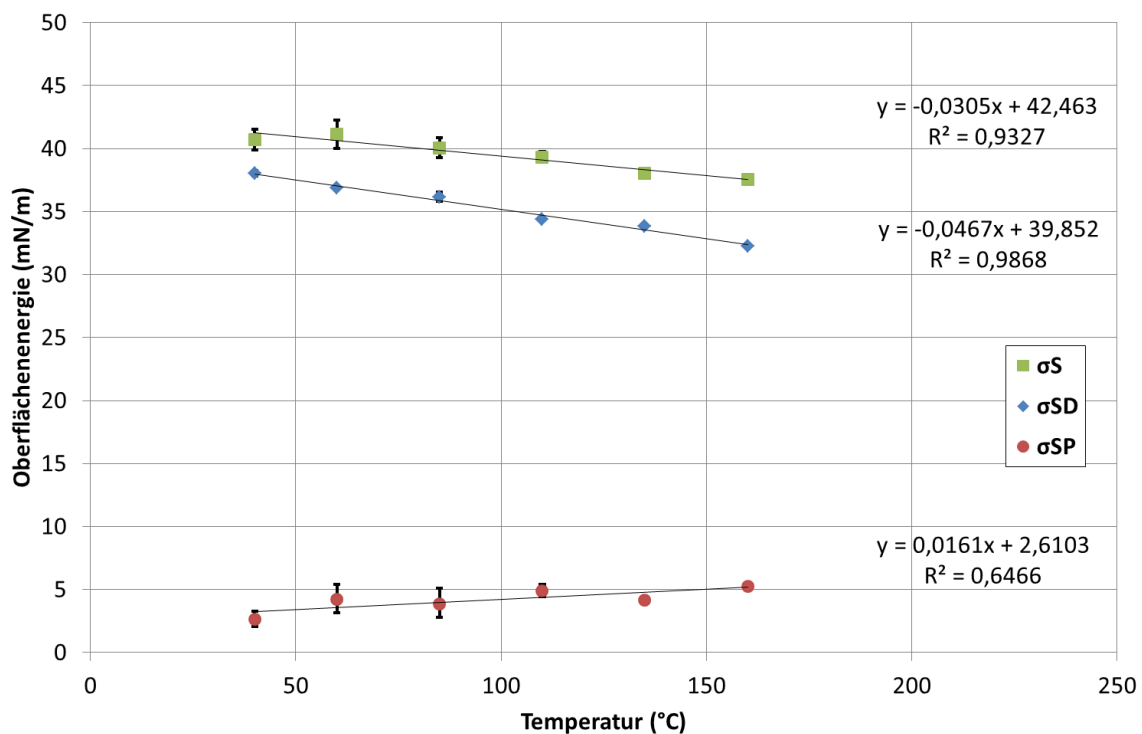


Abbildung 46: Oberflächenenergie von CrN in Abhängigkeit von der Temperatur.



**CrC/a-C:H**

Abbildung 47 zeigt die Oberflächenenergie ( $\sigma_s$ ) der CrC/a-C:H-Beschichtung sowie ihren polaren- und dispersen Anteil ( $\sigma_{SP}$ ,  $\sigma_{SD}$ ) in Abhängigkeit der Temperatur. Die gesamte Oberflächenenergie und ihr disperser Anteil sinken mit steigender Temperatur. Die Oberflächenenergien weisen einen linearen Zusammenhang mit der Temperatur auf und wird durch ein hohes Bestimmtheitsmaß  $R^2$  bestätigt. Der polare Anteil der Oberflächenenergie ist annähernd temperaturunabhängig bzw. zeigt den leichten Trend, sich mit steigender Temperatur zu erniedrigen.

Zusammenfassend wurde beobachtet, dass sämtliche unbeschichteten Stahlprobekörper mit steigender Temperatur eine Erhöhung der Oberflächenenergie aufweisen, da der polare Anteil der Oberflächenenergie eine höhere Temperaturabhängigkeit erkennen lässt. Hingegen sinkt bei allen beschichteten Oberflächen die Oberflächenenergie mit steigender Temperatur, da hier der disperse Anteil eine höhere Temperaturabhängigkeit aufweist.

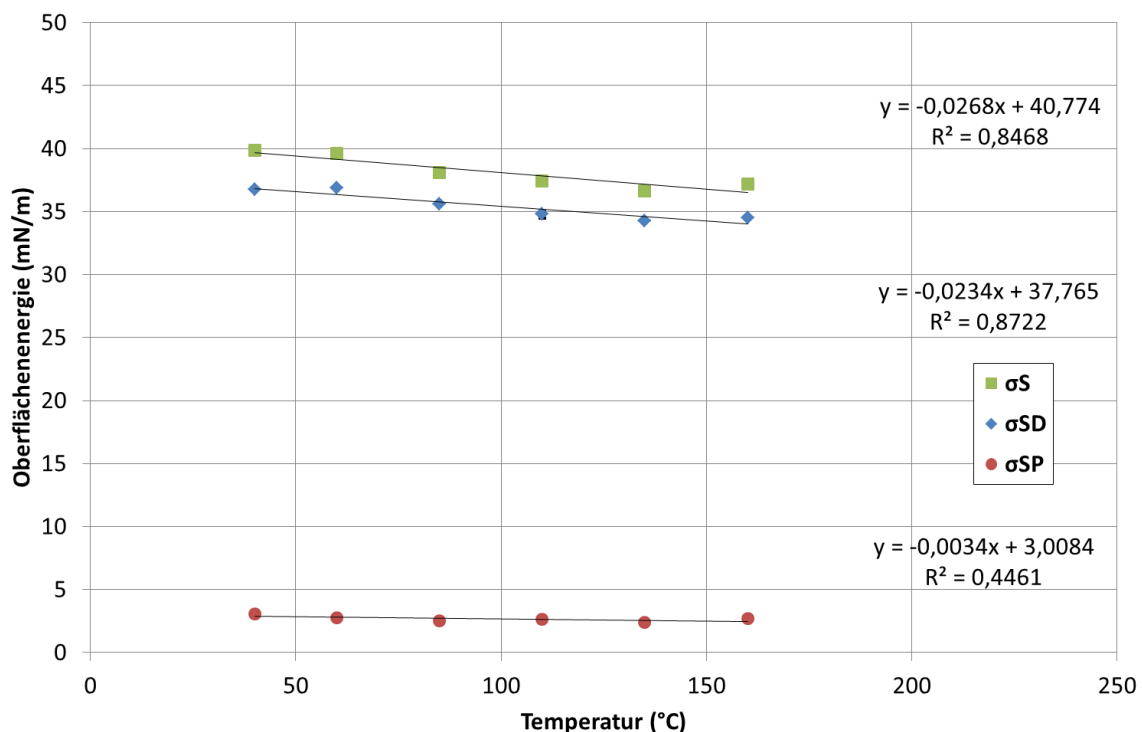


Abbildung 47: Oberflächenenergie von CrC/aC:H in Abhängigkeit von der Temperatur.

In Tabelle 17 ist die Temperaturabhängigkeit aller Probekörper aufgelistet. Die Oberflächenenergie aller Probekörper wurde für die Entformungstemperatur der Reibwertuntersuchungen von 90°C berechnet und zusammengefasst in Tabelle 18 dargestellt.

*Tabelle 17: Werte für die Temperaturabhängigkeit der Oberflächenenergien aller Probekörper.*

Oberfläche	Temperaturabhängigkeit für $\sigma_s$	Temperaturabhängigkeit für $\sigma_{SD}$	Temperaturabhängigkeit für $\sigma_{SP}$
M268 VMR	0,0508 T	-0,0256 T	0,0764 T
M303	0,0252 T	-0,0046 T	0,0298 T
M333 IP	0,053 T	-0,0235 T	0,0765 T
MoN	-0,0282 T	-0,0375 T	0,0093 T
CrN	-0,0305 T	-0,0467 T	0,0161 T
CrC/a-C:H	-0,0268 T	-0,0234 T	-0,0034 T

*Tabelle 18: Oberflächenenergie aller Probekörper bei der (Entformungs)temperatur von 90°C.*

Oberfläche	Oberflächenenergie (mN/m)	disperser Anteil (mN/m)	polarer Anteil (mN/m)	Polarität (%)
PC	42,48 ± 1,05	26,55	15,93	37,49
PA6	48,29 ± 0,45	36,77	11,52	23,86
M268 VMR	37,72 ± 0,85	30,41	7,31	19,38
M303	38,56 ± 0,88	29,72	8,84	22,92
M333 IP	38,35 ± 1,13	29,59	8,76	22,84
MoN	46,94 ± 0,86	34,25	12,69	27,04
CrN	39,72 ± 0,79	35,65	4,06	10,22
CrC/a-C:H	38,36 ± 0,35	35,66	2,70	7,04

## 4.5 Grenzflächenspannungen

In diesem Kapitel werden die ermittelten Grenzflächenspannungen für die verschiedenen Polymer/Oberflächenkombinationen dargestellt und diskutiert.

Um nun eine Voraussage über das Reibverhalten zwischen einem Kunststoff und einer bestimmten Oberfläche tätigen zu können, muss aus der Oberflächenenergie

des Polymers und der Oberflächenenergie der benetzten Oberfläche die jeweilige Grenzflächenspannung laut Gleichung (11) bei der entsprechenden Kontakttemperatur berechnet werden.

Abbildung 48 zeigt die Grenzflächenspannungen zwischen PA6 und den verschiedenen Metalloberflächen bzw. den beschichteten Oberflächen bei einer Temperatur von 90°C. Dabei sind keine großen Unterschiede in den Grenzflächenspannungen bei den unbeschichteten Oberflächen (M268 VMR, M303 und M333 IP) zu beobachten. Die CrC/a-C:H- und CrN-Beschichtung weisen eine erhöhte Grenzflächenspannung auf und sollten daher in den Reibwertversuchen niedrigere Haftreibwerte  $\mu_0$  aufweisen. Die MoN-Beschichtung weist die niedrigste Grenzflächenspannung auf und müsste daher den größten Haftreibwert  $\mu_0$  in den Reibwertversuchen zu PA6 aufweisen. Die unbeschichteten Oberflächen müssten einen mittleren Reibwert ergeben.

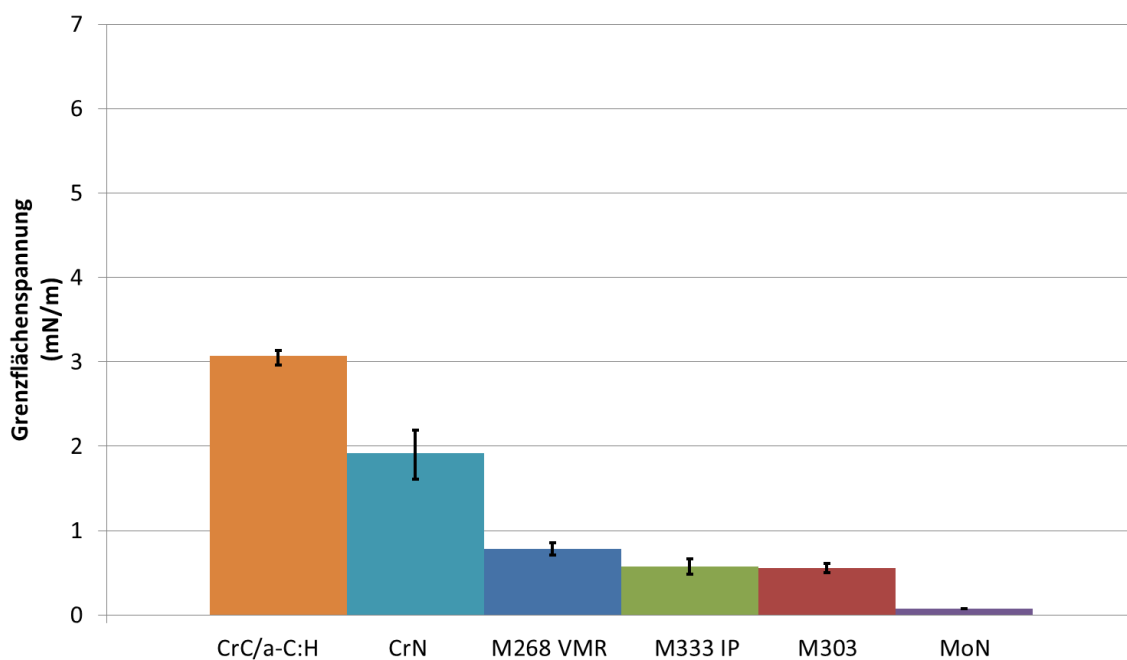


Abbildung 48: Grenzflächenspannungen zwischen PA6 (Durethan B30S) und den verschiedenen Oberflächen bei 90°C.

Abbildung 49 zeigt die Grenzflächenspannungen zwischen PC und den verschiedenen Metalloberflächen bzw. den beschichteten Oberflächen. Auch hier sind keine wesentlichen Unterschiede in den Grenzflächenspannungen bei den unbeschichteten

Oberflächen (M268 VMR, M303 und M333 IP) zu beobachten. Die CrC/a-C:H- und CrN-Beschichtung weisen bei PC ebenfalls eine erhöhte Grenzflächenspannung auf und müssten daher die niedrigsten Haftreibungswerte  $\mu_0$  in den Reibwertversuchen zu PC aufweisen. Die unbeschichteten Oberflächen sollten wie auch bei PA6 einen mittleren Reibwert ergeben. Die Stähle M333 IP und M303 weisen sehr ähnliche Grenzflächenspannungen auf und dürften daher zueinander kaum Unterschiede im Haftreibungswert  $\mu_0$  ergeben. Die MoN-Beschichtung weist die niedrigste Grenzflächenspannung auf und müsste somit den größten Haftreibungswert  $\mu_0$  aufweisen.

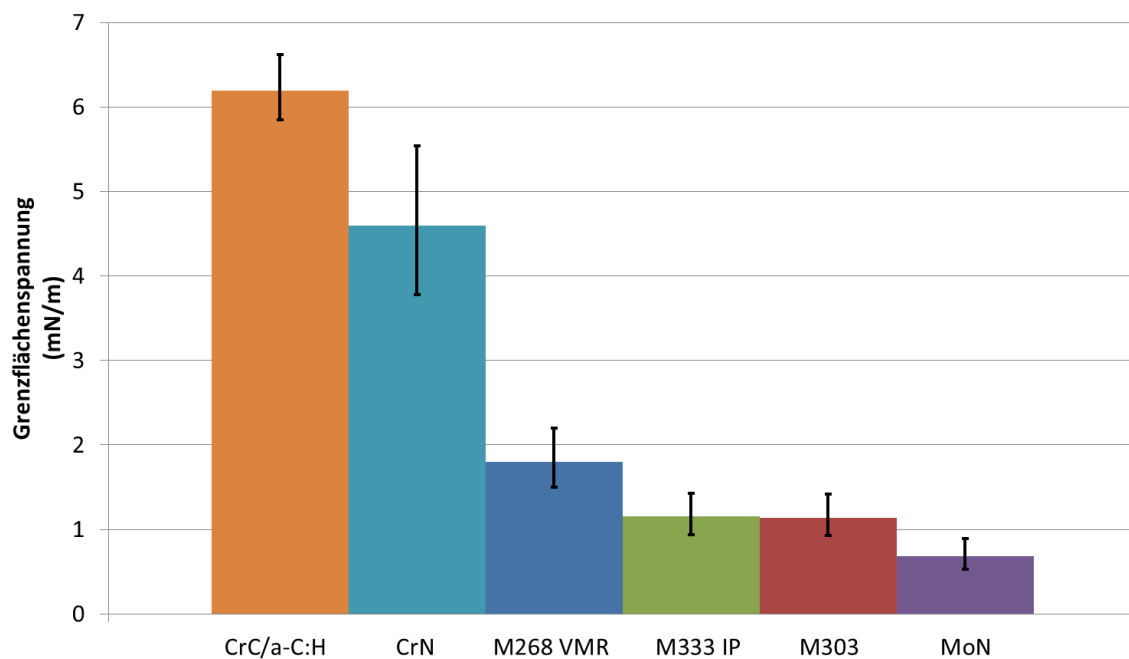


Abbildung 49: Grenzflächenspannungen zwischen PC (Makrolon 2407) und den verschiedenen Oberflächen.

