

Montanuniversität Leoben

**Reibungsreduktion zwischen Polymer- und
Werkzeugoberfläche:
Einfluss der Rauigkeit auf die Oberflächenenergie
und Grenzflächenspannung**



Diplomarbeit von:

Mario Lugger

Unter Betreuung von:

Ao. Univ. Prof. Dr. Christian Teichert

Dipl.-Ing. Dr. mont. Gerald. R. Berger

begutachtet von:

Ao. Univ. Prof. Dr. Christian Teichert

Die vorliegende Arbeit wurde am Institut für Physik der Montanuniversität Leoben in Kooperation mit dem Polymer-Competence-Center-Leoben durchgeführt.

Leoben, März 2012

Für meine Familie und meine Freundin

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

Eidesstattliche Erklärung:

Ich erkläre an Eides Statt, dass die vorliegende Arbeit von mir selbständig 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

Unterschrift

Danksagung

Mein Dank gilt meinen Betreuern **Prof. Dr. Christian Teichert** und **Dipl.-Ing. Dr. Gerald R. Berger** für die Möglichkeit diese Arbeit zu schreiben und für ihr Vertrauen in meine Person, für die kritische Durchsicht und Korrektur dieser Diplomarbeit und der konstruktiven Diskussionen und Anregungen.

Auch meinen vielen Kollegen vom Institut für Physik, **Dipl.-Int. Dr. Markus Kratzer**, **Dipl.-Ing. Christian Ganser**, **Dipl.-Ing. Stefan Lorbek** und **Dipl.-Ing. Quan Shen**, möchte ich danken, die mir jederzeit hilfsbereit zur Seite standen.

Einen besonderen Dank möchte ich hier an **Dipl.-Ing. Dr. Franz Schmied** richten, der mir die Rasterkraftmikroskopie sowie die Kontaktwinkelmessung beibrachte. Weiters möchte ich **Dipl.-Ing. Gernot Pacher** vom Polymer Competence Center Leoben für die Unterstützung bei den weißlichtmikroskopischen Untersuchungen danken.

Besonders danken möchte ich meiner **Mutter** und meinem **verstorbenen Vater**, dass sie mir mein Studium ermöglichten und immer an mich glaubten. Mein Dank gilt auch meiner Freundin **Moni** für ihre große Unterstützung und ihr Vertrauen in mich.

Abstract

For injection molding in modern plastics industry tool life, cycle time and quality of the produced part-surfaces are of great importance for economic profitability. Friction plays a decisive role in this draft process.

In this diploma thesis, the systematic investigation of surface energy as a function on surface roughness was done for various materials. Steels of different composition, coatings and plastic specimen manufactured under different process conditions were studied. A contact angle measuring instrument was used to determine the surface energy, whereas the surface roughness was measured with by atomic force microscopy and with a confocal white light microscope. Both, the strong dependence of the surface energy on the surface roughness and the clear influence of the production process on each examined sample could be revealed. Typically, the surface energy diminishes with decreasing roughness.

In the injection molding of thermoplastic materials, first the hot polymer melt is injected under pressure in a colder cavity formed of steel. The melt is then cooled down to a solid part which finally is separated under friction from the steel surface, as the part is ejected. The so-called interfacial tension is a main value which could describe the separation behavior of a solid from another solid. The aim of this work was to determine whether the interfacial tension can be used as a prediction parameter for the real demolding behavior. To calculate this, the interfacial tension of various combinations of plastics, coatings and steels was calculated from the measured surface energy and compared to results from previous process-related friction tests. A good correlation could be identified between calculated trends (high interfacial tension) and measured values (low friction). On closer examination for the systems polycarbonate – steels and polycarbonate – coatings, the calculated values for coatings were generally higher ($\gamma_{\text{CrN}} = 4.23 \text{ mN/m}$) than those for steels ($\gamma_{\text{steel}} = 1.23 \text{ mN/m}$). This agrees with know-how acquired in practice, since in industry coatings are generally used for friction reduction instead of steel.

Kurzfassung

Bei Spritzgießprozessen in der Kunststoffindustrie sind Standzeit, Taktrate und die Genauigkeit der abgebildeten Oberflächenstruktur von großer Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit. Hierbei spielt die Reibung beim Entformungsprozess eine entscheidende Rolle.

In dieser Arbeit ist zunächst die Abhängigkeit der Oberflächenenergie von der Oberflächenrauigkeit bei unterschiedlichen Werkstoffen systematisch untersucht worden. Es wurden Formenstähle unterschiedlicher Zusammensetzung, Beschichtungen und bei unterschiedlichen Prozessbedingungen hergestellte Kunststoffproben verwendet. Zur Bestimmung der Oberflächenenergie diente ein Kontaktwinkelmessgerät bei Raumtemperatur, die Oberflächenrauigkeit wurde mit einem Rasterkraftmikroskop im tapping-mode und einem konfokalen Weißlichtmikroskop gemessen. Es konnte die teils starke Abhängigkeit der Oberflächenenergie von der Oberflächenrauigkeit gezeigt werden, wobei die Oberflächenenergie mit sinkender Rauigkeit meist abnimmt. Ferner ergab sich auch eine deutliche Abhängigkeit der Oberflächenenergie von den Herstellprozessen der einzelnen Proben.

Beim Spritzgießen von thermoplastischen Kunststoffen wird zuerst heiße Polymerschmelze unter Druck in einen kälteren, aus Stahl gebildeten Formhohlraum (Kavität) gespritzt. Anschließend wird die Schmelze zu einem festen Bauteil abgekühlt, das dann beim Entformungsvorgang unter Reibung von der Stahloberfläche getrennt wird. Die sogenannte Grenzflächenspannung ist ein Wert, der das Trennungverhalten eines Festkörpers von einem anderen Festkörper beschreiben könnte. Hauptziel dieser Arbeit war es zu ermitteln, ob die Grenzflächenspannung als Vorhersagekenngröße für das reale Entformungsverhalten dienen kann. Um dies zu überprüfen, wurden die Grenzflächenspannungen verschiedener Kombinationen aus Kunststoff, Beschichtung und Formenstahl aus den gemessenen Oberflächenenergien berechnet und mit Erkenntnissen aus früheren prozessnahen Entformungskraftmessversuchen verglichen. Es konnte eine gute Übereinstimmung von errechneten Trends (hohe Grenzflächenspannung) und gemessenen Werten (niedrige Reibung) festgestellt werden. Bei Betrachtung der Systeme Polycarbonat – Stähle und Polycarbonat – Beschichtungen lagen die errechneten Werte der Grenzflächenspannung für die Beschichtungen ($\gamma_{\text{CrN}} = 4,23 \text{ mN/m}$) generell über jenen der Stähle ($\gamma_{\text{Stahl}} = 1,23 \text{ mN/m}$). Dies steht in gutem Einklang mit der Praxis, da hier für den Kunststoff PC Beschichtungen zur Reduzierung der Entformungskräfte eingesetzt werden.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis und verwendete Symbole	III
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Topographiemessung	3
2.1.1 Rasterkraftmikroskopie (AFM)	3
2.1.2 Reibungskraftmikroskopie (FFM)	6
2.1.3 Konfokale Weißlichtmikroskopie (WLM)	6
2.2 Bestimmung der Oberflächenenergie	8
2.2.1 Kontaktwinkelmessung	8
2.3 Oberflächenkenngrößen	10
2.3.1 Adhäsionsarbeit W_a	10
2.3.2 Grenzflächenspannung γ_{sl}	10
2.3.3 Kennwerte zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit	11
3 Experimentelles	14
3.1 Probenreinigung	14
3.2 Verwendete Geräte	14
3.2.1 Rasterkraftmikroskop	14
3.2.2 Konfokal Mikroskop	15
3.2.3 Kontaktwinkelmessgerät	16
3.3 Verwendete Materialien und Messdurchführung	17
3.3.1 Stähle	17
3.3.2 Beschichtungen	18
3.3.3 Polymere	19
4 Ergebnisse und Diskussion	22
4.1 Bestimmung der Oberflächenenergien	22
4.2 Polymere	23
4.2.1 Polypropylen:	25
4.2.2 Acrylnitril-Butadien-Styrol	26
4.2.3 Acrylnitril-Butadien-Styrol / Polycarbonat	27
4.3 Stähle	29
4.3.1 M333	29
4.3.2 M303	32
4.3.3 M390PM	35

4.3.4 M268.....	38
4.4 Beschichtungen.....	40
4.4.1 AFM-Untersuchungen.....	41
4.4.2 Oberflächenenergie und Grenzflächenspannung.....	46
5 Zusammenfassung und Ausblick	53
6 Literatur	V
7 Anhang.....	VII
7.1 Stähle	VII
7.1.1 Oberflächenenergien.....	VII
7.1.2 Oberflächenrauigkeiten	VIII
7.1.3 Grenzflächenspannungen.....	X
7.2 Beschichtungen.....	XII
7.2.1 Oberflächenenergien.....	XII
7.2.2 Oberflächenrauigkeiten	XII
7.2.3 Grenzflächenspannungen.....	XIII
7.3 Polymere.....	XIV
7.3.1 Oberflächenenergien.....	XIV

Abkürzungsverzeichnis und verwendete Symbole

AFM	Atomic Force Microscopy, Rasterkraftmikroskopie
FFM	Friction Force Microscopy, Reibungskraftmikroskopie
XPS	X-Ray Photoelectron Spectroscopy, Röntgen-Photoelektronenspektroskopie
CCD	Charged Coupled Device
PP	Polypropylen
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
ABS/PC	Acrylnitril-Butadien-Styrol / Polycarbonat – Blend
PC	Polycarbonat
M333	korrosionsbeständiger Formenstahl
M303	martensitischer korrosionsbeständiger Formenstahl
M390PM	hochkorrosionsbeständiger Formenstahl
M268	Formenstahl
σ_s	Oberflächenenergie
σ_l	Oberflächenspannung
γ_{sl}	Grenzflächenspannung
W_a	Adhäsionsarbeit
σ_{rms}	quadratische Mittenrauigkeit (R_q)
ξ	laterale Korrelationslänge
α	Rauigkeitsparameter, Hurst Parameter
θ	Kontaktwinkel
μ_0	Reibkoeffizient
α_{12}, β_{12}	Winkel
HRC	Härte nach Rockwell

1 Einleitung und Zielsetzung

In der heutigen Kunststoffindustrie wird die Wirtschaftlichkeit eines Produktionsprozesses immer wichtiger. Um mit einem modernen Spritzgießprozess am Weltmarkt bestehen zu können, sind beispielsweise die Standzeit und die Taktrate von großer Bedeutung.