### 4.6 Reibwertuntersuchungen an der Spritzgießmaschine

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den praktischen Reibwertuntersuchungen zur Überprüfung des vorausgesagten Reibverhaltens dargestellt.

Abbildung 50 zeigt die Haftreibungswerte  $\mu_0$  von PA6 auf den drei untersuchten Stahl- bzw. Beschichtungstypen in Abhängigkeit des Kontaktdruckes und der Oberfläche. Die Beschichtung MoN sowie der Stahl M268 VMR weisen eine deutliche Abhängigkeit des Haftreibungswerts  $\mu_0$  vom Kontaktdruck auf. Eine mögliche Ursache könnte darin

liegen, dass es bei höheren Druckstufen zu einer Erwärmung in der Kontaktfläche kommt und diese den Haftreibungswert  $\mu_0$  herabsetzt. Die Beschichtung CrN sowie die Stähle M303 und M333 IP weisen ein ähnliches Reibverhalten bei einem mittleren Haftreibungswert  $\mu_0$  auf. Die Beschichtung CrC/a-C:H weist mit etwa 0,1 deutlich den niedrigsten Haftreibungswert  $\mu_0$  auf und zeigt auch kaum eine Abhängigkeit vom Kontaktdruck.

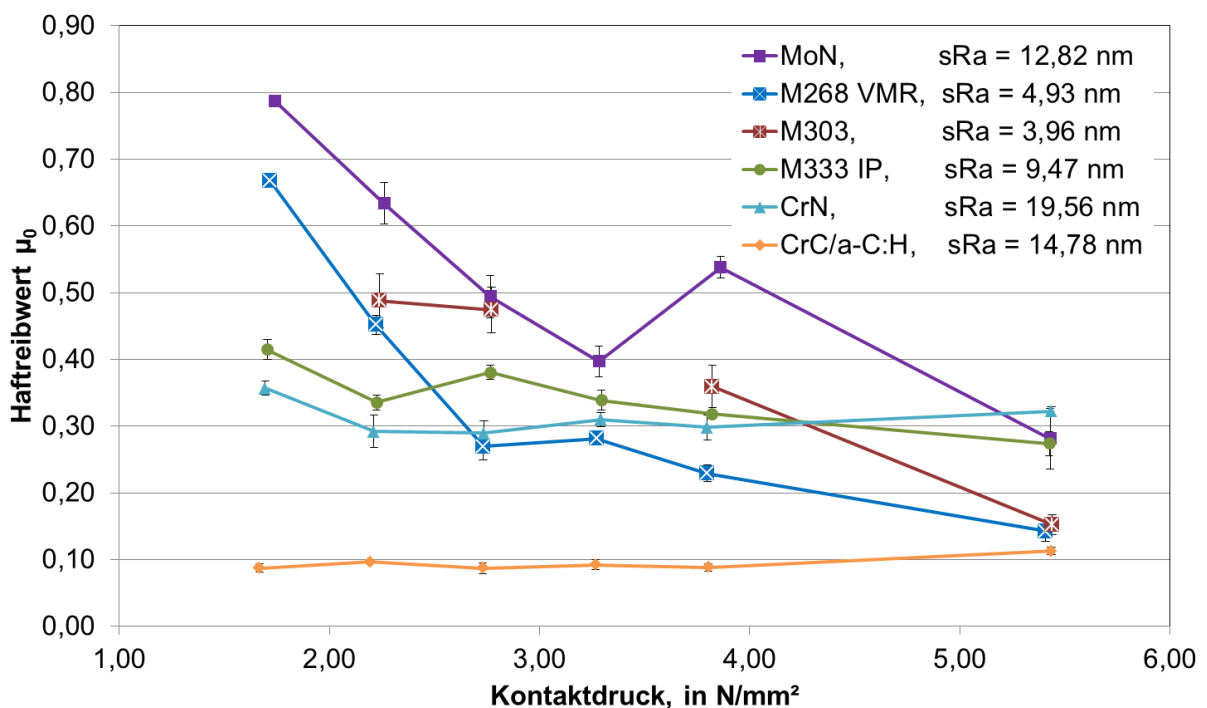


Abbildung 50: Haftreibungswerte  $\mu_0$  von PA6 (Durethan B30S) auf den untersuchten drei Stahl- bzw. Beschichtungstypen als Funktion des Kontaktdruckes und der Oberfläche.

Abbildung 51 zeigt die Haftreibungswerte  $\mu_0$  von PC auf den drei untersuchten Stahl- bzw. Beschichtungstypen als Funktion des Kontaktdruckes und der Oberfläche. Auch hier weist die Beschichtung CrC/a-C:H mit etwa 0,35 die niedrigsten Haftreibungswerte  $\mu_0$  auf und ist wenig druckabhängig. Allerdings liegen die Haftreibungswerte  $\mu_0$  vom Level deutlich höher als bei PA6. Die Beschichtung MoN zeigt im Vergleich zu PA6 einen geringeren Reibwert und dieser ist leicht vom Kontaktdruck abhängig. Die Stähle M268 VMR, M303, M333 IP sowie die Beschichtung CrN weisen ein ähnliches Reibverhalten auf und sind annähernd vom Kontaktdruck unabhängig.

Bei beiden Kunststoffen weist die Beschichtung CrC/a-C:H mit Abstand das beste Reibverhalten auf und ist vom Kontaktdruck nahezu unabhängig. Die Beschichtung CrN liegt bei beiden Kunststoffen im Reibverhalten im mittleren Wertebereich.

Laut Berger [6] und Burgsteiner [8] haben bei Spiegelpolituren bereits geringe Unterschiede in der Rauigkeit der Oberflächen einen großen Einfluss auf das Reibverhalten. Daher ist das Reibverhalten zwischen den verwendeten Stählen und Beschichtungen nicht eindeutig vergleichbar, da sie unterschiedliche Rauigkeiten aufweisen.

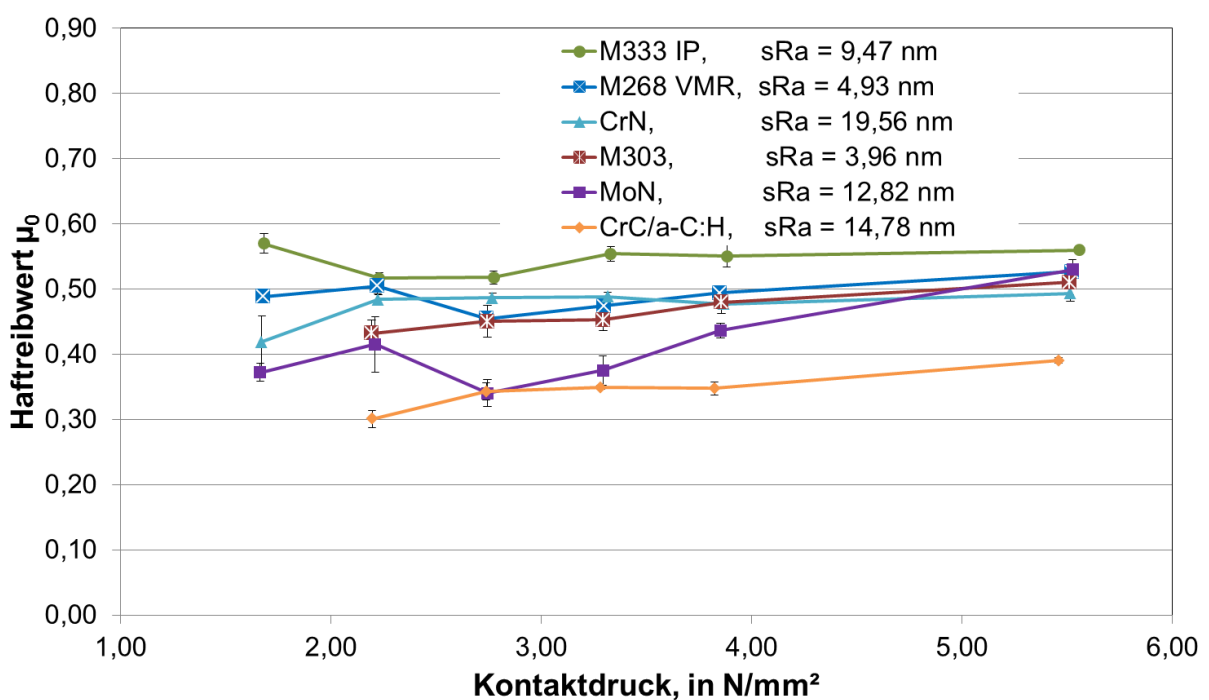


Abbildung 51: Haftreibwerte  $\mu_0$  von PC (Makrolon 2407) auf den untersuchten drei Stahl- bzw. Beschichtungstypen als Funktion des Kontaktdruckes und der Oberfläche.

#### 4.7 Korrelation von Reibwerten und Benetzungsverhalten

In diesem Kapitel werden die Korrelationen zwischen den Reibwerten und dem Benetzungsverhalten erläutert. Verglichen werden die gemessenen Haftreibwerte  $\mu_0$  mit den berechneten Grenzflächenspannungen der jeweiligen Reibpartner bei den während der Entformung auftretenden Kontakttemperaturen von etwa 90°C.

Erwartet wird, dass hohe Grenzflächenspannung mit niedriger Reibung korreliert und umgekehrt.

#### **PA6 Durethan**

Die Haftreibwerte aus Abbildung 50 zeigen teilweise eine gute Übereinstimmung mit dem vorhergesagten Reibverhalten (siehe Abbildung 48). Die Beschichtung MoN weist in Kombination mit PA6 wie vorhergesagt den höchsten Haftreibwert  $\mu_0$  auf. Ebenso trifft die Voraussage für die CrC/a-C:H-Beschichtung zu, dass diese Beschichtung den niedrigsten Haftreibwert  $\mu_0$  aufweisen wird. Die Voraussage eines mittleren Haftreibwerts  $\mu_0$  für die CrN-Beschichtung trifft, mit Ausnahme der höchsten Druckstufe ebenfalls zu. Entgegen der Vorhersage von gleichem Reibverhalten bei den unbeschichteten Stahlprobekörpern unterscheiden sich diese teils beträchtlich in den Reibwerten. Dies hängt auch mit der Rauigkeit zusammen, da im spiegelglanz-polierten Bereich geringe Unterschiede bereits große Auswirkung auf die Reibwerte haben können [6, 8].

#### **PC Makrolon**

Für die Haftreibwerte aus Abbildung 51 trifft lediglich die Voraussage für die CrC/a-C:H-Beschichtung mit PC zu. Ebenso ist CrN wie erwartet in der Reibung höher. MoN verhält sich in der Reibung gänzlich unerwartet. Ferner weisen M303 und M333 IP signifikante Unterschiede im Reibverhalten auf. Für PC lässt sich allerdings ansonsten nur schwer ein Zusammenhang zwischen den Haftreibwerten  $\mu_0$  und den Grenzflächenspannungen herstellen.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Spritzgießvorgang beginnt mit der Benetzung der Werkzeugoberfläche durch schmelzflüssigen Kunststoff während des Einspritzvorganges und endet mit der Entnetzung beim Entformungsvorgang. Ziel dieser Arbeit war es, eine qualitative Vorhersage für Entformungskräfte im Spritzgießprozess durch Bestimmung von Benetzungsparametern der beteiligten Werkstoffe zu ermöglichen. Erwartet wurde, dass die Grenzflächenspannung  $\gamma_{12}$  zwischen Polymer und (beschichteter) Stahloberfläche sich invers zur Entformungskraft verhält.

Dazu wurde das Benetzungsverhalten ausgewählter Testflüssigkeiten gegen Polymere und verschiedene Spritzgießwerkzeugoberflächen untersucht. Als Werkstoffe wurden PA6 (Durethan B30S), PC (Makrolon 2407), die Böhler-Stahlgüten M268, M303 und M333 sowie die Beschichtungen CrC/a-C:H, CrN und MoN, jeweils mit Hochglanzrauhigkeit, verwendet. Mit den Testflüssigkeiten Ethylencarbonat (polar) und Bromonaphtalin (unpolar) wurden in einem Temperaturbereich von 40 °C bis 200 °C die Kontaktwinkel im Hochtemperatur-Kontaktwinkelmessgerät Krüss DSA 100 HT400 ermittelt und daraus temperaturabhängig mit der Methode nach Owens-Wendt-Rabel-Kaelble die Oberflächenenergie der oben genannten Werkstoffe bestimmt.

Alle Werkstoffe weisen eine signifikante Temperaturabhängigkeit der Oberflächenenergie auf. Während bei PC die Oberflächenenergie um etwa 12 mN/m in 100 K abnimmt, sind dies bei PA6 3,24 mN/m, bei MoN 2,82 mN/m, bei CrN 3,05 mN/m und bei CrC/a-C:H 2,68 mN/m. Bei den unbeschichteten Stahloberflächen nimmt die Oberflächenenergie mit steigender Temperatur zu, bei M268 VMR um 5,08 mN/m pro 100 K, bei M303 um 2,52 mN/m und bei M333 IP um 5,30 mN/m.

Bei den polaren und dispersen Anteilen der Oberflächenenergie zeigt PC eine nichtlineare Abhängigkeit von der Temperatur, alle anderen Werkstoffe zeigen eine lineare Abhängigkeit. Während bei M333 IP, M268 VMR und M303 der disperse Anteil geringfügig abnimmt, steigt der polare Anteil sehr deutlich an. Bei den Beschichtungen und bei PA6 verändert sich der polare Anteil kaum, der disperse Anteil nimmt jedoch deutlich ab.



Bei einer Temperatur von 90 °C weisen die Werkstoffe PC, PA6, M268 VMR, M303, M333 IP, MoN, CrN und CrC/a-C:H eine Oberflächenenergie von  $42,48 \pm 1,05$  mN/m,  $48,29 \pm 0,45$  mN/m,  $37,72 \pm 0,85$  mN/m,  $38,56 \pm 0,88$  mN/m,  $38,35 \pm 1,13$  mN/m,  $46,94 \pm 0,86$  mN/m,  $39,72 \pm 0,79$  mN/m und  $38,36 \pm 0,35$  mN/m bei einer Polarität (Anteil polarer Anteil an gesamter Oberflächenenergie) von 37,49 %, 23,86 %, 19,38 %, 22,92 %, 22,84 %, 27,04 %, 10,22 % und 7,04 % auf.

Mittels AFM wurde zusätzlich die Rauigkeit der Probekörper gemessen. Diese variiert zwar in einem Bereich des flächenbezogenen arithmetischen Mittenrauwerths  $sR_a$  von 3,96 nm bis 19,56 nm, die Rauigkeitskorrektur nach Wenzel ergibt jedoch noch keinen signifikanten Einfluss auf die Benetzungsparameter. Im Allgemeinen wiesen die Beschichtungen mit  $sR_a$  von 12,82 nm bis 19,56 nm eine höhere Rauigkeit auf als die Stahlproben ( $3,96 \text{ nm} < sR_a < 9,48 \text{ nm}$ ).

Die Grenzflächenspannung der jeweiligen Werkstoffpaarung wurde schließlich mit den polaren und dispersen Anteilen der Oberflächenenergien berechnet. Daraus ergibt sich bei einer Kontakttemperatur von 90 °C für PC mit  $\gamma_{12}$  6,18 mN/m, 4,59 mN/m, 1,79 mN/m, 1,15 mN/m, 1,13 mN/m und 0,67 mN/m eine erwartete Reihung, beginnend bei niedrigster Reibung, CrC/a-C:H < CrN < M268 VMR < M333 IP = M303 < MoN. Die erwartete Reihung bei PA6 ist analog, wobei hier Werte für  $\gamma_{12}$  von 3,07 mN/m, 1,92 mN/m, 0,78 mN/m, 0,58 mN/m, 0,55 mN/m und 0,07 mN/m ermittelt wurden.

Das vorhergesagte Reibverhalten wurde durch praktische Reibwertmessungen in einem Spritzgießwerkzeug mit integriertem Reibversuch überprüft. Dabei wurden die gleichen metallischen Probekörper zuerst in einem konventionellen Spritzgießprozess von Polymerschmelze (PC oder PA6) benetzt und anschließend das Kunststoffbauteil nach Abkühlung auf eine Kontakttemperatur von 90 °C unter vertikaler Belastung in horizontale Richtung entformt. Aus dem Kräftepaar Normalkraft und erforderliche Abzugskraft wurde der Haftreibwert  $\mu_0$  bestimmt.

Bei einem Kontaktdruck von  $1,66 \text{ N/mm}^2$  ergaben sich für PC bei Entformung von CrC/a-C:H, CrN, M268 VMR, M333 IP, M303 bzw. MoN Werte für  $\mu_0$  von  $0,30 \pm 0,01$ ,  $0,42 \pm 0,04$ ,  $0,49 \pm 0,01$ ,  $0,57 \pm 0,02$ ,  $0,43 \pm 0,02$  bzw.  $0,37 \pm 0,01$ . Bei PA6 lagen

diese Werte für  $\mu_0$  bei  $0,09 \pm 0,01$ ,  $0,36 \pm 0,01$ ,  $0,67 \pm 0,01$ ,  $0,42 \pm 0,02$ ,  $0,76 \pm 0,02$  bzw.  $0,79 \pm 0,01$ .

Wie vorausgesagt weist also MoN in Kombination mit PA6 die größte Reibung auf, ebenso zeigt CrC/a-C:H die niedrigste Reibung. Auch liegt CrN bei mittlerer Reibung. M268 liegt zwar wie erwartet über CrN, allerdings zu deutlich, was sich auf den Rauigkeitsunterschied zwischen den beiden Oberflächen zurückführen lässt. Vor allem im sehr niedrigen Rauigkeitsbereich (Spiegelglanz) zeigten frühere Untersuchungen bereits bei geringen Änderungen große Unterschiede in den Reibwerten. Entgegen der Vorhersage annähernd gleicher Reibung unterscheiden sich die unbeschichteten Stahltypen M303 und M333 IP deutlich in den Reibungswerten. Dies lässt sich ebenfalls durch die unterschiedliche Rauigkeit erklären.

Bei PC weist CrC/a-C:H wie erwartet den niedrigsten Reibwert auf, auch CrN ist in der Reibung höher. MoN verhält sich mit dem zweitniedrigsten Reibwert gänzlich unerwartet. Ebenso zeigt M303 eine geringere Reibung als vorhergesagt. Die vorausgesagte Reihung von CrN, M268 VMR und M333 IP trifft hingegen zu.

Zusammenfassend eignet sich zwar die Benetzungskenngröße Grenzflächenspannung zur qualitativen Vorhersage des Reibungsverhaltens für einige Kombinationen von Polymer und (beschichteter) Stahloberfläche. Die Korrelation ist jedoch nicht immer klar und ausreichend, um die Stahl- und Beschichtungsentwicklung gänzlich ohne Reibwertversuche durchzuführen. Ein Grund hierfür ist, dass sich ein Rauigkeitsunterschied in der errechneten Grenzflächenspannung kaum, in den Reibwerten aber deutlich niederschlagen kann. Verfahrensbedingt sind jedoch Werkstoffoberflächen selten identisch rau herstellbar. Ferner beeinflusst auch der auftretende Kontaktdruck, zum Beispiel durch Aufschrumpfen eines Kunststoffteils auf einen Werkzeugkern, die Reibwerte. Ein Kontaktdruck kann aber in den Benetzungsmessungen (Kontaktwinkel) mit den vorhandenen Messmethoden nicht dargestellt werden.

In weiterführenden Untersuchungen könnte(n)

- Kontaktwinkelmessungen in einer Hochdruckkammer durchgeführt,

- die Reibenergie als Bewertungskriterium verwendet,
- Reibwertmessungen mit anderen Messmethoden durchgeführt,
- sowie die Messmethodik der temperaturabhängigen Kontaktwinkelmessungen und die Auswertung auf Abformung und Entformung von mikro-strukturierten Oberflächen angewendet werden.

Als weitere Maßnahme sollte das Kontaktwinkelmessgerät auf eine erschütterungsarme Plattform transferiert werden, da Kontaktwinkelmessungen sehr sensibel und anfällig auf äußere Erschütterungen sind.

Ferner könnten weitere Kombinationen von Polymeren und Oberflächen mit der Methodik dieser Arbeit untersucht werden, um eine exaktere Aussage hinsichtlich allgemeiner Einsatzbarkeit und Grenzen treffen zu können.

## 6 Literaturangabe

- [1] *Asylum Research, an Oxford Instruments: Company: MFP-3D Stand Alone AFM*, <https://www.asylumresearch.com/Products/Mfp3DSA/Mfp3DSAProduct.shtml>, November 2013.
- [2] *Bayer MaterialScience AG, Leverkusen: Materialdatenblatt Makrolon 2407*, <http://www.plastics.bayer.com/Products/Makrolon/ProductList/201305212210/Makrolon-2407>, Mai 2010.
- [3] *Bayer MaterialScience AG, Leverkusen: Polycarbonate und Polycarbonat-Blends für die Elektro- und Elektronik-Industrie:*  
<http://www.materialscience.bayer.com/en/product%20center%20pcs/products/~/media/9BA549C44FB44EBBB790B94CEFDB662E.ashx?la=de&force=1>
- [4] *Berg, J. C.: Wettability. Surfactant Science Series Volume 49*, Marcel Dekker, INC. New York, 1993.
- [5] *Berger, G. R.: Herstellung, Abformung, Charakterisierung. Vorlesung: Oberflächenstrukturen an Spritzgießteilen. Montanuniversität Leoben*, 2014.
- [6] *Berger, G.R., Friesenbichler, W., Teichert, C., Langecker, G.R., Lugger, M.: Reibwerte und Entformungskräfte im konventionellen Spritzguss. Vorhersage durch Grenzflächenspannung? 22. Leobener Kunststoff-Kolloquium: Oberflächen und Grenzflächen in der Polymertechnologie, Leoben*, 2013.
- [7] *Bischof, C., Possart, W.: Adhäsion – Theoretische und experimentelle Grundlagen. Berlin: Akademie-Verlag*, 1983.
- [8] *Burgsteiner, M.: Entformungskräfte beim Spritzgießen in Abhängigkeit von Oberflächenrauigkeit, Stahlwerkstoff, Vorzugsrichtung der Oberflächenstruktur, Beschichtung und Kunststofftyp. Masterarbeit am Institut für Kunststoffverarbeitung, Montanuniversität Leoben*, 2009.
- [9] *Böhler Edelstahl GmbH & Co KG: Produktfolder Kunststoffformenstahl Böhler M303 Extra*, 2012.

- [10] *Böhler Edelstahl GmbH & Co KG*: Produktfolder Kunststoffformenstahl Böhler M333 Isoplast, 2011.
- [11] *Böhler Edelstahl GmbH & Co KG*: Produktfolder Kunststoffformenstahl Böhler M268 VMR, 2011.
- [12] *Fries Research & Technology GmbH*: Datenblatt zu FRT MicroSpy® Topo, <http://www.frt-gmbh.com/msp-topo.pdf?forced=true>, Oktober 2013.
- [13] *Habenicht G.*: Kleben - Grundlagen, Technologien, Anwendungen. 5. erweiterte und aktualisierte Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
- [14] *KRÜSS GmbH*: Application Note AN250e, Effect of Temperature on the Surface Energy of Solids, Dezember 2005.
- [15] *KRÜSS GmbH*: Drop Shape Analysis DSA1. Benutzerhandbuch, Hamburg, 2004-2012.
- [16] *KRÜSS GmbH*: Messung des Kontaktwinkels, <http://www.kruss.de/theorie/messungen/kontaktwinkel/messung-des-kontaktwinkels.html>, November 2013.
- [17] *KRÜSS GmbH*: Stoffdatenbank, November 2013.
- [18] *KRÜSS GmbH*: Theorie zu Kontaktwinkel, <http://www.kruss.de/de/theorie/messungen/kontaktwinkel/einfuehrung.html>, November 2013.
- [19] *KRÜSS GmbH*: Theorie zu Kontaktwinkelmodellen, <http://www.kruss.de/de/theorie/messungen/kontaktwinkel/modelle/owrk.html>, November 2013.
- [20] *KRÜSS GmbH*: Theorie Oberflächenspannung, <http://www.kruss.de/de/theorie/messungen/oberflaechenspannung/einfuehrung.html>, November 2013.
- [21] *Lahidjanian D.*: Effekte einer Atmosphärendruck-Plasmabehandlung auf luftfahrtspezifische Beschichtungsstrukturen. Dissertation, Fakultät III – Prozesswissenschaften der Technischen Universität Berlin, 2001.

- [22] *LANXESS Deutschland GmbH, Köln*: Materialdatenblatt Durethan B30S, [https://techcenter.lanxess.com/scp/emea/de/products/datasheet/LANXESS\\_Durethan\\_B\\_30\\_S\\_000000\\_ISO\\_DE.pdf?docId=187237](https://techcenter.lanxess.com/scp/emea/de/products/datasheet/LANXESS_Durethan_B_30_S_000000_ISO_DE.pdf?docId=187237), Oktober 2013.
- [23] *LANXESS Deutschland GmbH, Köln*: Produkte und Anwendungen – Übersicht: <https://techcenter.lanxess.com/scp/emea/de/products/type/index.jsp?pid=47>
- [24] *Lugger, M.*: Reibungsreduktion zwischen Polymer- und Werkzeugoberfläche: Einfluss der Rauigkeit auf die Oberflächenenergie und Grenzflächenspannung. Diplomarbeit an der Montanuniversität Leoben, 2012.
- [25] *Muhs, D., Wittel, H., Jannasch, D., Voßiek, J.*: Roloff/Matek Maschinenelemente. 17. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2005, S. 29-31.
- [26] *Schöfer, G.*: Entwicklung einer neuen Messapparatur für Haft- und Entformungskräfte beim Spritzgießen. Bakkalaureatsarbeit am Institut für Kunststoffverarbeitung, Montanuniversität Leoben, 2006.
- [27] *Teichert, C.*: Handbuch der Nanoanalytik Steiermark, (ed. Psutka, S.; Hofer, F.), 2010, S. 105.
- [28] *Volk, R.*: Rauheitsmessung – Theorie und Praxis. 2. Auflage, Beuth Verlag, Berlin, 2013, S. 22.
- [29] *Wenzel, R. N.*: Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial and engineering chemistry* 28, p. 988, 1936.

# 7 Anhang

## 7.1 Materialdatenblatt Makrolon 2407 [2]



### Makrolon 2407

**Standardtypen / Niedrigviskos** Globaler Typ; MVR (300 °C/1.2 kg) 19 cm<sup>3</sup>/10 min; universell einsetzbar; niedrigviskos; UV-stabilisiert; leicht entformbar; Spritzgießen - Masstemperatur 280 - 320 °C; transparente, transluzente und gedeckte Einfärbungen lieferbar

**ISO Formmassenbezeichnung** ISO 7391-PC,MLR,(,)-18-9

Eigenschaft	Prüfbedingung	Einheit	Norm	Wert
<b>Rheologische Eigenschaften</b>				
C Schmelze-Volumenfließrate (MVR)	300 °C; 1.2 kg	cm <sup>3</sup> /10 min	ISO 1133	19
C Verarbeitungsgeschwindigkeit, parallel	60x60x2; 500 bar	%	ISO 294-4	0.65
C Verarbeitungsgeschwindigkeit, senkrecht	60x60x2; 500 bar	%	ISO 294-4	0.65
Verarbeitungsgeschwindigkeit, parallel/senkrecht	Wertebereich entsprechend allgemeiner Praxiserfahrungen	%	i.A. ISO 2577	0.5 - 0.7
Schmelze-Massefließrate (MFR)	300 °C; 1.2 kg	g/10 min	ISO 1133	20
<b>Mechanische Eigenschaften (23 °C/50 % r. F.)</b>				
C Zug-Modul	1 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	2400
C Streckspannung	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	66
C Streckdehnung	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	6.0
C Nominelle Bruchdehnung	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	> 50
Bruchspannung	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	65
Bruchdehnung	50 mm/min	%	i.A. ISO 527-1,-2	120
C Zug-Kriech-Modul	1 h	MPa	ISO 899-1	2200
C Zug-Kriech-Modul	1000 h	MPa	ISO 899-1	1900
Biege-Modul	2 mm/min	MPa	ISO 178	2350
Biegefestigkeit	2 mm/min	MPa	ISO 178	98
Randfaserdehnung bei Höchstkraft	2 mm/min	%	ISO 178	7.0
3.5 % - Biegespannung	2 mm/min	MPa	ISO 178	74
C Charpy-Schlagzähigkeit	23 °C	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179-1eU	N
C Charpy-Schlagzähigkeit	-30 °C	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179-1eU	N
Charpy-Schlagzähigkeit	-60 °C	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179-1eU	N
Charpy-Kerbschlagzähigkeit	23 °C; 3 mm	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 7391/f.A. ISO 179-1eA	65P(C)
Charpy-Kerbschlagzähigkeit	-30 °C; 3 mm	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 7391/f.A. ISO 179-1eA	14C
Izod-Kerbschlagzähigkeit	23 °C; 3.2 mm	kJ/m <sup>2</sup>	i.A. ISO 180-A	75P(C)
Izod-Kerbschlagzähigkeit	-30 °C; 3.2 mm	kJ/m <sup>2</sup>	i.A. ISO 180-A	12C
C Durchstoß-Maximalkraft	23 °C	N	ISO 6603-2	5100
C Durchstoß-Maximalkraft	-30 °C	N	ISO 6603-2	6000
C Durchstoß-Arbeit	23 °C	J	ISO 6603-2	55
C Durchstoß-Arbeit	-30 °C	J	ISO 6603-2	65
Kugeldruckhärte		N/mm <sup>2</sup>	ISO 2039-1	116