Als Spritzgießen, oft auch Spritzguss, wird ein Umformverfahren bezeichnet, bei dem ein Werkstoff (hier Kunststoff) mittels eines Schneckenzyinders plastifiziert und in ein Spritzgießwerkzeug eingespritzt wird. Der jeweilige Hohlraum des Werkzeugs, auch als Kavität bezeichnet, bestimmt die Form, die Oberflächenstruktur und die Oberflächengüte des fertigen Teiles. Hiermit lassen sich sehr große Stückzahlen von direkt verwendbaren Bauteilen wirtschaftlich herstellen. Um nun größere Stückzahlen in kürzerer Zeit zu fabrizieren, wird versucht die erforderlichen Entformungskräfte zu reduzieren. Diese Entformungskräfte beruhen auf Reibung und Adhäsion zwischen dem Polymer und der jeweiligen Werkzeugoberfläche und können durch Modifikation der physikalischen und chemischen Eigenschaften der Werkstoffoberfläche verändert werden. Jedoch kann mit verringerten Entformungskräften nicht nur die Taktzeit verkürzt werden, auch die Oberflächengüte des fertigen Spritzgussteiles kann dadurch erheblich verbessert werden. Man denke hier an die Mikroabformung, wo zum einen die Dimension der abzuformenden Strukturen, zum anderen die hohe Anforderung an die Maßhaltigkeit der abgeformten Bauteile im Mikrometer- und sub-Mikrometerbereich entscheidend ist.

Vorherige Untersuchungen haben gezeigt, dass die bei einem Spritzgießprozess erforderlichen Entformungskräfte entscheidend von der Materialpaarung Polymer – Werkzeugoberfläche/Werkzeugwerkstoff abhängen. Für eine TiN-Beschichtung waren die Entformungskräfte für den Kunststoff Polypropylen höher als für eine CrN-Beschichtung, beim Kunststoff Polycarbonat war es jedoch umgekehrt [1].

Im Rahmen des PCCL-Projektes IV-4.04 „Reduction of friction between polymer and metal surfaces“ werden gängige Polymere, Stähle und Beschichtungen auf ihre Oberflächeneigenschaften hin untersucht. Dazu dienen zum einen Rasterkraftmikroskopie (AFM), um Rauigkeiten auf kleinster Skala zu analysieren, sowie konfokale Weißlichtmikroskopie. Da letztere bereits bei vorhergehenden Untersuchungen in Verwendung war, konnte somit ein Vergleich der beiden Methoden gemacht und die älteren Daten mit den neu gemessenen Daten analysiert werden. Der Vorteil der Rasterkraftmikroskopie liegt bei der sehr guten lateralen Auflösung im sub-Nanometerbereich. Mit der konfokalen Weißlichtmikroskopie können hingegen schnell sehr große Flächen bei einer geringeren lateralen Auflösung untersucht werden. Weiters wurden die Oberflächen mit einem Kontaktwinkelmessgerät untersucht, um auf ihre

Oberflächenenergie zu schließen. Diese ist von besonderer Bedeutung wenn es um Grenzflächenbildung zwischen zwei in Kontakt geratende Materialien geht. Zusätzlich stand ein Photoelektronen Spektrometer (XPS) zur Untersuchung des Oberflächenchemismus zur Verfügung. Aus den gewonnen Daten sollen Werkstoffparameter gefunden werden, die eine Vorhersage des Adhäsions- und Reibungsverhaltens ermöglichen.

2 Grundlagen

Zur genauen Analyse der Oberfläche ist es nötig, sowohl genaue Kenntnis über die Rauigkeit als auch die Oberflächenenergie und die chemische Beschaffenheit zu besitzen. Im folgenden Kapitel soll auf die dafür nötigen Grundkenntnisse in Messtechnik und der dafür nötigen Auswertung eingegangen werden.

2.1 Topographiemessung

Die Topographie ist die geometrische Struktur einer Oberfläche, die durch eine Vielzahl von Oberflächenpunkten und deren Längen-, Breiten- und Höhenkoordinaten beschrieben werden kann.

Zur Messung der Topographie kann ein breites Spektrum verschiedener Messsysteme verwendet werden, welche sich in Genauigkeit, lateraler und vertikaler Auflösung sowie Messbereich, erforderliche Messzeit und Flexibilität unterscheiden [2]. Tabelle 2.1 zeigt eine Gegenüberstellung grundlegender Daten moderner derartiger Messverfahren.

Tab. 2.1: Gegenüberstellung moderner Oberflächenmessgeräte [3, 4].

	Rasterkraft- mikroskop	Rastertunnel- mikroskop	Rasterelektronen- mikroskop	Optisches Mikroskop
laterale Auflösung	ca. 0,4 nm	ca. 0,1 nm	ca. 5 nm	ca. 1 µm
vertikale Auflösung	0,05 nm	0,05 nm	keine direkte Höheninformation unmittelbar möglich	
Proben- vorbereitung	wenig	wenig	abhängig von Probe	wenig
Proben- einschränkung	keine	elektrisch leitende Materialien	elektrisch leitende Materialien, Vakuum	keine

2.1.1 Rasterkraftmikroskopie (AFM)

Die Rasterkraftmikroskopie (im Englischen atomic force microscopy, kurz AFM genannt) gehört zur Gruppe der Rastersondenmikroskopie (scanning probe microscopy, SPM). Anders als bei optischen Mikroskopen basiert die Darstellung der Oberfläche bei einem Rasterkraftmikroskop auf dem Abrastern der Oberfläche mittels einer an einem Biegebalken (Cantilever) angebrachten feinen Spitze. Die Probe wird mit einem piezoelektrischen Scanner durch Anlegen elektrischer Spannung in kleinen Schritten verschoben. Dabei wirkt die Veränderung der Auslenkung eines Biegebalkens mittels Lichtzeigermethode von einer

positionsempfindlichen Diode detektiert [4]. Abbildung 2.1 veranschaulicht den prinzipiellen Aufbau eines Rasterkraftmikroskops.

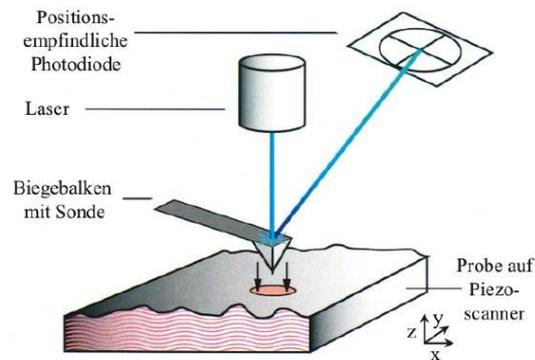


Abb. 2.1: Prinzip eines Rasterkraftmikroskops [5].

Der große Vorteil eines AFM besteht darin, dass eine vertikale und laterale Auflösung im sub-Nanometerbereich möglich ist und auch isolierende Materialien untersucht werden können. Die laterale Auflösung wird dabei von zwei Parametern besonders beeinflusst, dem Radius der Spitze und deren halbem Öffnungswinkel. Je geringer der Wert der beiden Parameter, desto kleiner ist die Abweichung zur realen Oberflächenstruktur. Dabei wird, außer im „contact-mode“, die Probenoberfläche üblicherweise nicht berührt und somit für etwaige nachfolgende Untersuchungen nicht zerstört. Weiter ist positiv, dass die Messfeldgröße unabhängig von der Anzahl der Messpunkte eingestellt werden kann. Die Nachteile des Rasterkraftmikroskops sind die relativ kleine maximale Messfeldgröße ($< 90 \mu\text{m} \times 90 \mu\text{m}$), der geringe erfassbare Höhenbereich ($< 20 \mu\text{m}$) und die teils mehr als eine Stunde dauernden Messzeiten (vor allem bei großer Messfeldgröße). Bei der Rasterkraftmikroskopie unterscheidet man prinzipiell drei Messmethoden. Den „contact mode“, den „tapping mode“ und den „non-contact mode“.

❖ „contact-mode“

Bei dieser Messmethode steht die Spitze in direktem Kontakt zur Probenoberfläche, wobei sich zwischen den Elektronenhüllen der sich berührenden Materialien eine starke elektrostatische Abstoßung ausbildet. Man unterscheidet hier noch zwischen einem unregulierten (konstante Höhen) und einem regulierten (konstante Kraft) Modus.

Der erste Modus stellt die ältere Methode dar, da nur wenig Anforderungen an die Regelungstechnik gestellt werden müssen. Hierbei rastert die Spitze ohne vertikale Regelung über die Probenoberfläche und die Höheninformation kann direkt aus der Auslenkung des Biegebalkens gewonnen werden. Verständlicherweise können mit dieser Methode nur sehr glatte und harte Proben untersucht werden.