## Makrolon 2407

Eigenschaft	Prüfbedingung	Einheit	Norm	Wert
<b>Thermische Eigenschaften</b>				
C Glasübergangstemperatur	10 °C/min	°C	ISO 11357-1,-2	144
C Formbeständigkeitstemperatur	1.80 MPa	°C	ISO 75-1,-2	124
C Formbeständigkeitstemperatur	0.45 MPa	°C	ISO 75-1,-2	136
C Vicat-Erweichungstemperatur	50 N; 50 °C/h	°C	ISO 306	144
C Vicat-Erweichungstemperatur	50 N; 120 °C/h	°C	ISO 306	145
C Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient, parallel	23 bis 55 °C	10 <sup>-4</sup> /K	ISO 11359-1,-2	0.65
C Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient, senkrecht	23 bis 55 °C	10 <sup>-4</sup> /K	ISO 11359-1,-2	0.65
C Brennverhalten UL 94 [UL Registrierung]	0.75 mm	Klasse	UL 94	V-2
C Brennverhalten UL 94 [UL Registrierung]	2.7 mm	Klasse	UL 94	HB
C Sauerstoff-Index	Verfahren A	%	ISO 4589-2	27
Wärmeleitfähigkeit	23 °C	W/(m·K)	ISO 8302	0.20
Wärmesicherheit (Kugeldruckversuch)		°C	IEC 60695-10-2	135
Relativer Temperaturindex (Zugfestigkeit) [UL Registrierung]	1.5 mm	°C	UL 746B	125
Relativer Temperaturindex (Schlagzugzähigkeit) [UL Registrierung]	1.5 mm	°C	UL 746B	115
Relativer Temperaturindex (elektrische Festigkeit) [UL Registrierung]	1.5 mm	°C	UL 746B	125
Glühdrahtprüfung (GWFI)	1.0 mm	°C	IEC 60695-2-12	850
Glühdrahtprüfung (GWFI)	1.5 mm	°C	IEC 60695-2-12	850
Glühdrahtprüfung (GWFI)	2.0 mm	°C	IEC 60695-2-12	850
Glühdrahtprüfung (GWFI)	3.0 mm	°C	IEC 60695-2-12	930
Glühdrahtprüfung (GWFI)	4.0 mm	°C	IEC 60695-2-12	960
Glühdrahtprüfung (GWIT)	1.0 mm	°C	IEC 60695-2-13	875
Glühdrahtprüfung (GWIT)	1.5 mm	°C	IEC 60695-2-13	875
Glühdrahtprüfung (GWIT)	2.0 mm	°C	IEC 60695-2-13	875
Glühdrahtprüfung (GWIT)	3.0 mm	°C	IEC 60695-2-13	875
Glühdrahtprüfung (GWIT)	4.0 mm	°C	IEC 60695-2-13	875
Beflammung mit dem Kleinbrenner	Verfahren K und F; 2.0 mm	Klasse	DIN 53438-1,-3	K1, F1
Nadelflammtest	Verfahren K; 1.5 mm	s	IEC 60695-11-5	5
Nadelflammtest	Verfahren K; 2.0 mm	s	IEC 60695-11-5	5
Nadelflammtest	Verfahren K; 3.0 mm	s	IEC 60695-11-5	10
Nadelflammtest	Verfahren F; 1.5 mm	s	IEC 60695-11-5	60
Nadelflammtest	Verfahren F; 2.0 mm	s	IEC 60695-11-5	120
Nadelflammtest	Verfahren F; 3.0 mm	s	IEC 60695-11-5	120
Brenngeschwindigkeit (US-FMVSS)	>=1.0 mm	mm/min	ISO 3795	passed
Fremdentzündungstemperatur		°C	ASTM D1929	460
Selbstentzündungstemperatur		°C	ASTM D1929	550
<b>Elektrische Eigenschaften (23 °C/50 % r. F.)</b>				
C Relative Dielektrizitätszahl	100 Hz	-	IEC 60250	3.1
C Relative Dielektrizitätszahl	1 MHz	-	IEC 60250	3.0
C Dielektrischer Verlustfaktor	100 Hz	10 <sup>-4</sup>	IEC 60250	5
C Dielektrischer Verlustfaktor	1 MHz	10 <sup>-4</sup>	IEC 60250	90
C Spezifischer Durchgangswiderstand		Ohm·m	IEC 60093	1E14
C Spezifischer Oberflächenwiderstand		Ohm	IEC 60093	1E16
C Elektrische Durchschlagfestigkeit	1 mm	kV/mm	IEC 60243-1	34
C Vergleichszahl zur Kriechwegbildung CTI	Prüflösung A	Stufe	IEC 60112	250
Vergleichszahl zur Kriechwegbildung CTI M	Prüflösung B	Stufe	IEC 60112	125M
Elektrolytische Korrosionswirkung		Stufe	IEC 60426	A1



## Makrolon 2407

Eigenschaft	Prüfbedingung	Einheit	Norm	Wert
<b>Sonstige Eigenschaften (23 °C)</b>				
C Wasseraufnahme (Sättigungswert)	Wasser bei 23 °C	%	ISO 62	0.30
C Wasseraufnahme (Gleichgewichtswert)	23 °C; 50 % r.F.	%	ISO 62	0.12
C Dichte		kg/m <sup>3</sup>	ISO 1183-1	1200
Wasserdampfdurchlässigkeit	23 °C; 85 % r.F.; 100 µm Film	g/(m <sup>2</sup> ·24 h)	ISO 15106-1	15
Gasdurchlässigkeit	Sauerstoff; 100 µm Film	cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·24 h·bar)	i.A. ISO 2556	800
Gasdurchlässigkeit	Sauerstoff; 25.4 µm (1 mil) Film	cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·24 h·bar)	i.A. ISO 2556	3150
Gasdurchlässigkeit	Stickstoff; 100 µm Film	cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·24 h·bar)	i.A. ISO 2556	160
Gasdurchlässigkeit	Stickstoff; 25.4 µm (1 mil) Film	cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·24 h·bar)	i.A. ISO 2556	630
Gasdurchlässigkeit	Kohlendioxid; 100 µm Film	cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·24 h·bar)	i.A. ISO 2556	4800
Gasdurchlässigkeit	Kohlendioxid; 25.4 µm (1 mil) Film	cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·24 h·bar)	i.A. ISO 2556	18900
Schüttdichte	Granulat	kg/m <sup>3</sup>	ISO 60	660
<b>Formmasse-spezifische Eigenschaften</b>				
Brechungsindex	Methode A	-	ISO 489	1.586
Trübung von transparenten Materialien	3 mm	%	ISO 14782	< 0.8
Lichttransmission (farblos transparentes Material)	1 mm	%	ISO 13468-2	89
C Lichttransmission (farblos transparentes Material)	2 mm	%	ISO 13468-2	89
Lichttransmission (farblos transparentes Material)	3 mm	%	ISO 13468-2	88
Lichttransmission (farblos transparentes Material)	4 mm	%	ISO 13468-2	87
<b>Herstellbedingungen für Probekörper</b>				
C Spritzgießen-Masstemperatur		°C	ISO 294	280
C Spritzgießen-Werkzeugtemperatur		°C	ISO 294	80
C Spritzgießen-Einspritzgeschwindigkeit		mm/s	ISO 294	200

C Diese Eigenschaftsmerkmale sind Bestandteil der Kunststoffdatenbank CAMPUS und basieren auf dem international festgelegten Katalog von Grunddaten für Kunststoffe ISO 10350.

Schlageigenschaften: N = Nicht-Bruch, P = Teilbruch, C = Vollständiger Bruch

## Makrolon 2407

### Haftungsausschluss

#### Haftungsausschlussklausel für Verkaufsprodukte

Die vorstehenden Informationen und unsere anwendungstechnische Beratung in Wort, Schrift und durch Versuche erfolgen nach bestem Wissen, gelten jedoch nur als unverbindliche Hinweise, auch in Bezug auf etwaige Schutzrechte Dritter. Die Beratung befreit Sie nicht von einer eigenen Prüfung unserer aktuellen Beratungshinweise - insbesondere unserer Sicherheitsdatenblätter und technischen Informationen - und unserer Produkte im Hinblick auf ihre Eignung für die beabsichtigten Verfahren und Zwecke. Anwendung, Verwendung und Verarbeitung unserer Produkte und der aufgrund unserer anwendungstechnischen Beratung von Ihnen hergestellten Produkten erfolgen außerhalb unserer Kontrollmöglichkeiten und liegen daher ausschließlich in Ihrem Verantwortungsbereich. Der Verkauf unserer Produkte erfolgt nach Maßgabe unserer jeweils aktuellen Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen.

#### Prüfwerte

Die angegebenen Werte wurden, wenn nicht ausdrücklich anders angegeben, an genormten Prüfkörpern bei Raumtemperatur ermittelt. Die Angaben sind als Richtwerte anzusehen, nicht aber als verbindliche Mindestwerte. Bitte beachten Sie, dass die Eigenschaften durch die Werkzeuggestaltung, die Verarbeitungsbedingungen und durch die Einfärbung unter Umständen erheblich beeinflusst werden können.

#### Verarbeitungshinweis

Bei der Verarbeitung können unter den empfohlenen Verarbeitungsbedingungen geringe Mengen Spaltprodukte abgegeben werden. Gemäß Sicherheitsdatenblatt ist die Einhaltung der angegebenen Arbeitsplatzgrenzwerte durch ausreichende Absaugung und Belüftung am Arbeitsplatz zu gewährleisten, um Gesundheit und Wohlbefinden der Maschinenbediener nicht zu beeinträchtigen. Die vorgeschriebenen Verarbeitungstemperaturen dürfen nicht wesentlich überschritten werden, um eine stärkere partielle Zersetzung des Polymeren und Abspaltung von flüchtigen Zersetzungsprodukten zu vermeiden.

---

Herausgeber: Global Innovations - Polycarbonates

Bayer MaterialScience AG,  
D-51368 Leverkusen,  
[www.bayermaterialscience.com](http://www.bayermaterialscience.com)  
[pcc-info@bayermaterialscience.com](mailto:pcc-info@bayermaterialscience.com)

---

Seite 4 von 4 Seiten

Ausgabe 04.05.2010

**Makrolon**<sup>®</sup>  
ISO Datenblatt

## 7.2 Materialdatenblatt Durethan B30S [22]

DATENBLATT

**LANXESS**  
 Energizing Chemistry

## Durethan B 30 S 000000

PA 6, unverstärkt, Spritzguß

ISO Formmassenbezeichnung: ISO 1874-PA 6,GR,14-030

Eigenschaft	Prüfbedingung	Einheit	Norm	Richtwert	
				spritzfrisch	konditioniert
<b>Rheologische Eigenschaften</b>					
Verarbeitungsschwindigkeit, parallel	150x105x3; 260 °C / WZ 80 °C; 500 bar	%	i.A. ISO 2577	1.02	
Verarbeitungsschwindigkeit, senkrecht	150x105x3; 260 °C / WZ 80 °C; 500 bar	%	i.A. ISO 2577	1.16	
Nachschwindung, parallel	150x105x3; 120 °C; 4 h	%	i.A. ISO 2577	0.32	
Nachschwindung, senkrecht	150x105x3; 120 °C; 4 h	%	i.A. ISO 2577	0.4	
<b>Mechanische Eigenschaften (23 °C/50 % r. F.)</b>					
C Zug-Modul	1 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	3200	1000
C Streckspannung	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	80	40
C Streckdehnung	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	4.0	20
C Nominelle Bruchdehnung	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	20	> 50
C Zug-Kriech-Modul	1 h	MPa	ISO 899-1		800
C Zug-Kriech-Modul	1000 h	MPa	ISO 899-1		600
C Charpy-Schlagzähigkeit	23 °C	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179-1eU	N	N
C Charpy-Schlagzähigkeit	-30 °C	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179-1eU	N	N
C Charpy-Kerbschlagzähigkeit	23 °C	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179-1eA	< 10	20
C Charpy-Kerbschlagzähigkeit	-30 °C	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179-1eA	< 10	< 10
Izod-Schlagzähigkeit	23 °C	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180-1U	N	N
Izod-Schlagzähigkeit	-30 °C	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180-1U	N	N
Izod-Kerbschlagzähigkeit	23 °C	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180-1A	< 10	< 10
Biege-Modul	2 mm/min	MPa	ISO 178-A	2900	850
Biegefestigkeit	2 mm/min	MPa	ISO 178-A	110	35
Randfaserdehnung bei Höchstkraft	2 mm/min	%	ISO 178-A	6.0	8.0
3.5 % - Biegespannung	2 mm/min	MPa	ISO 178-A	95	25
C Durchstoß-Maximalkraft	23 °C	N	ISO 6603-2	5141	
C Durchstoß-Maximalkraft	-30 °C	N	ISO 6603-2	6543	
C Durchstoß-Arbeit	23 °C	J	ISO 6603-2	12	
C Durchstoß-Arbeit	-30 °C	J	ISO 6603-2	10	
Kugeldruckhärte		N/mm <sup>2</sup>	ISO 2039-1	140	50
<b>Thermische Eigenschaften</b>					
C Schmelztemperatur	10 °C/min	°C	ISO 11357-1,-3	222	
C Formbeständigkeitstemperatur	1.80 MPa	°C	ISO 75-1,-2	55	
C Formbeständigkeitstemperatur	0.45 MPa	°C	ISO 75-1,-2	160	
C Formbeständigkeitstemperatur	8.00 MPa	°C	ISO 75-1,-2	45	
Vicat-Erweichungstemperatur	50 N; 120 °C/h	°C	ISO 306	200	
C Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient, parallel	23 bis 55 °C	10 <sup>-7</sup> /K	ISO 11359-1,-2	1.0	
C Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient, senkrecht	23 bis 55 °C	10 <sup>-7</sup> /K	ISO 11359-1,-2	1.1	

Seite 1 von 3

Ausgabe 22.10.2013



## Durethan B 30 S 000000

Eigenschaft	Prüfbedingung	Einheit	Norm	Richtwert	
				spritzfrisch	konditioniert
C Sauerstoff-Index	Verfahren A	%	ISO 4589-2	26	
Glühdrahtprüfung (GWFI)	2.0 mm	°C	IEC 60695-2-12	750	
Brennverhalten US-FMVSS302	>=1.0 mm		ISO 3795	passed	
C Vicat-Erweichungstemperatur	50 N; 50 °C/h	°C	ISO 306	200	
<b>Elektrische Eigenschaften (23 °C/50 % r. F.)</b>					
C Relative Dielektrizitätszahl	100 Hz	-	IEC 60250	4.0	15
C Relative Dielektrizitätszahl	1 MHz	-	IEC 60250	3.5	4.0
C Dielektrischer Verlustfaktor	100 Hz	10 <sup>-4</sup>	IEC 60250	170	2000
C Dielektrischer Verlustfaktor	1 MHz	10 <sup>-4</sup>	IEC 60250	200	1200
C Spezifischer Durchgangswiderstand		Ohm·m	IEC 60093	1E13	1E10
C Spezifischer Oberflächenwiderstand		Ohm	IEC 60093	1E14	1E13
C Elektrische Festigkeit	1 mm	kV/mm	IEC 60243-1	30	30
C Vergleichszahl zur Kriechwegbildung CTI	Prüflösung A	V	IEC 60112	600 - 1,3	
Vergleichszahl zur Kriechwegbildung CTI M	Prüflösung B	Stufe	IEC 60112	600 M	
<b>Sonstige Eigenschaften (23 °C)</b>					
C Wasseraufnahme (Sättigungswert)	Wasser bei 23 °C	%	ISO 62	10	
C Wasseraufnahme (Gleichgewichtswert)	23 °C; 50 % r.F.	%	ISO 62	3	
C Dichte		kg/m <sup>3</sup>	ISO 1183	1140	
Schüttdichte		kg/m <sup>3</sup>	ISO 60	700	
<b>Herstellbedingungen für Probekörper</b>					
C Spritzgießen-Massetemperatur		°C	ISO 294	270	
C Spritzgießen-Werkzeugtemperatur		°C	ISO 294	80	
<b>Verarbeitungsempfehlungen</b>					
Trocknungstemperatur Trockenlufttrockner		°C	-	80	
Trocknungszeit Trockenlufttrockner		h	-	2-6	
Restfeuchtigkeit		%	nach Karl Fischer	0.03-0.12	
Massetemperatur (Tmin - Tmax)		°C	-	260-280	
Werkzeugtemperatur		°C	-	80-100	

C Diese Eigenschaftsmerkmale sind Bestandteil der Kunststoffdatenbank CAMPUS und basieren auf dem international festgelegten Katalog von Grunddaten für Kunststoffe ISO 10350.



## Durethan B 30 S 000000

---

### Haftungsausschluss

#### Haftungsklausel für Verkaufsprodukte

Die vorstehenden Informationen und unsere anwendungstechnische Beratung in Wort, Schrift und durch Versuche erfolgen nach bestem Wissen, gelten jedoch nur als unverbindliche Hinweise, auch in Bezug auf etwaige Schutzrechte Dritter. Die Beratung befreit Sie nicht von einer eigenen Prüfung unserer aktuellen Beratungshinweise insbesondere unserer Sicherheitsdatenblätter und technischen Informationen und unserer Produkte im Hinblick auf ihre Eignung für die beabsichtigten Verfahren und Zwecke. Anwendung, Verwendung und Verarbeitung unserer Produkte und der aufgrund unserer anwendungstechnischen Beratung von Ihnen hergestellten Produkte erfolgen außerhalb unserer Kontrollmöglichkeiten und liegen daher ausschließlich in Ihrem Verantwortungsbereich. Der Verkauf unserer Produkte erfolgt nach Maßgabe unserer jeweils aktuellen Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen.

#### Prüfwerte

Die angegebenen Werte wurden, wenn nicht ausdrücklich anders angegeben, an genormten Prüfkörpern bei Raumtemperatur ermittelt. Die Angaben sind als Richtwerte anzusehen, nicht aber als verbindliche Mindestwerte. Bitte beachten Sie, dass die Eigenschaften durch die Werkzeuggestaltung, die Verarbeitungsbedingungen und durch die Einfärbung unter Umständen erheblich beeinflusst werden können.

#### Verarbeitungshinweise

Bei der Verarbeitung können unter den empfohlenen Verarbeitungsbedingungen geringe Mengen Spaltprodukte abgegeben werden. Gemäß Sicherheitsdatenblatt ist die Einhaltung der angegebenen Arbeitsplatzgrenzwerte durch ausreichende Absaugung und Belüftung am Arbeitsplatz sicherzustellen, um Gesundheit und Wohlbefinden der Maschinenbediener nicht zu beeinträchtigen. Die vorgeschriebenen Verarbeitungstemperaturen dürfen nicht wesentlich überschritten werden, um eine stärkere partielle Zersetzung des Polymeren und Abspaltung von flüchtigen Zersetzungsprodukten zu vermeiden. Da überhöhte Temperaturen meist auf Bedienfehler oder Störungen in den Heizsystemen zurückzuführen sind, ist diesbezüglich besondere Sorgfalt und Kontrolle notwendig.

#### Konditionierung

Konditionierung in Anlehnung an ISO 1110 (70 °C; 62 % r. F.)

LANXESS DEUTSCHLAND GMBH | D - 50569 KÖLN

© LANXESS Deutschland GmbH

---

Seite 3 von 3

Ausgabe 22.10.2013



### 7.3 Zeitabhängige Kontaktwinkelmessung

Abbildung 52 und Abbildung 53 zeigen am Beispiel des unbeschichteten M303 die Ergebnisse der zeitabhängigen Kontaktwinkelmessungen von Ethylencarbonat und Bromonaphthalin. Diese Messungen wurden durchgeführt, um die angenommene homogene Tropfentemperatur und den damit verbundenen stabilen Kontaktwinkel nach drei Sekunden zu bestätigen. Die Kontaktwinkel bei den Temperaturen 185°C und 200°C wurden teilweise aus der Auswertung genommen, da bei diesen Temperaturen die stabile Kontaktwinkelmessung aufgrund von Verdampfungsvorgängen erschwert wurde.

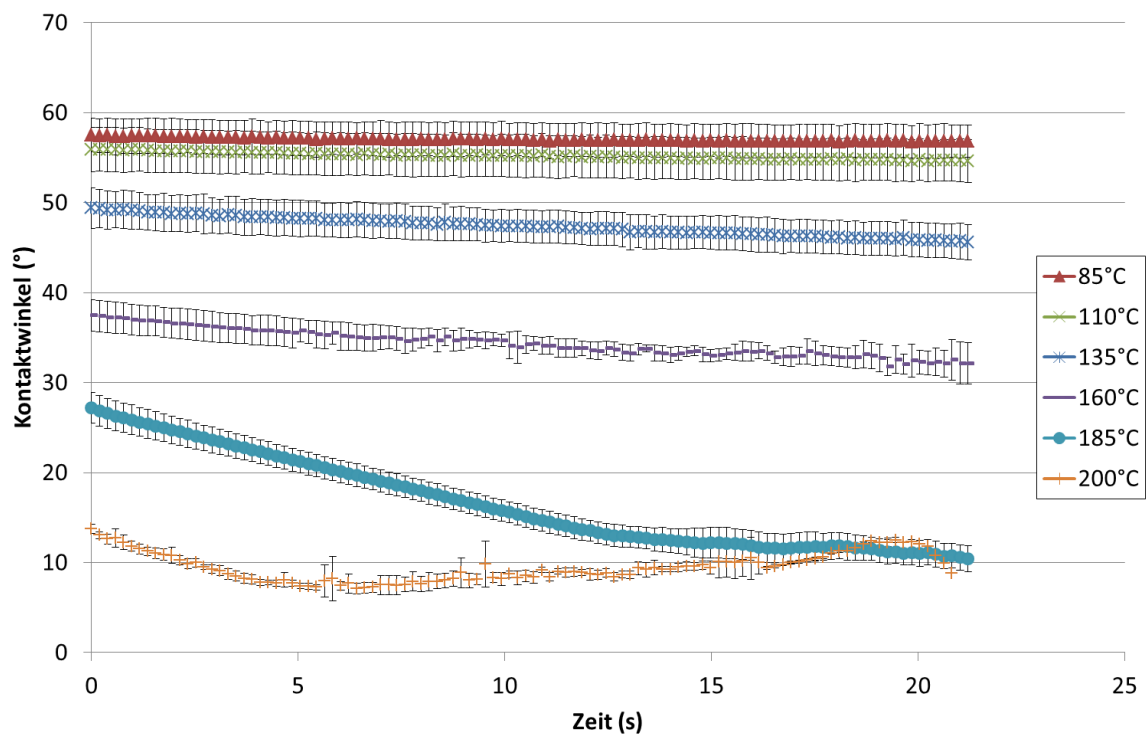


Abbildung 52: Zeitabhängiger Kontaktwinkel von Ethylencarbonat auf M303.

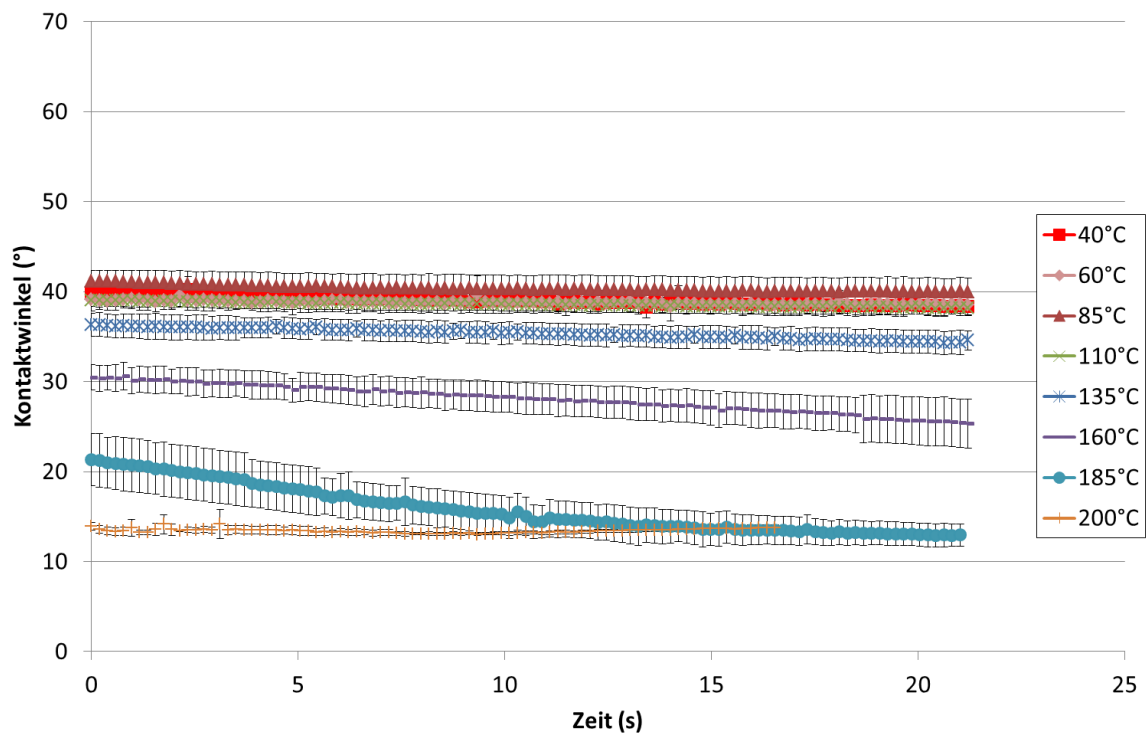


Abbildung 53: Zeitabhängiger Kontaktwinkel von Bromonaphthalin auf M303.

#### 7.4 Thermische Simulation mittels CAE Abaqus

Um die in Anhang 7.3 ermittelten Ergebnisse zu bestätigen, wurde mittels CAE Abaqus der Temperaturverlauf innerhalb des Tropfens simuliert. Es wurde eine vereinfachte 2-D Simulation mit 2030 Vernetzungselementen durchgeführt. Aufgrund der Komplexität der Simulation wurde lediglich die reine Wärmeleitung durch die Kontaktfläche berechnet, die Grenzfläche zwischen Luft und Tropfen adiabatisch angenommen.

Abbildung 54 zeigt den Temperaturverlauf im Ethylencarbonattropfen bei der maximalen Temperatur von 200°C nach drei Sekunden. Daraus ist ersichtlich, dass die für den Kontaktwinkel maßgebenden Bereiche (siehe weißer Kreis) nach drei Sekunden die vorgegebene Temperatur erreicht haben und dadurch ein stabiler Kontaktwinkel garantiert werden kann.

Abbildung 55 zeigt den Temperaturverlauf im Bromonaphthalintropfen bei der maximalen Temperatur von 200°C nach drei Sekunden. Auch hier haben die für den Kontaktwinkel maßgebenden Bereiche die vorgegebene Temperatur erreicht.

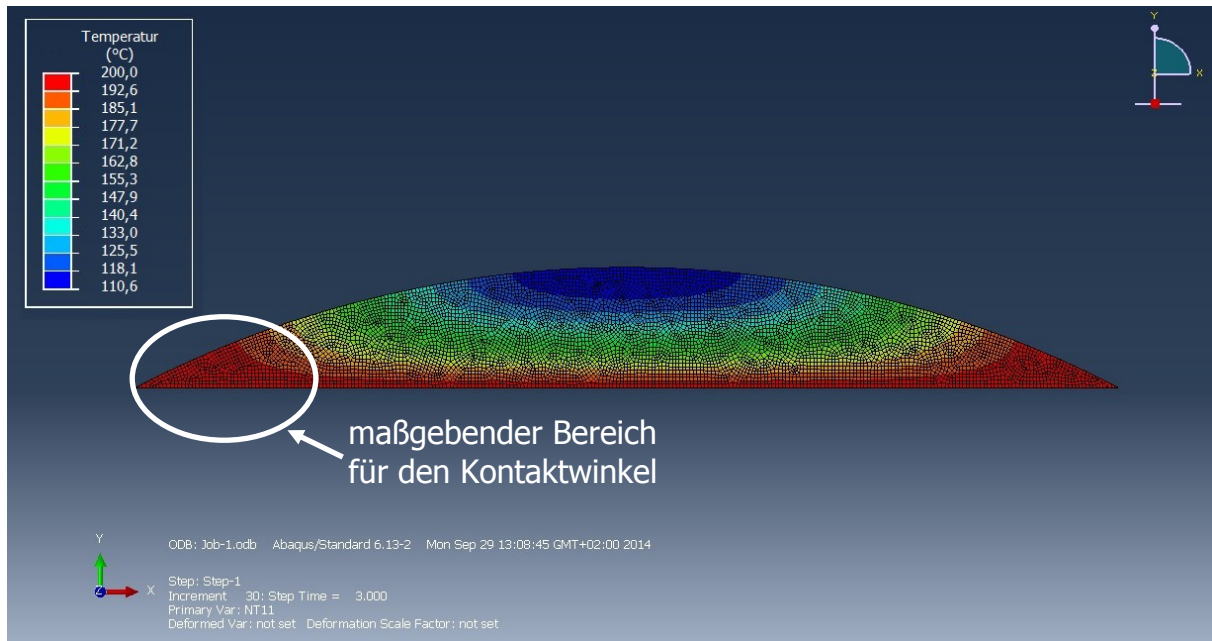


Abbildung 54: Temperaturverlauf im Ethylencarbonat-Tropfen bei 200°C nach 3s.

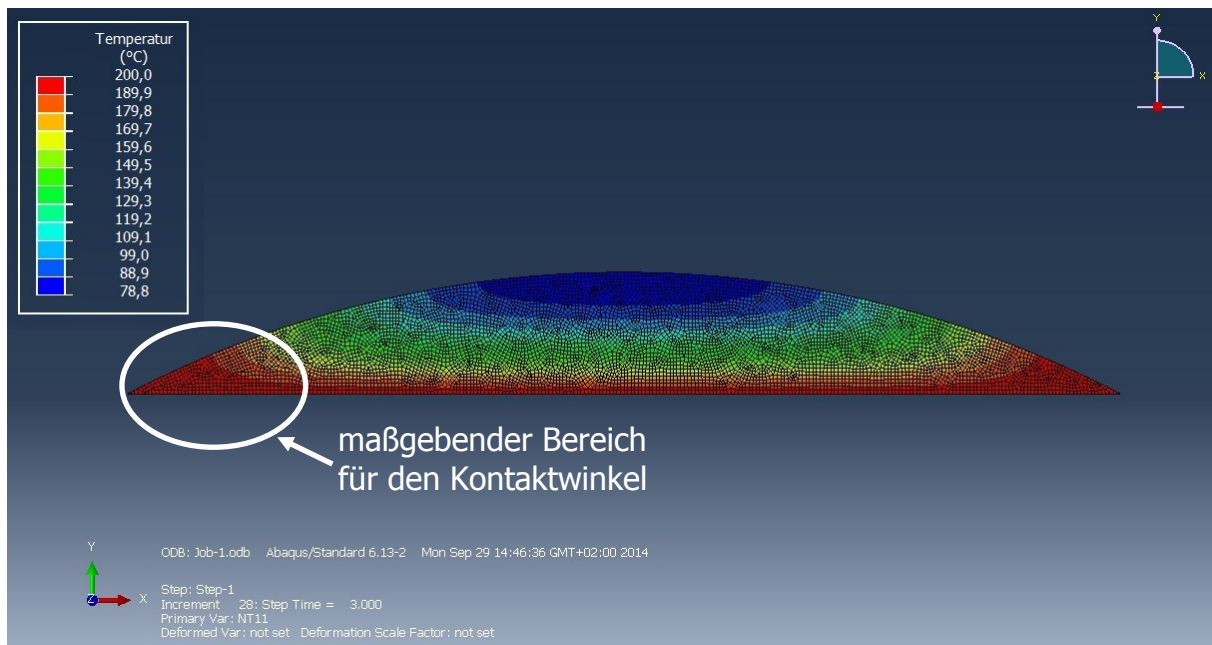


Abbildung 55: Temperaturverlauf im Bromonaphthalin-Tropfen bei 200°C nach 3s.