Beim zweiten Modus wird mittels eines Regelsignals ein Piezokristall so gesteuert, dass es zu keiner Änderung der Durchbiegung des Biegebalkens kommt und damit die Kraft zwischen Spitze und Probe möglichst gleich bleibt. Da hier ein Regelsignal mitberücksichtigt werden muss, ist dieser Modus um einiges langsamer als der erste. Trotz der Regelung und der dadurch minimierten Kräfte auf die Oberfläche bleibt eine Restbelastung in Form einer Lateralkraft erhalten. Die Höheninformationen werden hier aus der an dem Piezokristall angelegten Spannung gewonnen.

❖ „tapping mode“

Der „tapping mode“ oder auch intermittierender Modus genannt, wurde entwickelt um die Nachteile des Kontakt Modus, vor allem die Beschädigung der Probenoberfläche oder der Spitze, zu minimieren. Dabei wird der Biegebalken mittels Piezokristalls nahe seiner Resonanzfrequenz in Schwingung versetzt (~100 kHz). Durch Interaktion mit der Probenoberfläche ändern sich sowohl Schwingungsamplitude als auch Phase des angeregten Systems. Beim Abrastern der Probe wird meist die Amplitude als Regelsignal herangezogen, es wird also versucht die Amplitude konstant zu halten. Die Höheninformation wird hier wieder aus der Stellung des Piezokristalls gewonnen. Zusätzliche Informationen können beim „tapping mode“ durch Messung der Phasenverschiebung gewonnen werden. Beim sogenannten „phase imaging“ wird der Unterschied zwischen der Anregungsschwingung und der Oszillation des Biegebalkens gemessen, wodurch sich Aussagen über die viskoelastischen Eigenschaften der Probe qualitativ erzielen lassen.

❖ „non-contact mode“

Beim „non-contact mode“ wird der Federbalken wiederum durch einen Piezokristall zu einer Schwingung angeregt. Der „non-contact mode“ gehört wie der „tapping mode“ und der „constant force mode“ zu der Familie der dynamischen Anregungsmodi. Das Schwingungssignal des Federbalkens wird mit einer Phasenverschiebung von 90° an den Piezokristall zurückgegeben, wodurch der Federbalken immer mit seiner Resonanzfrequenz schwingt und ein geschlossener Regelkreis entsteht. Es wird also das Prinzip der Selbsterregung ausgenutzt. Kommt es nun zu einer Interaktion zwischen Probenoberfläche und Spitze des Federbalkens, ändert sich die Resonanzfrequenz, welche ein Maß für die Kraftwechselwirkung darstellt. Es ist auch möglich, den Federbalken mit einer festen Frequenz anzuregen, wobei die Verschiebung der Resonanzfrequenz wieder eine Phasenverschiebung zwischen Anregungsschwingung und Oszillation verursacht. Dieser Messmodus wird üblicherweise im Vakuum bzw. im Hochvakuum verwendet wo er, im Vergleich zu den anderen Messmethoden die höchste Auflösung erzielt. Die Spitze liegt üblicherweise nicht mehr auf der Probe auf.

2.1.2 Reibungskraftmikroskopie (FFM)

Die Rasterkraftmikroskopie kann auch für Reibungskraft-Untersuchungen auf der Nanometerskala (Nanotribologie) eingesetzt werden. Diese Anwendung findet vor allem ihren Einsatz in der Materialforschung, beispielsweise bei der Untersuchung und Charakterisierung von Beschichtungen. Bei der Reibungskraftmikroskopie (im Englischen *friction force microscopy*, kurz FFM genannt) wird im Kontaktmodus bei konstanter Kraft gemessen. Der Biegebalken wird dabei senkrecht zu seiner Längsachse über die Oberfläche gerastert. In Abhängigkeit der Reibung zwischen Spitze und Probe verdreht sich der Federbalken unterschiedlich stark, zu sehen in Abbildung 2.2a. Diese Torsion lässt sich mit einer vier-Quadranten Photodiode ebenfalls detektieren. Trifft die Spitze beim Abrastern der Probe auf eine Stufe wird der Cantilever ebenfalls verdrillt, unter anderem verursacht durch eine unterschiedliche Kontaktfläche zwischen Spitze und Probe, siehe Abbildung 2.2b. Um dies zu verhindern, sollte die Probenoberfläche auf der Skala des Spitzenradius glatt und eben sein. Der Einfluss der Topographie kann aber eliminiert werden, indem man zwei Bilder mit entgegengesetzter Scanrichtung voneinander abzieht [6, 7].

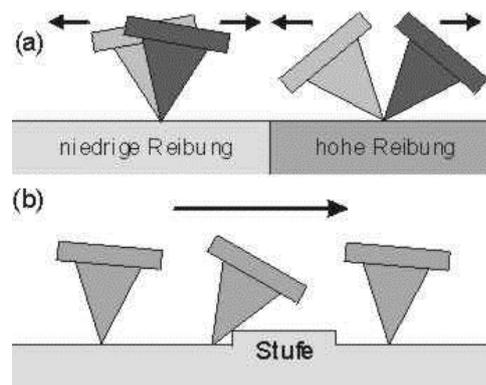


Abb. 2.2: Prinzip der Reibungskraftmikroskopie [6].

2.1.3 Konfokale Weißlichtmikroskopie (WLM)

Der große Nachteil von Lichtmikroskopen ist ihre unzureichende Schärfentiefe und somit ihre schlechte vertikale Auflösung. Tiefere oder höhere Bereiche, welche sich nicht im Brennpunkt der Objektivlinse befinden, werden unscharf abgebildet und es kommt zu einer Verwischung relevanter Bildinformationen. Konfokale Messverfahren bezwingen nun diesen Nachteil und ermöglichen Topographiemessungen mit hoher vertikaler Auflösung [8].

Bei konfokalen Messverfahren wird Licht einer geeigneten Lichtquelle (Halogenlampe oder Laser) durch eine Anordnung von Lochblenden (Pinhole) und konfokalen Linsen fokussiert und auf die Oberfläche projiziert, von ihr reflektiert und über Linsen, einen Strahlteiler und einer weiteren Lochblende zu einem Detektor (meist eine CCD-Kamera) geleitet (Abbildung 2.3).

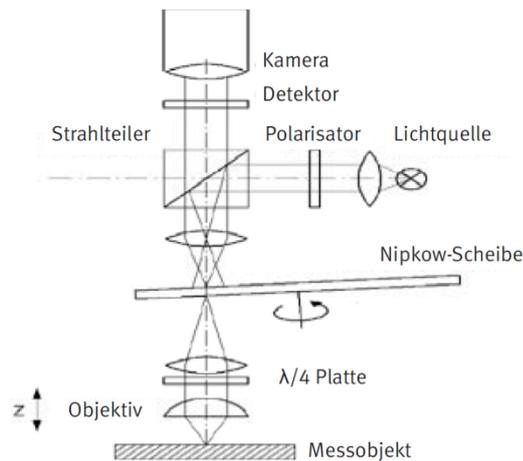


Abb. 2.3: Prinzip des Strahlengangs bei konfokalen Mikroskopen [8].

Kommt es zu einer geringen Höhenabweichung auf der Oberfläche (Abweichung vom Brennpunkt der Objektivlinse) hat dies eine deutliche Aufweitung des Lichtpunktes zur Folge. Durch die nachfolgenden Linsen (weitere Aufweitung) und die vor der CCD-Kamera befindlichen Lochblende wird die einfallende Lichtintensität stark verringert. Somit können nur Oberflächenbereiche in einem sehr geringen Schärfentiefenbereich mit hoher Intensität erfasst werden. Durch Erfassung der detektierten Lichtintensität (Maximum der Intensitätskurve) über der Höhe kann auf die Höhe des Messobjektes geschlossen werden.

Prinzipiell unterscheidet man zwischen konfokalen Mikroskopen und konfokalen Punktsensoren, bei beiden wird die oben beschriebene konfokale Linsenordnung eingesetzt. Die konfokalen Mikroskope bieten den Vorteil, dass sie einen bestimmten festliegenden Bildausschnitt erfassen, wodurch sie in ihrer Anwendung schneller als die Punktsensoren sind. Sie haben allerdings den Nachteil eines kleineren lateralen Messbereichs und einer geringeren Flexibilität. Mit konfokalen Punktsensoren kann allerdings immer nur ein kleiner Bereich oder Punkt auf der Oberfläche erfasst werden, weswegen die Probe in x- und y-Richtung mittels geeigneter Apparatur verschoben werden muss, um einen ausgedehnten Oberflächenbereich zu scannen.

Bei der Verwendung eines chromatisch kodierten konfokalen Punktsensors muss der vertikale Abstand zwischen Messkopf und Objekt nicht variiert werden. Hierbei wird die wellenlängenabhängige Brechung von weißem Licht durch die Objektivlinse ausgenutzt (chromatische Aberration). Das Licht einer Halogenlampe wird durch eine Glasfaser zur Objektivlinse im optischen Messkopf geführt, aus der Glasfaser ausgekoppelt und auf die Probenoberfläche fokussiert (siehe Abbildung 2.4). Die unterschiedlichen Wellenlängen des weißen Lichts führen zu einer starken Variation der Brennweite des Objektivs. Das von der Oberfläche reflektierte oder gestreute Licht wird wiederum vom Messkopf über eine Glasfaser zu einem Spektrographen geleitet. Dort wird das über ein Beugungsgitter in seine spektralen Bereiche zerlegte Licht als Intensität über der Wellenlänge von einem CCD-Sensor

aufgenommen. Aus dem Intensitätsmaximum der zugeordneten Wellenlänge kann nun auf die Höhe des betrachteten Messpunktes geschlossen werden. Das Messprinzip ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Die laterale Auflösung ist wie bei Lichtmikroskopen durch Beugung begrenzt, was hier bei Verwendung von Weißlicht eine laterale Auflösung von ca. 200 nm bedeutet [2].