## 7.5 Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen

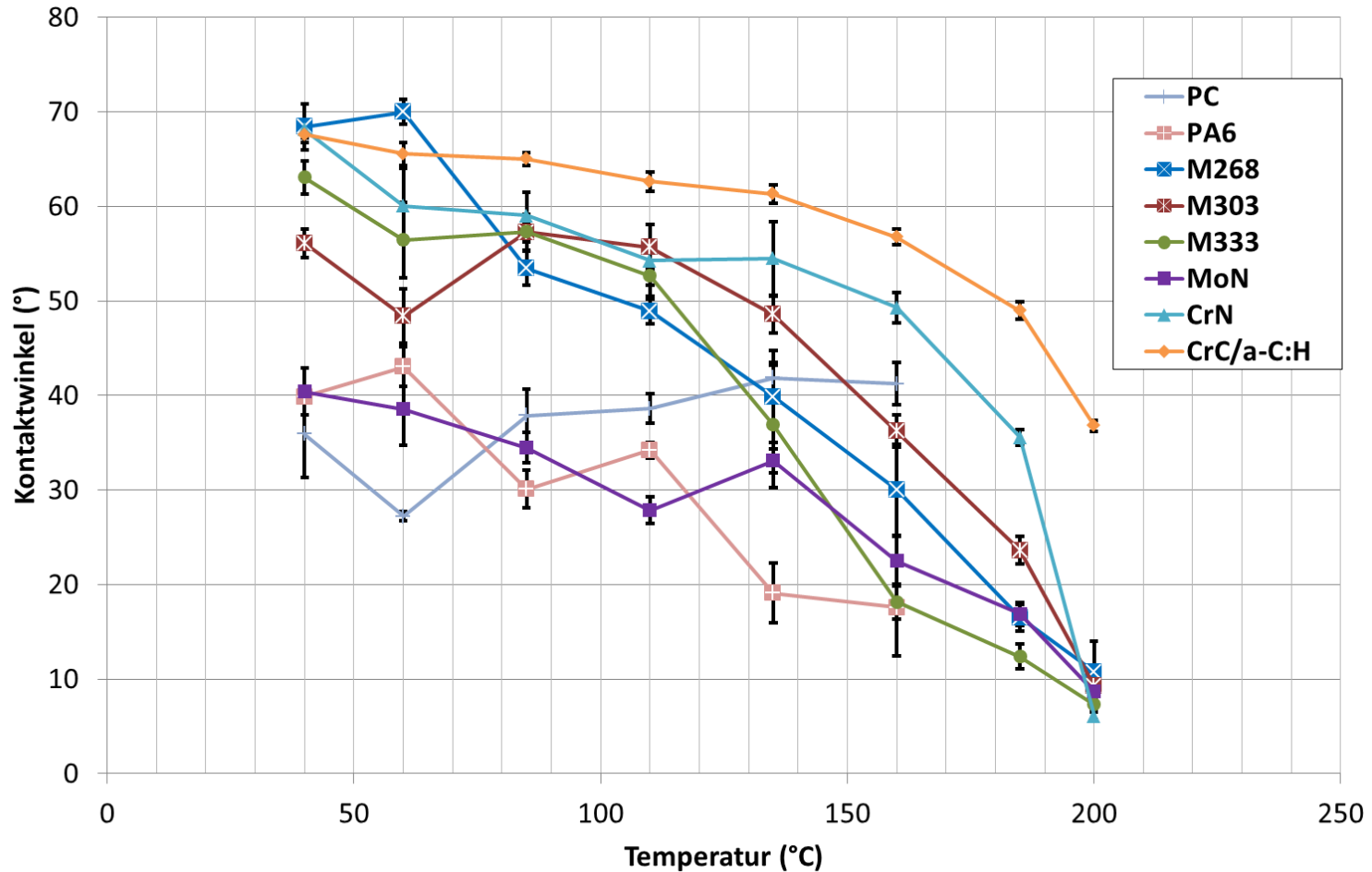


Abbildung 56: Kontaktwinkel von Ethylencarbonat in Abhängigkeit der Temperatur auf den verschiedenen Oberflächen.

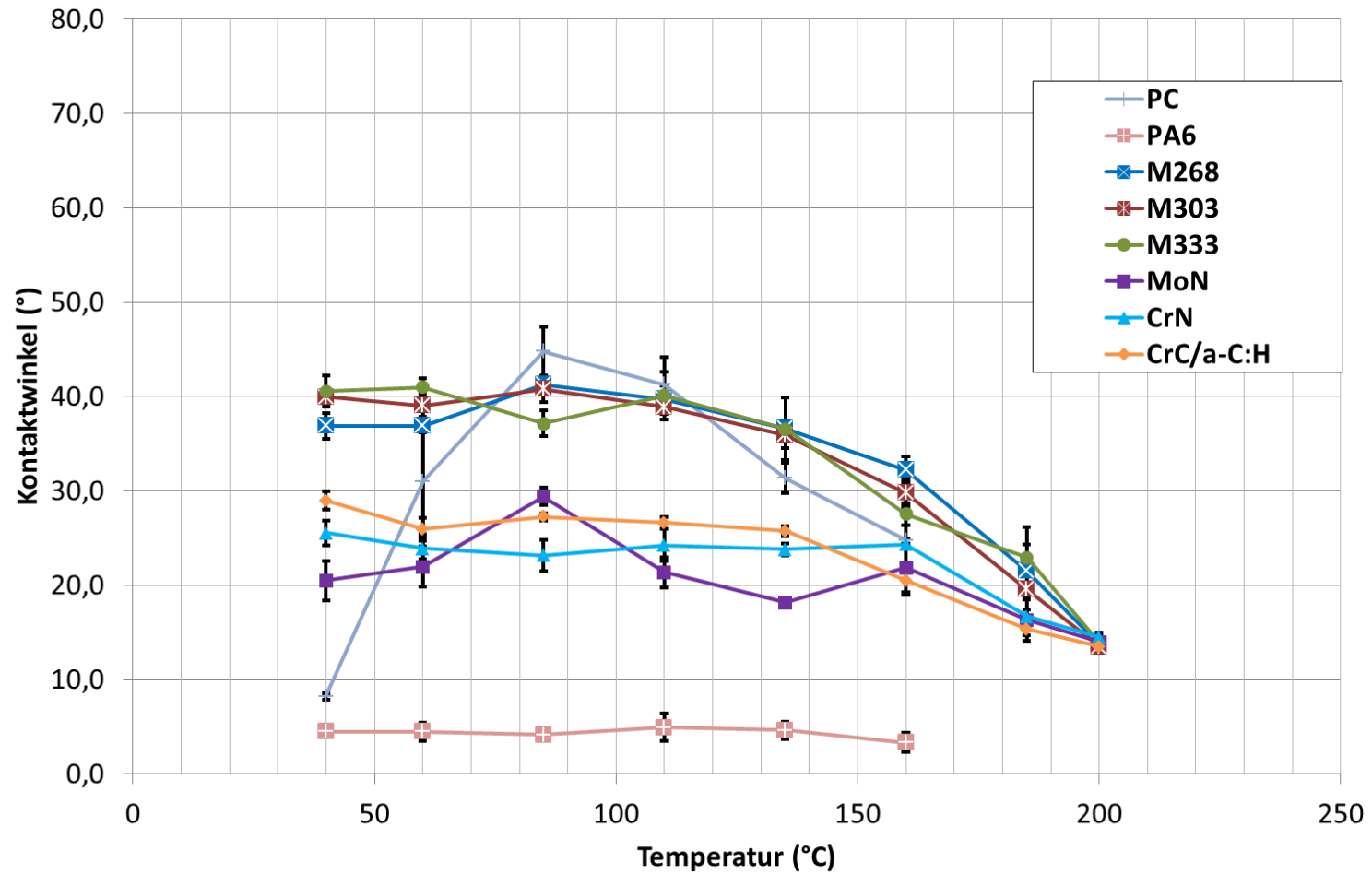


Abbildung 57: Kontaktwinkel von Bromonaphthalin in Abhängigkeit der Temperatur auf den verschiedenen Oberflächen.

## 7.6 Einfluss der wahren Oberfläche nach Wenzel auf die Grenzflächenspannung

Laut Wenzel [29] hängt der Kontaktwinkel nicht nur von den beteiligten Spannungen ab, sondern auch von der Rauigkeit der Oberfläche. Der Kontaktwinkel  $\theta^*$  ergibt sich somit nach Wenzel [29] aus Gleichung ( 14 ). Dabei stellt  $r$  das Flächenverhältnis der tatsächlichen Oberfläche zur projizierten Oberfläche dar und  $\theta$  den Kontaktwinkel nach Young.

$$\cos(\theta^*) = r \cdot \cos(\theta) \quad ( 14 )$$

Das Flächenverhältnis  $r$  wurde mittels AFM-Messungen ermittelt und ist in Tabelle 19 und Abbildung 58 für die Probekörper aufgelistet. Abbildung 58 zeigt, dass es teilweise signifikante Unterschiede in den Flächenverhältnissen der Probekörper gibt.

*Tabelle 19: Flächenverhältnis  $r$  der untersuchten Probekörper.*

<b>Oberfläche</b>	<b>sRa (nm)</b>	<b>Flächenverhältnis <math>r</math></b>	<b>Standard-abweichung</b>
M268 VMR unbeschichtet	4,93 ± 0,88	1,00092	0,00014
M303 unbeschichtet	3,96 ± 0,41	1,00070	0,00005
M333 IP unbeschichtet	9,47 ± 1,27	1,00334	0,00161
CrC/a-C:H	14,78 ± 1,23	1,00752	0,00110
CrN	19,56 ± 1,01	1,01842	0,00099
MoN	12,82 ± 1,22	1,00273	0,00051

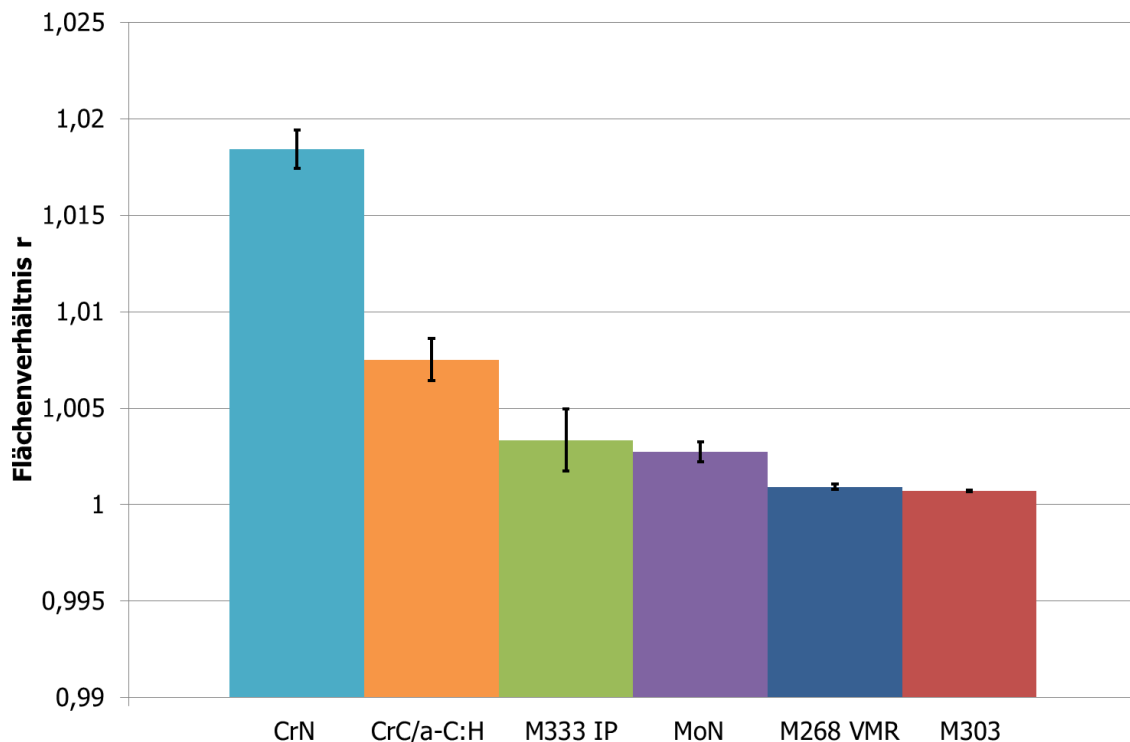


Abbildung 58: Flächenverhältnisse der untersuchten Probekörper.

Um den Einfluss der Rauigkeit auf die Benetzungsparameter zu überprüfen, wurde exemplarisch für die Beschichtung CrC/a-C:H die Grenzflächenspannung zu den verwendeten Polymeren mit den korrigierten Kontaktwinkeln ermittelt.

Abbildung 59 und Abbildung 60 zeigen den Einfluss der wahren Oberfläche auf die gemessenen Kontaktwinkel von Ethylencarbonat und Bromonaphthalin auf der CrC/a-C:H Beschichtung. Dabei ist zu erkennen, dass kein signifikanter Unterschied in den Kontaktwinkeln für diese Oberfläche besteht.

Aus den Kontaktwinkeln wurde anschließend die korrigierte Oberflächenenergie sowie deren Anteile ermittelt und in Abbildung 61 dargestellt. Im Vergleich zu den scheinbaren Oberflächenenergien (vgl. Abbildung 47, Seite 57) ergibt sich ein Unterschied von maximal 0,3 mN/m, der geringer als die Reproduzierbarkeit der Messmethode selbst ist.

Die resultierende Abweichung der Ausgleichsgeraden der korrigierten zu der scheinbaren Oberflächenenergie und deren Anteile ist in Tabelle 20 dargestellt.