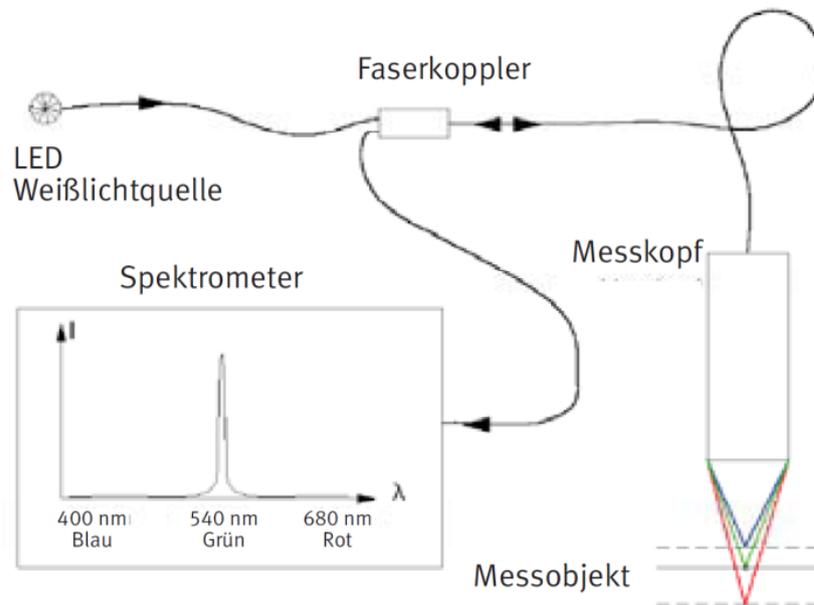


Abb. 2.4: Messverfahren mit einem chromatischen Sensor [8].

2.2 Bestimmung der Oberflächenenergie

Als Oberflächenenergie wird jene Energie bezeichnet, die notwendig ist, chemische Bindungen aufzubrechen, um so eine neue Oberfläche zu erzeugen. Definitionsgemäß ist sie jene Energie, die zum Erzeugen der Oberfläche pro Flächeneinheit aufgebracht werden muss. Dabei wird der Begriff Oberflächenenergie σ_s klassisch für Festkörper benutzt, der Begriff Oberflächenspannung σ_1 für Flüssigkeiten.

Zur Bestimmung der Oberflächenenergie wird meist die Kontaktwinkelmessung genutzt. Eine weitere Möglichkeit zu ihrer Bestimmung wäre die Tensiometrie, auf die hier nicht näher eingegangen wird [9, 10].

2.2.1 Kontaktwinkelmessung

Hierbei werden einzelne Flüssigkeitstropfen auf die zu messende Oberfläche abgelegt und der Winkel an der entstandenen Grenzfläche bestimmt (siehe Abbildung 2.5). Abhängig von der jeweiligen Oberflächenenergie σ_s , der Oberflächenspannung σ_1 und der Grenzflächenspannung γ_{s1} der in Kontakt tretenden Substanzen (im Gleichgewichtszustand müssen alle Kräfte gleich

groß sein) bildet sich nach Young (Gleichung 2.1) ein unterschiedlicher Kontaktwinkel aus [10].

$$\sigma_s = \gamma_{sl} + \sigma_l \cos \theta \quad (2.1)$$

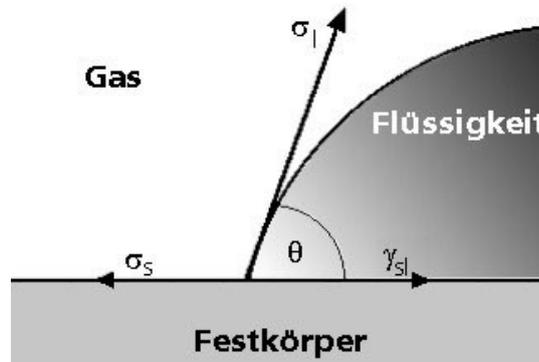


Abb. 2.5: Definition eines Kontaktwinkels θ einer Flüssigkeit auf einer Oberfläche eines Feststoffes [10].

Die am meisten verwendete Methode zur Bestimmung der Oberflächenenergie ist jene nach Owens, Wendt, Rabel und Kaelble, kurz OWRK. Dabei müssen mindestens zwei verschiedene Flüssigkeiten mit bekannter Oberflächenspannung benützt werden. Meist wird als polare Flüssigkeit deionisiertes Wasser verwendet, da sie jene Flüssigkeit mit dem höchsten polaren Anteil ist. Als zweite Testflüssigkeit verwendet man meist 1-Bromnaphthalin, sie besitzt keinen polaren Anteil. Zusätzlich kann das Ergebnis verbessert werden, indem man anstatt zwei, vier Flüssigkeiten benützt (zwei sind polar, zwei sind dispers). Nach OWRK lässt sich jede Oberflächenspannung in einen polaren und einen dispersen Bestandteil aufspalten (Gleichungen 2.2 und 2.3)

$$\sigma_s = \sigma_s^P + \sigma_s^D \quad (2.2)$$

$$\sigma_l = \sigma_l^P + \sigma_l^D \quad (2.3)$$

Legt man die Gleichung 2.4 (Gleichung der Grenzflächenspannung nach OWENS und WENDT) zu Grunde und kombiniert sie mit Gleichung 2.1 mit anschließendem Auflösen nach γ_{sl} , kann aus Gleichung 2.5 mittels linearer Regression, bei Kenntnis der Parameter für die Flüssigkeit, der polare (σ_s^P) und disperse (σ_s^D) Anteil der Oberflächenenergie des Festkörpers berechnet werden, siehe Abbildung 2.6

$$\gamma_{sl} = \sigma_s + \sigma_l - 2 \left(\sqrt{\sigma_s^D \sigma_l^D} + \sqrt{\sigma_s^P \sigma_l^P} \right) \quad (2.4)$$

$$\underbrace{\frac{(1+\cos \theta)}{2\sqrt{\sigma_l^P}}}_{y} = \underbrace{\sqrt{\sigma_s^P}}_m * \underbrace{\sqrt{\frac{\sigma_l^P}{\sigma_l^D}}}_x + \underbrace{\sqrt{\sigma_s^D}}_b \quad (2.5)$$

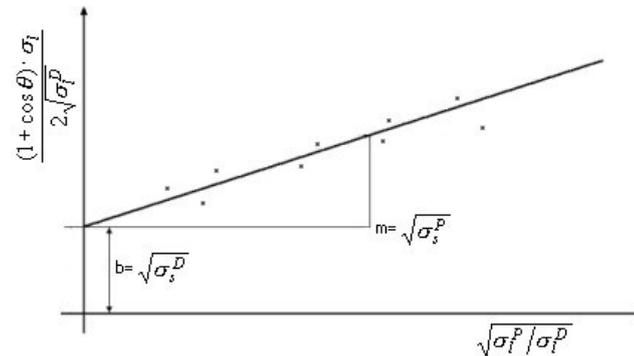


Abb. 2.6: Berechnung des polaren und dispersen Anteils der Oberflächenspannung [10].

2.3 Oberflächenkenngrößen

In diesem Kapitel werden jene Parameter beschrieben, die in der vorliegenden Arbeit Verwendung finden.

2.3.1 Adhäsionsarbeit W_a

Unter der Adhäsionsarbeit (W_a , siehe Gleichung 2.6) versteht man die reversible Oberflächenarbeit die zum Ablösen der Benetzung von einem Untergrund erforderlich ist. Sie gibt also Auskunft darüber, wie energetisch vorteilhaft die Benetzung ist. W_a wird größer mit höherer Oberflächenenergie/Reibung der beteiligten Partner und wird maximal für Oberflächen mit gleicher Polarität (polare Anteile der Oberflächenenergie sind gleich) [10].

$$W_{12} = 2 \left(\sqrt{\sigma_1^D \sigma_2^D} + \sqrt{\sigma_1^P \sigma_2^P} \right) \quad (2.6)$$

2.3.2 Grenzflächenspannung γ_{sl}

Unter der Grenzflächenspannung (γ_{sl} , siehe Gleichung 2.7) versteht man Kräfte, die zwischen zwei verschiedenen Phasen, welche miteinander in Kontakt stehen, auftreten und die somit eine gemeinsame Grenzfläche ausbilden, die unter einer Spannung steht. Sie kann als Maß für die Entformungskräfte angesehen werden, wenn man versucht diese beiden Phasen wieder zu trennen. Bei einer hohen Grenzflächenspannung sollte eine leichtere Trennung möglich sein [9].

$$\gamma_{sl} = \sigma_s + \sigma_l - 2 \left(\sqrt{\sigma_s^D \sigma_l^D} + \sqrt{\sigma_s^P \sigma_l^P} \right) \quad (2.7)$$

γ_{sl} steigt mit steigenden Oberflächenenergien an und wenn die Unterschiede in den Oberflächenenergien und Polaritäten groß sind. γ_{sl} wird minimal, wenn beide Werkstoffe die gleiche Polarität haben und wird null, wenn die beiden Werkstoffe ident sind. In Abbildung 2.7 sieht man ein berechnetes hypothetisches Modell der Grenzflächenspannung,

auf der x- und y-Achse sind die Polaritäten (Anteil der polaren Oberflächenenergie an der Gesamtenergie, siehe Gleichung 2.8) der beiden Werkstoffe (σ_1 und σ_2) aufgezeigt.

$$\text{Polarität} = \frac{\sigma^P}{\sigma_{ges}} \quad (2.8)$$

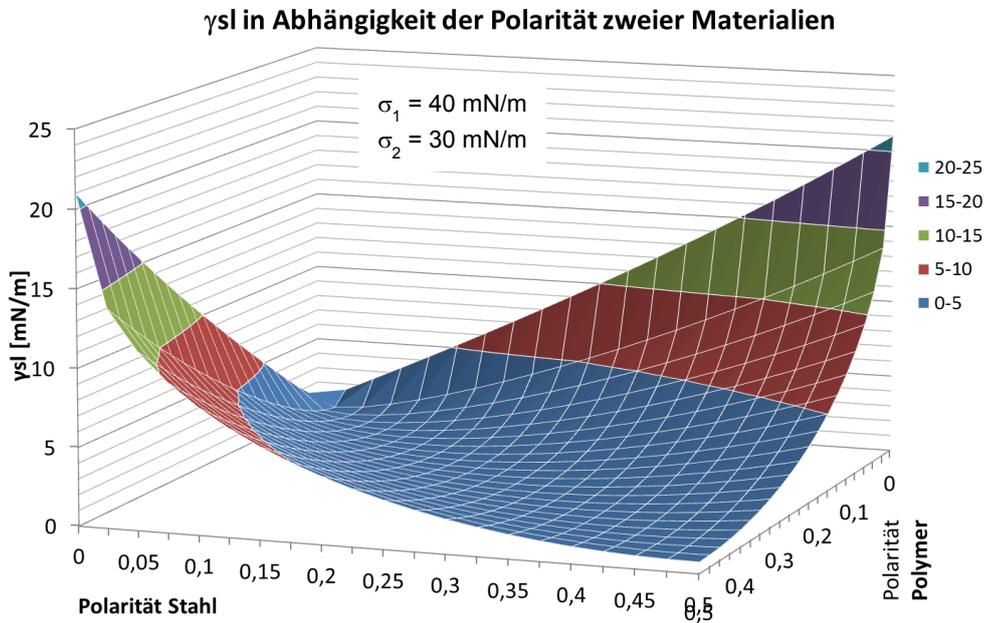


Abb. 2.7: Verlauf der Grenzflächenspannung γ_{sl} in Abhängigkeit der Polarität für zwei Werkstoffe mit theoretischen Werten.

2.3.3 Kennwerte zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit

❖ *Arithmetischer Mittenrauwert R_a*

Der arithmetische Mittenrauwert R_a gibt die mittlere Abweichung der gemessenen Oberflächenpunkte $z(x_m, y_m)$ von der Mittelebene $\langle z \rangle$ an, siehe Gleichungen 2.9 und 2.10.

Dieser Wert wird sehr oft bei der Beschreibung von technischen Oberflächen eingesetzt. Nachteilig wirkt sich aus, dass einzelne Abweichungen aufgrund der starken Mittelung nicht erfasst werden können. Wegen diesem Verhalten wird der arithmetische Mittenrauwert nur in der Qualitätssicherung bei der Auffindung von generellen Bearbeitungsfehlern eingesetzt [11].

$$R_a = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |z(x_m, y_n) - \langle z \rangle| \quad (2.9)$$

$$\langle z \rangle = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N z(x_m, y_n) \quad (2.10)$$

❖ **Quadratischer Mittenrauwert R_q (σ_{rms} – root mean square – roughness)**

Wie in Gleichung 2.11 zu sehen, beinhaltet der quadratische Mittenrauwert ähnliche Informationen wie der arithmetische Mittenrauwert. Aufgrund der Quadrierung der Höheninformation reagiert dieser Parameter sensitiver auf abweichende Höhendifferenzen als R_a und liefert durch „Wegmittelung“ einzelner Abweichungen gute reproduzierbare Ergebnisse. Da R_q die Standardabweichung der Höhenverteilung beschreibt, ist er ein sehr wichtiger Parameter, R_a und R_q weisen bei sehr glatten Oberflächen nur geringe Unterschiede auf [11].

$$\sigma_{rms} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [z(x_m, y_n) - \langle z \rangle]^2} \quad (2.11)$$

❖ **Laterale Korrelationslänge ξ**

Die laterale Korrelationslänge gibt an, über welche lateralen Abstände hinweg die Höhen einzelner Oberflächenpunkte nebeneinander korrelieren. Hierbei korrespondiert ξ mit der lateralen Abmessung der kleinsten Struktur und ist kleiner als die durchschnittliche Größe dieser Struktur. In Abbildung 2.8 sieht man zwei Strukturen mit dem selben quadratischen Mittenrauwert, jedoch mit unterschiedlicher lateraler Korrelationslänge (links kleineres ξ , rechts größeres ξ) [12].

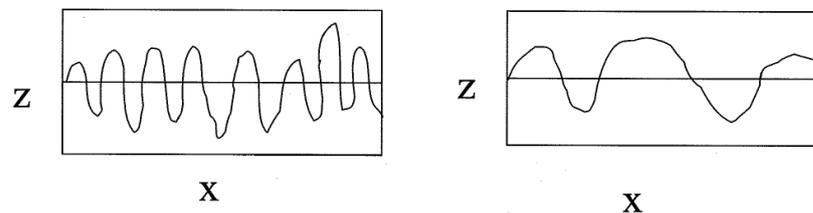


Abb. 2.8: Beispiel für unterschiedliche laterale Korrelationslängen bei gleichem quadratischem Mittenrauwert [12].

❖ **Rauigkeits-Parameter α**

Der Rauigkeits-Parameter α , auch als Hurst Parameter h bekannt, gibt an, wie zerklüftet eine Oberfläche ist, siehe Abbildung 2.9 (Einheiten wurden hier willkürlich gewählt).

Die beiden Parameter ξ und α lassen sich durch Auswertung der Höhen-Höhen-Korrelationsfunktion $C(x)$ (Glg. 2.11 und 2.12) und der Höhen-Differenzen-Funktion $H(x)$ (Glg. 2.13) bestimmen [12].

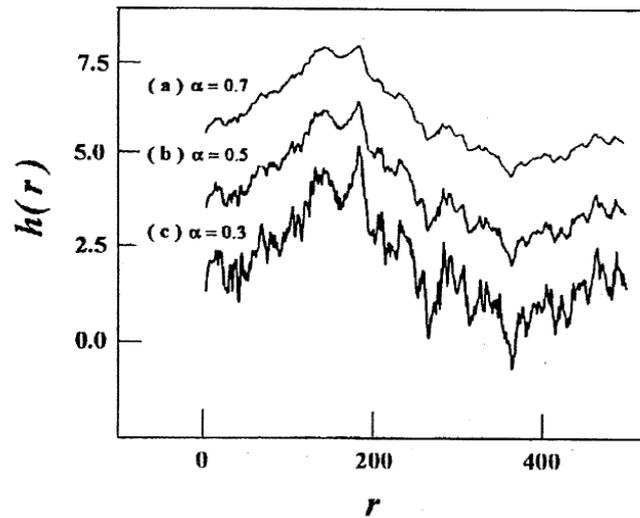


Abb. 2.9: Vergleich des Rauigkeitsparameters α bei gleichem σ_{rms} und ξ [12].

$$C(x) = \langle [z(x_0 + x) - \langle z \rangle][z(x_0) - \langle z \rangle] \rangle \quad (2.12)$$

$$C(0) = \sigma^2 \quad (2.13)$$

$$H(x) = \langle [z(x_0 + x) - z(x_0)]^2 \rangle \quad (2.14)$$

Für eine selbstähnliche Oberfläche gilt weiter:

$$C(x) = \sigma^2 \exp \left[- \left(\frac{|x|}{\xi} \right)^{2\alpha} \right] \quad (2.15)$$

$$C(\xi) = \frac{\sigma^2}{e} \quad (2.16)$$

$$H(x) \sim x^{2\alpha} \text{ für } x \ll \xi \quad (2.17)$$

$$H(x) \sim 2\sigma^2 \text{ für } x \gg \xi \quad (2.18)$$

3 Experimentelles

3.1 Probenreinigung

Die Oberfläche der polierten Stahlproben wurde in Aceton eingelegt und anschließend mit Aceton gereinigt. Anfangs kam zusätzlich ein Ultraschallbad zum Einsatz, das sich jedoch schnell als kontraproduktiv herausstellte, da somit Schmutz und Korrosionsprodukte von der Probenunterseite auf die polierte Oberfläche gelangten und sich dort festsetzten. Infolgedessen wurden die Oberflächen nur mehr mit in Aceton getauchten Wattestäbchen sanft gereinigt.

Bei den Beschichtungsproben kam bei der ersten Reinigung ebenfalls ein in Aceton getauchtes Wattestäbchen zum Einsatz. Bei nachfolgenden Untersuchungen wurden die Oberflächen nur mehr mit destilliertem Wasser abgespült, um etwaige Papierfasern oder Staub zu beseitigen.

Die Kunststoffproben wurden gänzlich nur mit destilliertem Wasser abgespült. Der Einsatz von Aceton zur Reinigung wurde wegen der Gefahr einer chemischen Reaktion für die Oberfläche nicht in Betracht gezogen.

3.2 Verwendete Geräte

Zur Charakterisierung der polierten Stahl- und Beschichtungsflächen und der Kunststoffoberflächen hinsichtlich Rauigkeit dienten ein konfokales Weißlichtmikroskop sowie ein Rasterkraftmikroskop.

Zur Charakterisierung der Oberflächenenergie wurde ein Kontaktwinkelmessgerät verwendet.

3.2.1 Rasterkraftmikroskop

Das Rasterkraftmikroskop vom Typ MFP-3D, Fa. Asylum Research, Santa Barbara/USA, mit Standort am Institut für Physik der Montanuniversität Leoben (Abbildung 3.1) wurde aufgrund möglicher Beschädigungen der zu untersuchenden Proben und für eine längere Lebensdauer der Messspitze für die Topographiemessung ausschließlich im „tapping-mode“ betrieben. Das Auflösungsvermögen ist abhängig von der Messmethode und dem Spitzenradius. Die laterale Auflösung beträgt zwischen 0,1 und 10 nm (abhängig von der Rauigkeit und des Spitzenradius) und die vertikale Auflösung 0,05 nm. Der maximale Messbereich liegt bei 90 x 90 μm , die Proben können bis zu 80 x 80 x 15 mm^3 groß sein. Das Gerät besitzt einen closed loop Scanner, d.h. es wird online die Piezoauslenkung detektiert.