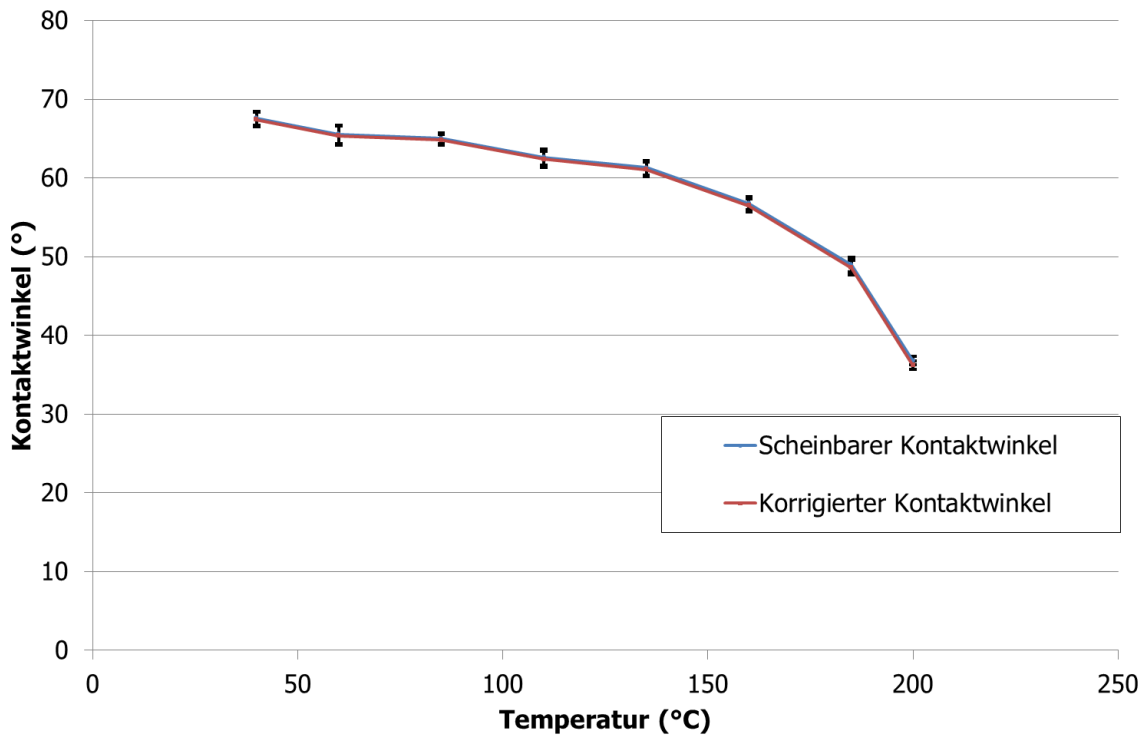


Abbildung 59: Kontaktwinkel von Ethylencarbonat auf CrC/a-C:H mit dem Einfluss der wahren Oberfläche.

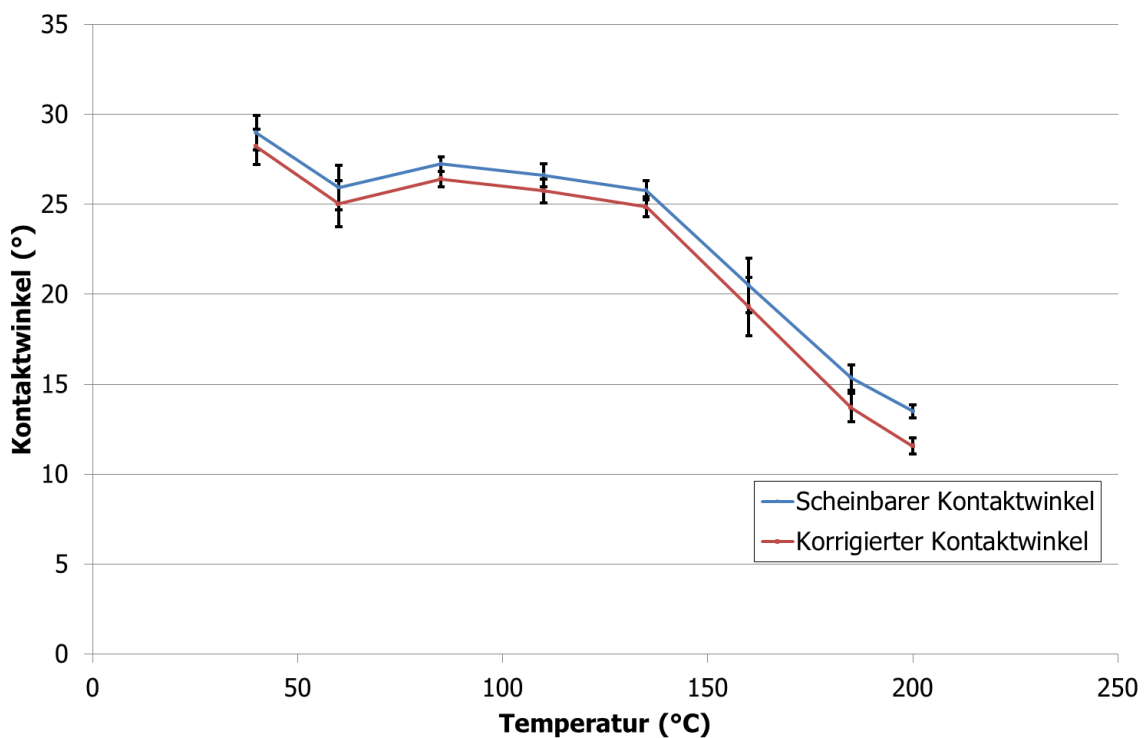


Abbildung 60: Kontaktwinkel von Bromonaphthalin auf CrC/a-C:H mit dem Einfluss der wahren Oberfläche.

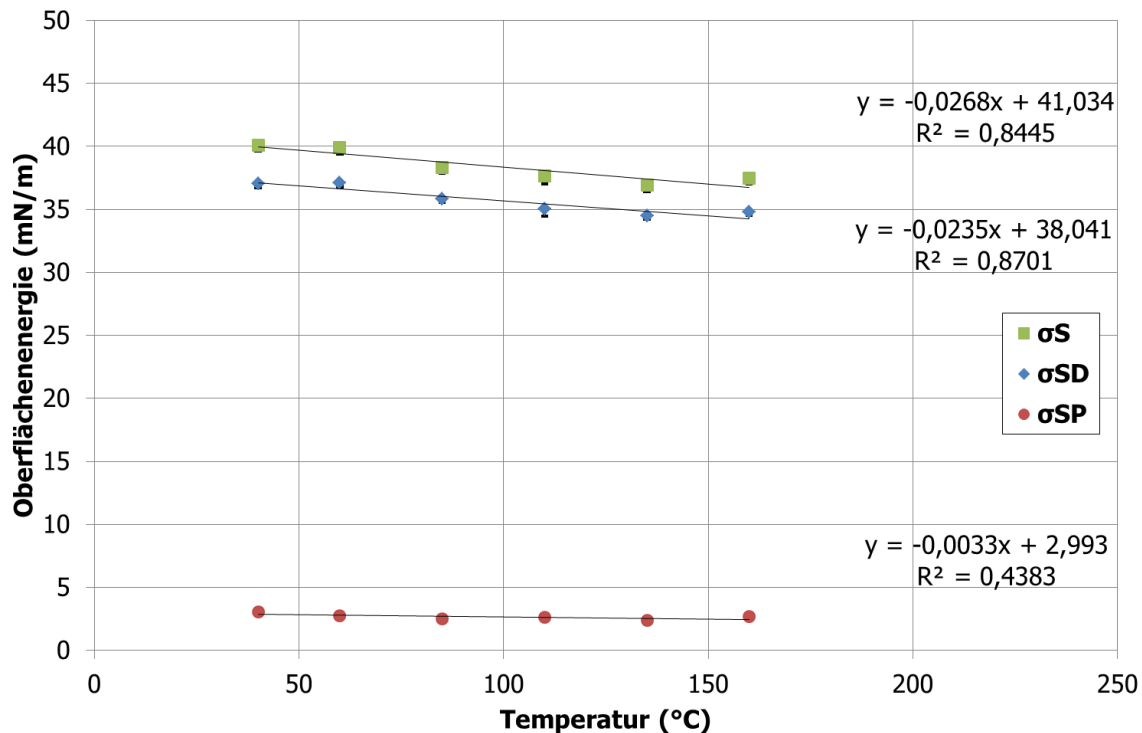


Abbildung 61: Oberflächenenergie in Abhängigkeit der Temperatur von M333\_CrC/a-C:H mit dem Einfluss der wahren Oberfläche.

Tabelle 20: Vergleich der Ausgleichsgeraden der scheinbaren und korrigierten Oberflächenenergie und derer Anteile.

scheinbare Oberflächenenergie			korrigierte Oberflächenenergie		
	Geradengleichung	$R^2$		Geradengleichung	$R^2$
$\sigma_S$	$y = -0,0268x + 40,774$	0,8468	$\sigma_S$	$y = -0,0268x + 41,034$	0,8445
$\sigma_S^D$	$y = -0,0234x + 37,765$	0,8722	$\sigma_S^D$	$y = -0,0235x + 38,041$	0,8701
$\sigma_S^P$	$y = -0,0034x + 3,0084$	0,4461	$\sigma_S^P$	$y = -0,0033x + 2,993$	0,4383

Mit diesen Ergebnissen wurde die korrigierte Grenzflächenspannung zwischen PC, PA6 und der CrC/a-C:H Beschichtung berechnet und zum Vergleich in Abbildung 62 dargestellt. Wie vermutet, ergibt sich kein signifikanter Unterschied in der Grenzflächenspannung für das jeweilige Polymer, da der Einfluss des Flächenverhältnisses wesentlich geringer ist, als die Streuung der Kontaktwinkelmessungen.

Quantitativ betrachtet, unterscheidet sich die korrigierte Grenzflächenspannung zwischen PA6 und der CrC/a-C:H Beschichtung, verglichen mit der scheinbaren Grenzflächenspannung, um 0,085 %. Der Unterschied der Grenzflächenspannungen bei PC beträgt 0,732 %.

Obwohl es teilweise signifikante Unterschiede in den Flächenverhältnissen  $r$  gibt, wurde auf die aufwendigere Auswertung der korrigierten Grenzflächenspannung verzichtet, da dieser Einfluss bei den untersuchten Oberflächen keine signifikante Änderung hervorruft. Weiters ist zu hinterfragen, inwiefern die Auswertung der korrigierten Grenzflächenspannung aufgrund ihrer aufwendigeren Auswertung eine praxisnahe Anwendung zur Vorhersage von Entformungskräften finden wird. Ein weiterer Aspekt ist, dass die korrigierte Grenzflächenspannung auf ideal glatte Oberflächen rückgeführt wird, solche Oberflächen in der Praxis des Spritzgießens aber selten eingesetzt werden.

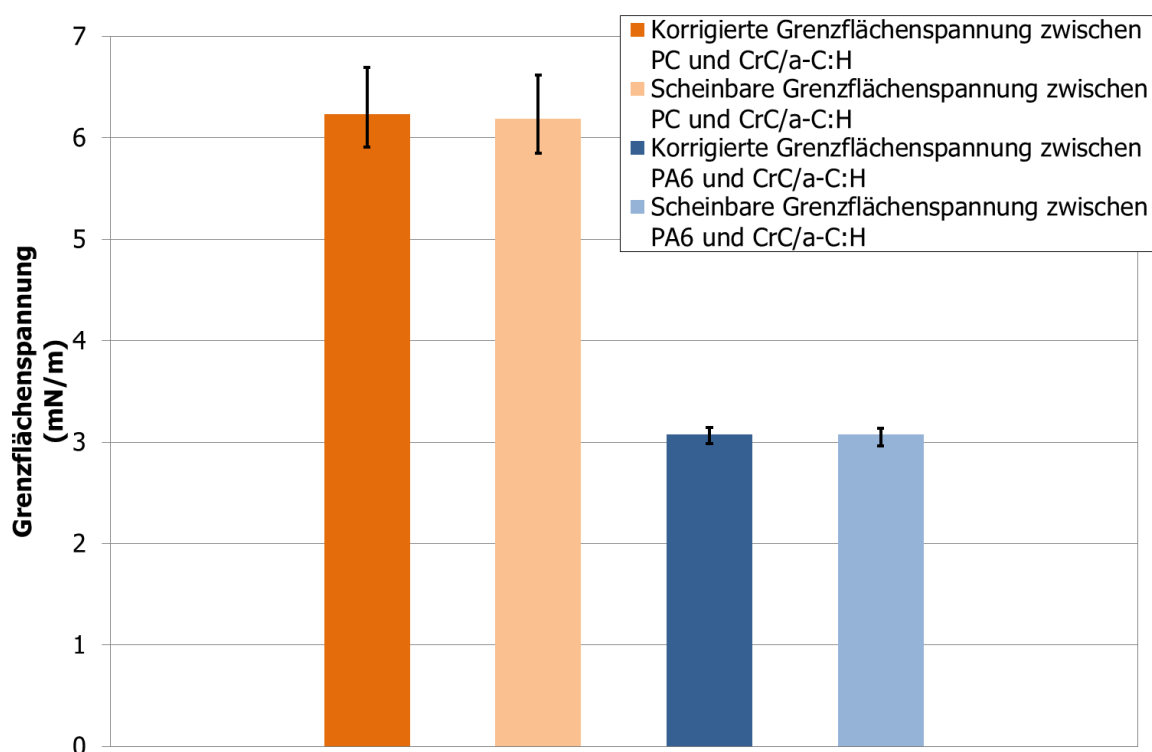


Abbildung 62: Grenzflächenspannungen zwischen PC, PA6 und der CrC/a-C:H Beschichtung unter Berücksichtigung des Einflusses der wahren Oberfläche.

## 7.7 Allgemeiner Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Grenzflächenspannung

Zusätzlich zu dem in Kapitel 7.5 untersuchten Einfluss der wahren Oberfläche auf die Grenzflächenspannung wurde allgemein der Einfluss der Oberflächenrauigkeit untersucht, um zu überprüfen, ab welchem Flächenverhältnis  $r$  ein nicht mehr zu vernachlässigenden Einfluss auf die Grenzflächenspannung besteht. Dazu wurden die gemessenen Kontaktwinkel der bereits untersuchten CrC/a-C:H Beschichtung bei 90°C mit steigendem Flächenverhältnis (von  $r = 1 - 1,1$ ) mittels Gleichung ( 14 ) auf Seite 83 korrigiert. Mit den korrigierten Kontaktwinkeln wurde anschließend die Grenzflächenspannung zu Polycarbonat berechnet.

Abbildung 63 zeigt den Einfluss des Flächenverhältnisses  $r$  auf die berechnete Grenzflächenspannung. Es ist zu erkennen, dass mit steigendem Flächenverhältnis  $r$  die Grenzflächenspannung linear zunimmt, die Grenzflächenspannung unkorrigiert unterschätzt werden würde.

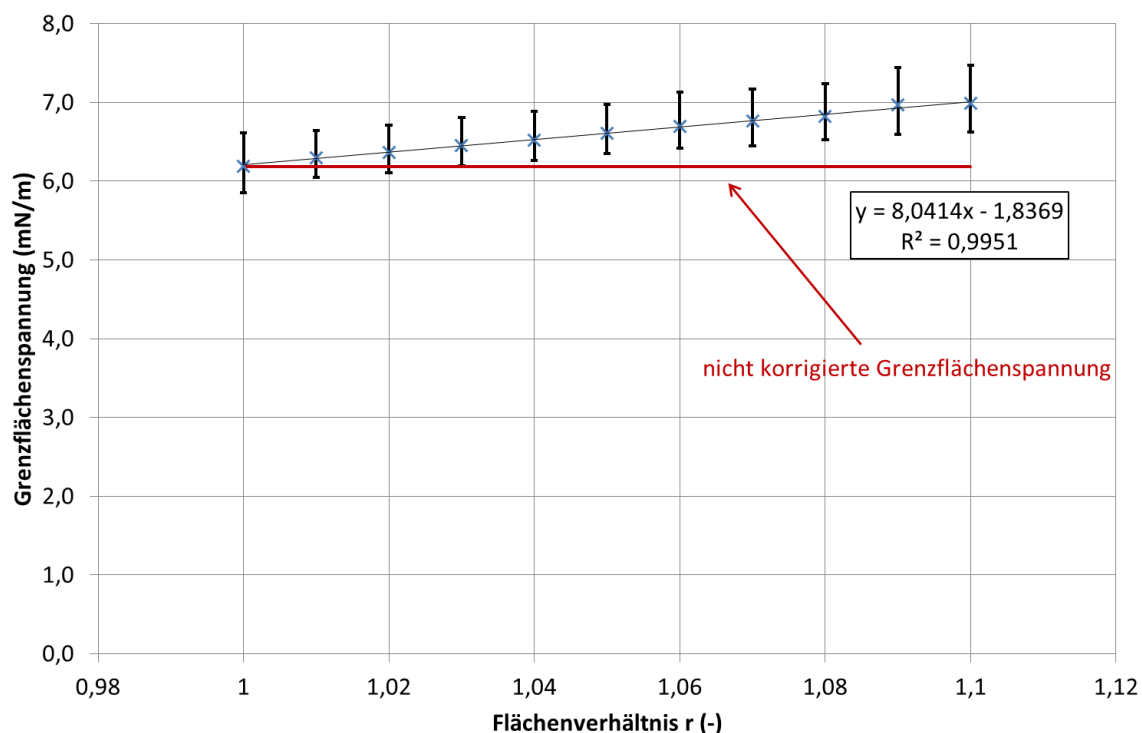


Abbildung 63: Einfluss des Flächenverhältnis  $r$  auf die Grenzflächenspannung zwischen der Beschichtung CrC/a-C:H und dem Polymer PC.