Die zu vermessenden Oberflächen wurden jeweils in einer Größe 60 μm x 60 μm mit 512 Bildpunkten pro Linie aufgenommen. Zum Einsatz kamen Cantilever der Firma Olympus. Für

die Stahl- und Beschichtungsproben wurden OMCL-AC 160TS - Cantilever verwendet. Dabei handelt es sich um einen rechteckigen Silizium-Cantilever mit tetraedrischer Spitze mit einem Spitzenradius von < 10 nm, einer Federkonstante von 42 N/m und einer Aluminium-Reflexbeschichtung auf der Rückseite für eine bessere Reflexion des Lasers. Für die untersuchten Kunststoffproben wurden Cantilever des Typs OMCL-AC 240TS eingesetzt. Diese besitzen die gleichen Spezifikationen wie die des Typs 160, jedoch mit einer weit geringeren Federkonstante von nur 1,8 N/m [13].



Abb. 3.1: Rasterkraftmikroskop MFP-3D.

3.2.2 Konfokal Mikroskop

Das konfokale Weißlichtmikroskop der Fa. FRT MicroProf[®], Fries Research & Technology GmbH, Bergisch Gladbach/Deutschland, mit Standort am Polymer Competence Center Leoben (Abbildung 3.2) wurde zur Rauigkeitsanalyse herangezogen, um einen Vergleich mit dem Rasterkraftmikroskop zu ermöglichen. Es hat eine laterale Auflösung von 1 μm und eine vertikale Auflösung von 10 nm. Der maximale Messbereich kann bis 200 x 200 mm^2 betragen.



Abb. 3.2: Konfokales Weißlichtmikroskop FRT MicroProf[®] am PCCL mit chromatisch kodierendem konfokalen Punktsensor.

3.2.3 Kontaktwinkelmessgerät

Als Kontaktwinkelmessgerät kam ein DSA100 der Fa. Krüss GmbH, Hamburg/Deutschland, mit Standort am Institut für Physik der Montanuniversität Leoben zum Einsatz (Abbildung 3.3). Es ist mit einem Revolvermagazin ausgestattet, welches Messungen mit vier unterschiedlichen Flüssigkeiten erlaubt. Als Messflüssigkeiten wurden die in Tabelle 3.1 aufgeführten Flüssigkeiten eingesetzt. Dabei handelt es sich um je zwei polare und um zwei rein disperse Flüssigkeiten. Alle Messungen wurden nach Möglichkeit mit allen vier Flüssigkeiten durchgeführt, um ein besseres Messergebnis zu erhalten.

Tab. 3.1: Eigenschaften der verwendeten Flüssigkeiten [10].

	σ_{ges} [mN/m]	σ^{D} [mN/m]	σ^{P} [mN/m]	ρ [g/cm ³]	T [°C]
Wasser	72,8	21,8	51	0,988	25
Diiodomethan	50,8	50,8	0	3,325	20
Ethylenglycol	47,7	30,9	16,8	1,109	20
1-Bromnaphthalin	44,6	44,6	0	1,483	20



Abb. 3.3: Kontaktwinkelmessgerät DSA 100.

3.3 Verwendete Materialien und Messdurchführung

Hier soll kurz auf die untersuchten Materialien und deren Unterschiede beziehungsweise deren unterschiedliche Herstellprozedur eingegangen werden.

3.3.1 Stähle

Als Stähle kamen ausschließlich Produkte der Firma Böhler Edelstahl zum Einsatz. In Tabelle 3.2 sind die untersuchten Proben nach Stahlbezeichnung, chemischer Zusammensetzung, Wärmebehandlung und Oberflächenbearbeitung (Politur) aufgelistet.

Tab. 3.2: Verwendete Stähle [14 – 17].

Stahl- bezeichnung	chemische Zusammensetzung [%]								Wärmebehandlung	Poliur
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	W		
M333	0,28	0,3	0,3	13,5	-	-	-	-	hoch angelassen (45,8 HRC)	jeweils von Strichpolitur zu Hochglanz
M303	0,27	0,3	0,65	14,5	0,85	1,0	-	-	vorvergütet (30 HRC) vorvergütet (40 HRC) hoch angelassen (50,5 HRC)	Hochglanz
M390PM	1,9	-	-	20,0	-	1	4	0,6	hoch angelassen (57,8 HRC) niedrig angelassen (62,3 HRC)	jeweils von Strichpolitur zu Hochglanz
M268	0,38	0,3	1,5	2,0	1,1	0,2	-	-	vorvergütet (40 HRC)	jeweils von Strichpolitur zu Hochglanz

In Abbildung 3.4a ist exemplarisch eine Probe mit den Längenabmessungen $50 \times 50 \times 5 \text{ mm}^3$ (LxBxH) zu sehen.

a)



b)

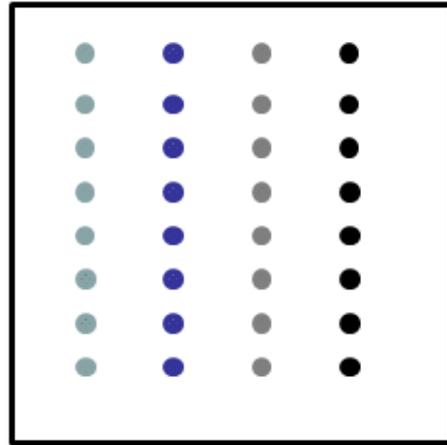


Abb. 3.4: a) Exemplarisches Bild einer Stahlprobe; b) Schematische Darstellung der Messpunkte zur Kontaktwinkelbestimmung mit 4 Flüssigkeiten, dargestellt durch die unterschiedlichen Farben.

Abbildung 3.4b zeigt die ungefähren Messpositionen der Kontaktwinkelmessung mit den verwendeten Flüssigkeiten (1-Bromnaphthalin, Ethylenglycol, Diiodomethan und Wasser). Es wurden je 6 – 8 Tropfen pro Flüssigkeit aufgebracht, der Kontaktwinkel gemessen, die einzelnen Tropfen abgetupft und an anderer Stelle die neue Tropfenserie aufgebracht. Die Messung mit Wasser wurde zwecks Korrosionsvermeidung jeweils als letzte durchgeführt.

Zur Ermittlung der Oberflächenrauigkeit (AFM oder WLM) wurden jeweils 5 sich nicht überlappende, nach Möglichkeit über die gesamte Probenoberfläche verteilte Messungen durchgeführt und anschließend der Mittelwert daraus gebildet.

3.3.2 Beschichtungen

Die Beschichtungen wurden von der Firma Oerlikon Balzers bereitgestellt. Als Grundmaterial diente dabei der Stahl M333, hochglanzpoliert. Die Probenabmessungen betragen $50 \times 10 \times 5 \text{ mm}$. In der nachfolgenden Tabelle 3.3 sind die unterschiedlichen Beschichtungen mit ihrer jeweiligen Oberflächenbeschaffenheit aufgelistet.

Tab. 3.3: Verwendete Beschichtungen [19].

Beschichtung	Aufbau	Oberflächengüte	σ_{rms} (nm)
Cr_2O_3	3 μm Cr_2O_3	as-deposited	104,8 \pm 7,1
$\text{CrO}_x\text{N}_{1-x}$ (x = 0,82)	3,5 μm CrON	as-deposited	104,8 \pm 13,0
$\text{CrO}_x\text{N}_{1-x}$ (x = 0,29)	5,5 μm CrON	as-deposited	151,8 \pm 15,1
CrN	-	Hochglanz	19,5 \pm 1,1
$\text{CrC}_x\text{N}_{1-x}$ (x = 0,37)	4,6 μm CrCN	as-deposited	154,0 \pm 16,8
$\text{CrC}_x\text{N}_{1-x}$ (x = 0,85)	5 μm CrCN	as-deposited	187,0 \pm 19,9
CrC	4,6 μm CrC	as-deposited	139,2 \pm 7,9
TiN	-	Hochglanz	29,3 \pm 0,9
Standard-DLC	-	Hochglanz	14,7 \pm 0,9
ta-DLC	-	Hochglanz	119,8 \pm 16,8
Al_2O_3	1,7 μm Al_2O_3	as-deposited	435,2 \pm 61,5
NbN	4,5 μm NbN	as-deposited	451,6 \pm 108,2

Ähnlich wie bei den Stählen wurde hier der Kontaktwinkel ebenfalls mit einer Tropfenserie von je 6 – 8 Tropfen gemessen, jedoch wurde mangels Platz die Probenoberfläche nach jeder Serie mit Aceton gereinigt und erst danach mit der neuen Flüssigkeit vermessen (siehe Abbildung 3.5a) und 3.5b). Zur Ermittlung der Oberflächenrauigkeit wurden auch hier wieder 5 sich nicht überlappende Messungen durchgeführt und der verwendete Rauigkeitswert aus diesen 5 Messungen gemittelt.

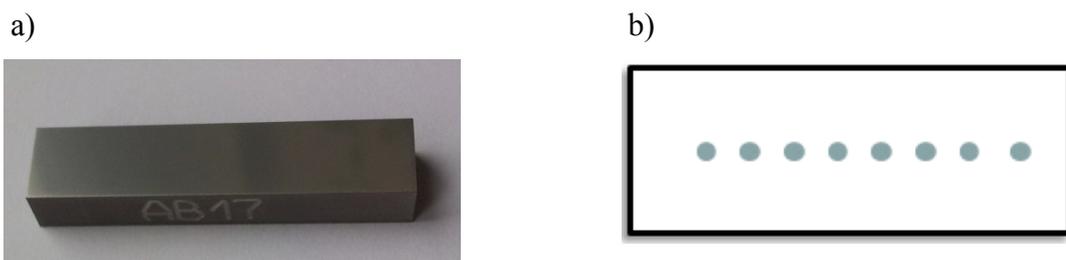


Abb. 3.5: a) Exemplarisches Bild einer Beschichtungsprobe (CrC) und b) die schematische Darstellung der Messpunkte zur Kontaktwinkelbestimmung.

3.3.3 Polymere

Als Material hierfür wurden Polymere aus einer früheren Bachelor-Arbeit (PCCL Projekt II-3.02) verwendet. In dieser wurde unter anderem der Einfluss der Bauteildicke, des Einspritzweges, der Einspritzrate und des Forminnendruckes auf die Oberflächenrauigkeit

untersucht. Die genauen Abmessungen und Messpositionen (M1 – M5) sind in Abbildung 3.6 zu sehen.

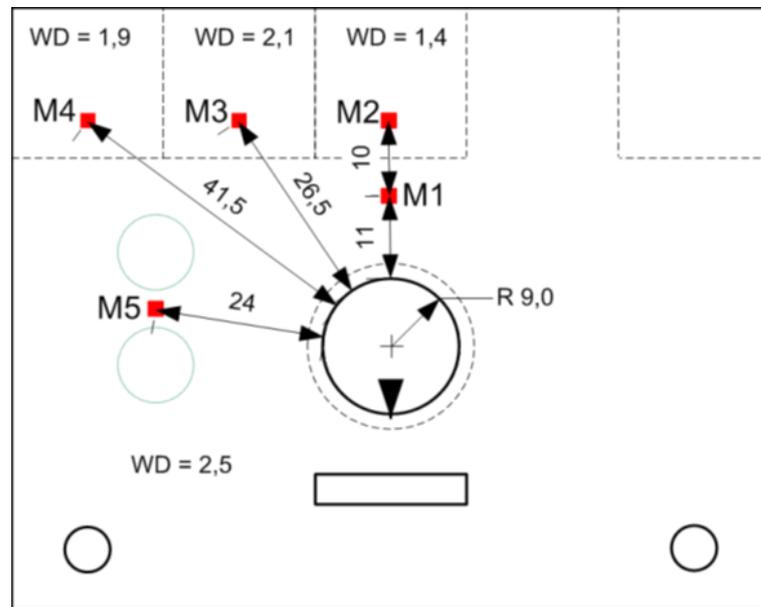


Abb. 3.6: Schematische Darstellung der einzelnen Bereiche der Kunststoffprobe für die Kontaktwinkelmessung und die Rauigkeitsmessung (WD = Wandstärke) [19].

Eine Zusammenstellung der unterschiedlichen Polymere ist in Tabelle 3.3 zu finden.

Tab. 3.3: Verwendete Prozessbedingungen für die Herstellung der Polymer-Probeträger [19].

Polymer	Code	Einspritzrate (cm ³ /s)	Forminnendruck (bar)
Polypropylen:	SCEW96	55	520
PP Hostacom PPU X9067 HS	SCEW97	5	370
Acrylnitril-Butadien-Styrol –	SCEW106	5	370
Polycarbonat: ABS/PC Pulse A35 – 110	SCEW107	55	370
Acrylnitril-Butadien-Styrol:	SCEW 122	5	370
ABS Cicolac G320	SCEW 123	55	520

Um Vergleiche mit früheren Reibversuchen anstellen zu können, wurde außerdem eine Polycarbonat-Probe aus diesen Versuchen untersucht.

Zur Kontaktwinkelmessung wurden hier lediglich zwei Flüssigkeiten verwendet, da einige Testflüssigkeiten als Lösungsmittel für die Kunststoffe agieren, d.h. es wurde bei jedem Kunststoff-Probeträger jeweils auf einem nicht benötigten Randstück getestet. Gemessen

wurde in den Bereichen (M1 – M5) jeweils 5 mm von den Rändern entfernt, um etwaigen Randeinflüssen oder Überschneidungen mit anderen Gebieten vorzubeugen.

Die einzelnen Flüssigkeiten waren für:

- PP: Wasser, Diiodomethan
- ABS/PC: Wasser, Ethylenglycol
- ABS: Wasser, Ethylenglycol
- PC: Wasser, Ethylenglycol

Als Rauigkeitsmesswerte wurden die damals ermittelten Werte übernommen, welche mittels WLM ermittelt wurden.

4 Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Rauigkeits- und Kontaktwinkelmessung im Detail vorgestellt und im Zusammenhang diskutiert. Es wird die Grenzflächenspannung der Metalle bzw. der Beschichtungen, welche sich bei einem Kontakt mit einem Polymer ausbilden würde, berechnet und in Abhängigkeit der gemessenen Rauigkeitswerte dargestellt. Zunächst wird die Bestimmung der Oberflächenenergie an den Kunststoffen exemplarisch demonstriert.

4.1 Bestimmung der Oberflächenenergien

Zuerst wurden für jeden Messbereich je 6 Tropfen einer Testflüssigkeit abgesetzt und deren Winkel bestimmt. In Abbildung 4.1 sieht man eine Messung mit Wasser und Ethylenglycol. Die blaue Gerade stellt die Basislinie des Tropfens mit dem Material dar, die rote die Fit-Funktion an die Tropfenkontur und grün ist die Steigung am Dreiphasenpunkt, von welchem aus der Kontaktwinkel gemessen wurde.

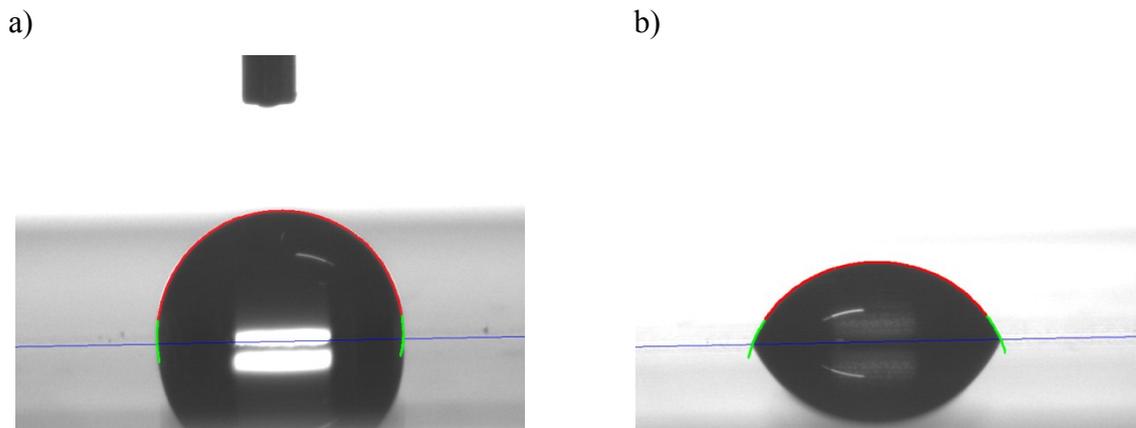


Abb. 4.1: Beispiel einer Kontaktwinkelmessung mit a) Wasser und b) Ethylenglycol auf dem Kunststoff ABS/PC.

Danach wurden die abgesetzten Tropfen abgetupft, und wenn möglich an einer neuen Stelle mit der nächsten Testflüssigkeit gemessen. Wenn dies nicht möglich war, wurde die Oberfläche zuerst mit Aceton gereinigt. Unter Zuhilfenahme von Gleichung 2.5 wurde eine lineare Regression durchgeführt (computerunterstützt). Aus dem erhaltenen Diagramm (Abbildung 4.2) lassen sich nun die gesamte, disperse und polare Oberflächenenergie des untersuchten Werkstoffes ermitteln. Die grünen Kreise symbolisieren die Oberflächenspannungen der Flüssigkeiten, hier Wasser (rechts oben) und Ethylenglycol (links unten).

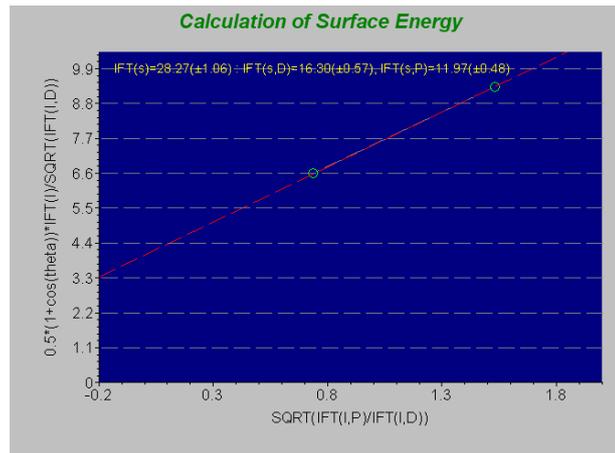


Abb. 4.2: Regressionsgerade mit Zahlenwerten für die Berechnung der Oberflächenenergie des Kunststoffes ABS/PC.