In dieser Arbeit ist erst ein eindeutiger Einfluss des Flächenverhältnisses ab  $r = 1,1$  ersichtlich, da sich hier die Streuungen nicht mehr überschneiden. Ab diesem Flächenverhältnis  $r$  ist die Differenz der Mittelwerte der Grenzflächenspannungen größer als die Summe ihrer Standardabweichungen. Die nach Wenzel berechneten Grenzflächenspannungen und ihre Abweichungen sind in Tabelle 21 dargestellt.

*Tabelle 21: Korrigierte Grenzflächenspannungen in Abhängigkeit des Flächenverhältnisses  $r$ .*

<b>Flächen- verhältnis <math>r</math> (-)</b>	<b>Grenzflächen- spannung (mN/m)</b>	<b>Tol. + (mN/m)</b>	<b>Tol.- (mN/m)</b>	<b>Abweichung absolut (mN/m)</b>	<b>Abweichung (%)</b>
1,00	6,19	0,43	0,34	-	-
1,01	6,30	0,34	0,25	0,11	1,76
1,02	6,37	0,35	0,26	0,18	2,88
1,03	6,45	0,35	0,26	0,26	4,25
1,04	6,52	0,36	0,26	0,33	5,40
1,05	6,61	0,37	0,25	0,42	6,77
1,06	6,69	0,43	0,28	0,51	8,19
1,07	6,76	0,40	0,32	0,57	9,24
1,08	6,83	0,42	0,30	0,64	10,29
1,09	6,97	0,47	0,37	0,78	12,65
1,10	6,99	0,49	0,37	0,80	12,88

Quantitativ betrachtet unterscheiden sich die Mittelwerte der Grenzflächenspannungen zwischen dem höchsten Flächenverhältnis  $r = 1,1$  und der ideal glatten Oberfläche bereits um 12,88 %.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der Einfluss der Oberflächenrauigkeit ab einem gewissen Rauigkeitsbereich nicht mehr vernachlässigt werden sollte, da es sonst zu ungenauen Vorhersagen des Reibwertverhaltens kommen kann. In dieser Arbeit wurden ausschließlich hochglanzpolierte Oberflächen verwendet. Die berechneten Unterschiede zeigen allerdings, dass bei den verwendeten Oberflächen der Einfluss der Rauigkeit vernachlässigt werden kann, da die Streuung der Kontaktwinkelmessungen einen größeren Einfluss besitzt als die Oberflächenrauigkeit.

## 7.8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Messprinzip des Rasterkraftmikroskops (links), Geometrie-Parameter einer AFM-Sonde: Spitzenradius $r$ und halber Öffnungswinkel $\alpha$ (rechts) [27].	4
Abbildung 2:	Strahlengang von konfokalen Mikroskopen [12].	5
Abbildung 3:	Zusammenhang zwischen Benetzungswinkel und Benetzungsverhalten von Klebstoffen [13].	6
Abbildung 4:	Ausbildung des Randwinkels eines Tropfens auf einer Festkörperoberfläche [21].	7
Abbildung 5:	Zeitliche Veränderung des statischen Kontaktwinkels [16].	8
Abbildung 6:	Berechnung des polaren und dispersen Anteils der Oberflächenenergie [19].	11
Abbildung 7:	Geometrie des hängenden Tropfens (links), Darstellung der Tropfenkontur mit eingezeichneten Hauptkrümmungskreisabschnitten (Radius $r_1$ , grün und Radius $r_2$ , blau) (rechts) [15].	12
Abbildung 8:	Arithmetischer Mittenrauwert $R_a$ [25].	16
Abbildung 9:	Rasterkraftmikroskop MFP-3D [1].	21
Abbildung 10:	Konfokales Weißlichtmikroskop MicroProf <sup>®</sup> (chromatisch kodierter, konfokaler Punktsensor).	22
Abbildung 11:	Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung und dessen polarer Anteil von Ethylencarbonat.	24
Abbildung 12:	Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung und dessen polarer Anteil von Bromonaphthalin.	25

Abbildung 13:	Kontaktwinkelmessgerät DSA100 (links), mit adaptiven Aufrüstungen gegen Licht- und Wärmestrahlung (rechts). .....	25
Abbildung 14:	Spritzgießmaschine Wittmann Battenfeld HM 110/350H. ....	26
Abbildung 15:	Spritzgießwerkzeug für die Reibwertuntersuchungen. ....	27
Abbildung 16:	Kunststoff-Probekörper und Geometrie für Reibwertversuche [26].....	28
Abbildung 17:	Schnittbild des Reibwertwerkzeugs [26].....	29
Abbildung 18:	Entnahmesituation mit Roboter und pneumatisch betätigtem Greifer. ....	31
Abbildung 19:	Verteilung der Messpositionen für die Oberflächencharakterisierung.....	31
Abbildung 20:	Darstellung der Messpositionen der Kontaktwinkelmessungen auf einem Probekörper.....	32
Abbildung 21:	Automatische Kontaktwinkelmessung mittels Software von BrNa auf einer CrC/a-C:H Beschichtung bei 85°C. ....	33
Abbildung 22:	Symbolische Darstellung des Reibwertversuches [5].....	34
Abbildung 23:	Beispielhafter Reibkraftverlauf über den Entformungsweg [5]. .	34
Abbildung 24:	M268 VMR unbeschichtet als 2D-Topographiebild (links) und 3D-Topographiebild (rechts).....	37
Abbildung 25:	M303 unbeschichtet als 2D-Topographiebild (links) und 3D-Topographiebild (rechts).....	38
Abbildung 26:	M333 IP unbeschichtet als 2D-Topographiebild (links) und 3D-Topographiebild (rechts).....	39

Abbildung 27: MoN als 2D-Topographiebild (links) und 3D-Topographiebild (rechts). .....	40
Abbildung 28: CrN als 2D-Topographiebild (links) und 3D-Topographiebild (rechts).....	41
Abbildung 29: CrC/a-C:H als 2D-Topographiebild (links) und 3D-Topographiebild (rechts).....	42
Abbildung 30: 2D-Darstellung der Rastermessung (links), 3D-Darstellung der Rastermessung (rechts) des unbeschichteten M268 VMR. ....	43
Abbildung 31: 2D-Darstellung der Rastermessung (links), 3D-Darstellung der Rastermessung (rechts) des unbeschichteten M303.....	44
Abbildung 32: 2D-Darstellung der Rastermessung (links), 3D-Darstellung der Rastermessung (rechts) des unbeschichteten M333 IP. ....	44
Abbildung 33: 2D-Darstellung der Rastermessung (links), 3D-Darstellung der Rastermessung (rechts) der MoN-Beschichtung.....	45
Abbildung 34: 2D-Darstellung der Rastermessung (links), 3D-Darstellung der Rastermessung (rechts) der CrN-Beschichtung.....	45
Abbildung 35: 2D-Darstellung der Rastermessung (links), 3D-Darstellung der Rastermessung (rechts) der CrC/a-C:H-Beschichtung. ....	46
Abbildung 36: Kontaktwinkel von Ethylencarbonat auf PC-Probepplatten bei verschiedenen Temperaturen. ....	47
Abbildung 37: Kontaktwinkel von Bromonaphthalin auf PC-Probepplatten bei verschiedenen Temperaturen. ....	48
Abbildung 38: Oberflächenenergie von PC Makrolon in Abhängigkeit der Temperatur.....	48

Abbildung 39: Kontaktwinkel von Ethylencarbonat auf PA6-Probepplatten bei verschiedenen Temperaturen.....	49
Abbildung 40: Kontaktwinkel von Bromonaphthalin auf PA6-Probepplatten bei verschiedenen Temperaturen.....	50
Abbildung 41: Oberflächenenergie von Durethan B30S (PA6) in Abhängigkeit der Temperatur.....	50
Abbildung 42: Oberflächenenergie von M268 VMR unbeschichtet in Abhängigkeit von der Temperatur. ....	52
Abbildung 43: Oberflächenenergie von M303 unbeschichtet in Abhängigkeit von der Temperatur.....	53
Abbildung 44: Oberflächenenergie von M333 IP unbeschichtet in Abhängigkeit von der Temperatur. ....	54
Abbildung 45: Oberflächenenergie von MoN in Abhängigkeit von der Temperatur.....	55
Abbildung 46: Oberflächenenergie von CrN in Abhängigkeit von der Temperatur.....	56
Abbildung 47: Oberflächenenergie von CrC/aC:H in Abhängigkeit von der Temperatur.....	57
Abbildung 48: Grenzflächenspannungen zwischen PA6 (Durethan B30S) und den verschiedenen Oberflächen bei 90°C.....	59
Abbildung 49: Grenzflächenspannungen zwischen PC (Makrolon 2407) und den verschiedenen Oberflächen.....	60
Abbildung 50: Haftreibwerte $\mu_0$ von PA6 (Durethan B30S) auf den untersuchten drei Stahl- bzw. Beschichtungstypen als Funktion des Kontaktdruckes und der Oberfläche.....	61

Abbildung 51: Haftreibungswerte $\mu_0$ von PC (Makrolon 2407) auf den untersuchten drei Stahl- bzw. Beschichtungstypen als Funktion des Kontaktdruckes und der Oberfläche. ....	62
Abbildung 52: Zeitabhängiger Kontaktwinkel von Ethylencarbonat auf M303. ....	78
Abbildung 53: Zeitabhängiger Kontaktwinkel von Bromonaphthalin auf M303. ....	79
Abbildung 54: Temperaturverlauf im Ethylencarbonat-Tropfen bei 200°C nach 3s. ....	80
Abbildung 55: Temperaturverlauf im Bromonaphthalin-Tropfen bei 200°C nach 3s. ....	80
Abbildung 56: Kontaktwinkel von Ethylencarbonat in Abhängigkeit der Temperatur auf den verschiedenen Oberflächen. ....	81
Abbildung 57: Kontaktwinkel von Bromonaphthalin in Abhängigkeit der Temperatur auf den verschiedenen Oberflächen. ....	82
Abbildung 58: Flächenverhältnisse der untersuchten Probekörper. ....	84
Abbildung 59: Kontaktwinkel von Ethylencarbonat auf CrC/a-C:H mit dem Einfluss der wahren Oberfläche. ....	85
Abbildung 60: Kontaktwinkel von Bromonaphthalin auf CrC/a-C:H mit dem Einfluss der wahren Oberfläche. ....	85
Abbildung 61: Oberflächenenergie in Abhängigkeit der Temperatur von M333_CrC/a-C:H mit dem Einfluss der wahren Oberfläche. ....	86
Abbildung 62: Grenzflächenspannungen zwischen PC, PA6 und der CrC/a-C:H Beschichtung unter Berücksichtigung des Einflusses der wahren Oberfläche. ....	87

Abbildung 63: Einfluss des Flächenverhältnis  $r$  auf die Grenzflächenspannung zwischen der Beschichtung CrC/a-C:H und dem Polymer PC.....88

## 7.9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Auflistung von Oberflächenenergien verschiedener Oberflächen, mittels Kontaktwinkelmessung der Firma Krüss GmbH [17].	14
Tabelle 2:	Verwendete Probekörper mit den jeweiligen Oberflächenbeschichtungen.	17
Tabelle 3:	Chemische Zusammensetzung des Böhler M333 Isoplast [10].	18
Tabelle 4:	Chemische Zusammensetzung des Böhler M268 VMR [11].	18
Tabelle 5:	Chemische Zusammensetzung des Böhler M303 Extra [9].	19
Tabelle 6:	Übersicht über verwendete Testflüssigkeiten bei den jeweiligen Messmodi [14].	23
Tabelle 7:	Technische Daten der Spritzgießmaschine Wittmann Battenfeld HM110/350H/130V.	27
Tabelle 8:	Produktionsparameter/-daten für die praktischen Reibwertuntersuchungen.	30
Tabelle 9:	Übersicht über die Ergebnisse aus den AFM-Messungen der verschiedenen Oberflächen.	36
Tabelle 10:	Ergebnisse der Rauigkeitsmessungen von M268 VMR unbeschichtet.	37
Tabelle 11:	Ergebnisse der Rauigkeitsmessungen von M303 unbeschichtet.	38
Tabelle 12:	Ergebnisse der Rauigkeitsmessungen von M333 IP unbeschichtet.	39
Tabelle 13:	Ergebnisse der Rauigkeitsmessungen von MoN.	40
Tabelle 14:	Ergebnisse der Rauigkeitsmessungen von CrN.	41



Tabelle 15:	Ergebnisse der Rauigkeitsmessungen von CrC/a-C:H. ....	42
Tabelle 16:	Werte für die Temperaturabhängigkeit der Oberflächenenergie von PC und PA6 (T in °C). ....	51
Tabelle 17:	Werte für die Temperaturabhängigkeit der Oberflächenenergien aller Probekörper.....	58
Tabelle 18:	Oberflächenenergie aller Probekörper bei der (Entformungs)temperatur von 90°C. ....	58
Tabelle 19:	Flächenverhältnis r der untersuchten Probekörper. ....	83
Tabelle 20:	Vergleich der Ausgleichsgeraden der scheinbaren und korrigierten Oberflächenenergie und derer Anteile.....	86
Tabelle 21:	Korrigierte Grenzflächenspannungen in Abhängigkeit des Flächenverhältnisses r. ....	89

## 7.10 Verwendete Abkürzungen

$\sigma_s$	Oberflächenenergie der festen Phase
$\sigma_l$	Oberflächenspannung der flüssigen Phase
$\gamma_{sl}$	Grenzflächenspannung
$\theta$	Kontaktwinkel
$\theta^*$	Rauigkeitskorrigierter Kontaktwinkel
$r$	Flächenverhältnis
$\sigma_l^P$	polarer Anteil Oberflächenspannung
$\sigma_l^D$	dispenser Anteil Oberflächenspannung
$\sigma_s^P$	polarer Anteil Oberflächenenergie
$\sigma_s^D$	dispenser Anteil Oberflächenenergie
$W_A$	Adhäsionsarbeit
$W_K$	Kohäsionsarbeit
$R_a$	Arithmetischer Mittenrauwert
$R_q$	Quadratischer Mittenrauwert
MoN	Molybdänitrid
CrN	Chromnitrid
CrC/a-C:H	Chromcarbid/DLC
EtCa	Ethylencarbonat
BrNa	Bromonaphthalin
PA6	Polyamid 6
PC	Polycarbonat
M268 VMR	Böhler M268 VMR, Kunststoffformenstahl
M303	Böhler M303 Extra, Kunststoffformenstahl
M333 IP	Böhler M333 Isoplast, Kunststoffformenstahl