Die ermittelten und in die Berechnung für die Grenzflächenspannung eingeflossenen Oberflächenenergien der Kunststoffe sind:

❖ für PP:

$$\sigma_{2,\text{ges}} = 30,26 \pm 0,71 \text{ mN/m} \quad \sigma_2^D = 29,51 \pm 0,62 \text{ mN/m} \quad \sigma_2^P = 0,75 \pm 0,09 \text{ mN/m}$$

❖ für ABS/PC:

$$\sigma_{2,\text{ges}} = 28,27 \pm 1,06 \text{ mN/m} \quad \sigma_2^D = 16,30 \pm 0,59 \text{ mN/m} \quad \sigma_2^P = 11,97 \pm 0,48 \text{ mN/m}$$

❖ für ABS:

$$\sigma_{2,\text{ges}} = 28,96 \pm 0,59 \text{ mN/m} \quad \sigma_2^D = 13,93 \pm 0,25 \text{ mN/m} \quad \sigma_2^P = 15,04 \pm 0,34 \text{ mN/m}$$

❖ für PC:

$$\sigma_{2,\text{ges}} = 43,05 \pm 0,12 \text{ mN/m} \quad \sigma_2^D = 43,05 \pm 0,12 \text{ mN/m} \quad \sigma_2^P = 0 \pm 0 \text{ mN/m}$$

Wie in Gleichung 4.1 ersichtlich, ist die errechnete Grenzflächenspannung stark davon abhängig, welche Partner miteinander interagieren. Polare Oberflächen können nur mit polaren Oberflächen interagieren und disperse Oberflächen nur mit dispersen. Bei näherer Betrachtung der Formel erkennt man auch, dass die Standardabweichung in der Nähe der Abweichungen der einzelnen Oberflächenenergien liegen muss. Dies ist auch in der Tat so, jedoch liegt damit der Fehler für kleine Werte der Grenzflächenspannung oft nahe 100% und mehr.

$$\gamma_{12} = \sigma_1 + \sigma_2 - 2 \left(\sqrt{\sigma_1^D \sigma_2^D} + \sqrt{\sigma_1^P \sigma_2^P} \right) \quad (4.1)$$

4.2 Polymere

Bei den verwendeten Kunststoffen wurde der Einfluss unterschiedlicher Herstellbedingungen auf die Rauigkeit und deren Einfluss auf die Oberflächenenergie untersucht. Verwendet wurden die in Abbildung 4.3 zu sehenden Multi-Funktionsprobekörper. Man unterscheidet

fünf unterschiedliche Bereiche, die sich durch einen veränderten Fließweg und Wanddicke unterscheiden, die Bereiche M1 – M5. Als Rauigkeitswerte wurden jene einer früheren Messung [14] übernommen, lediglich in dem Bereich M 2 wurden AFM Untersuchungen durchgeführt, um detaillierte Informationen über die Oberflächenbeschaffenheit zu erhalten.

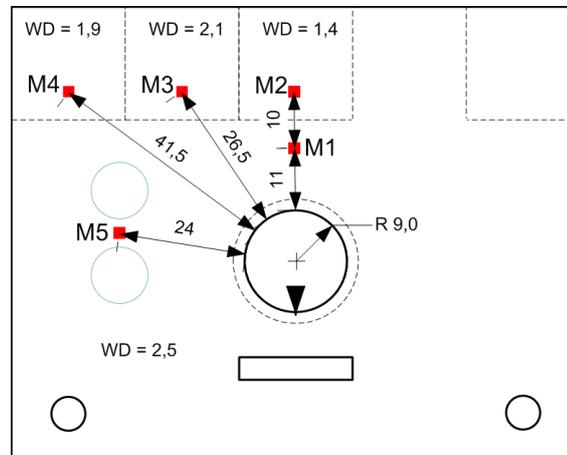


Abb. 4.3: Schematische Darstellung der einzelnen Bereiche der Kunststoffprobe für die Kontaktwinkelmessung und die Rauigkeitsmessung [15].

In Abbildung 4.4 sind die unterschiedlichen Oberflächenenergien der einzelnen Kunststoffe bei ähnlicher Rauigkeit dargestellt. Man erkennt, dass es sich bei PP und PC um Kunststoffe mit sehr geringer bzw. so gut wie keiner Polarität handelt, was auf ihre symmetrische Molekularstruktur zurückzuführen ist. Die hohe Polarität von ABS und ABS/PC ist auch durch den Aufbau von ABS zu erklären, Acrylnitril besitzt eine Nitrilgruppe im Grundbaustein und Styrol einen aromatischen Kohlenwasserstoffring wie in Abbildung 4.5 ersichtlich ist.

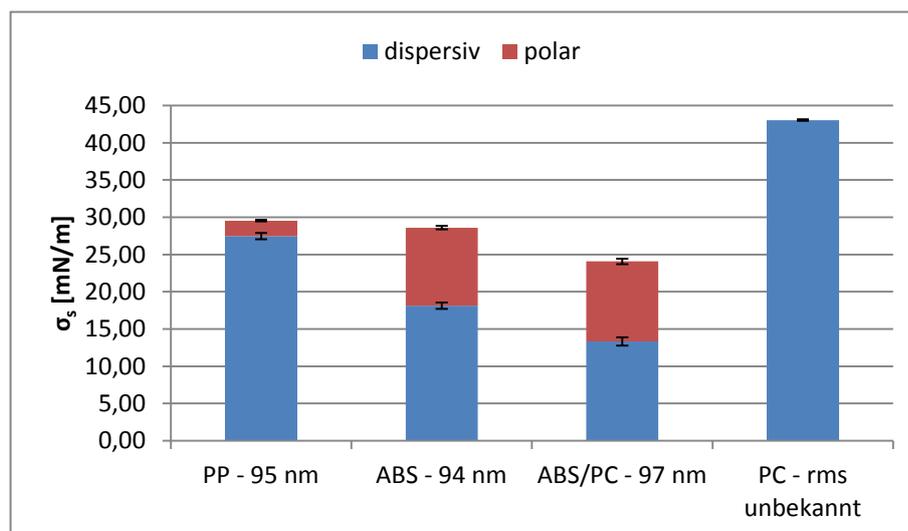


Abb. 4.4: Vergleich der gemessenen Oberflächenenergie σ_s der einzelnen Kunststofftypen bei ähnlicher Rauigkeit.

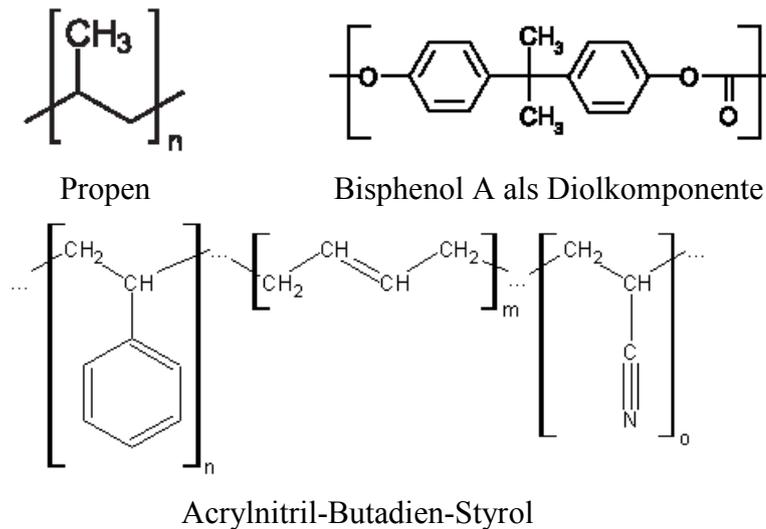


Abb. 4.5: Grundbausteine der unterschiedlichen Polymere (Propen – PP, Bisphenol A – PC, ABS) [16].

4.2.1 Polypropylen:

In Abbildung 4.6 sind mittels AFM aufgenommene Topographie- und Phasenbilder einer PP-Probe zu sehen, wobei dunkle Farben tiefen Bereichen und helle Farben hohen Bereichen entsprechen. Man erkennt noch gut die übertragene Struktur des Formenstahls. Weiters erkennt man mikroskopisch kleine Einfallstellen, die auf teilkristalline Zustände unterhalb der Oberfläche hindeuten.

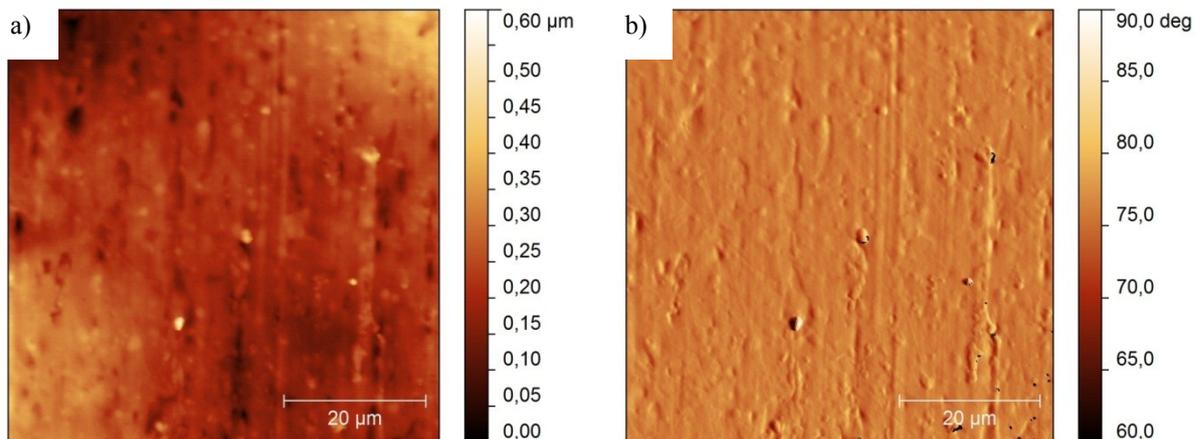


Abb. 4.6: a) AFM Topographie- und b) Phasenbild einer PP-Probe (SCEW 96).

In Abbildung 4.7 sind die Rauigkeiten für die unterschiedlichen Herstellbedingungen dargestellt. Man erkennt, dass mit sinkender Einspritzrate und sinkendem Nachdruck die Rauigkeit und dadurch auch die Oberflächenenergie steigen. Trotz großer Rauigkeitsunterschiede ist nur ein geringer Unterschied in der Oberflächenenergie zu erkennen, was an den großen relativen Abweichungen liegen könnte.

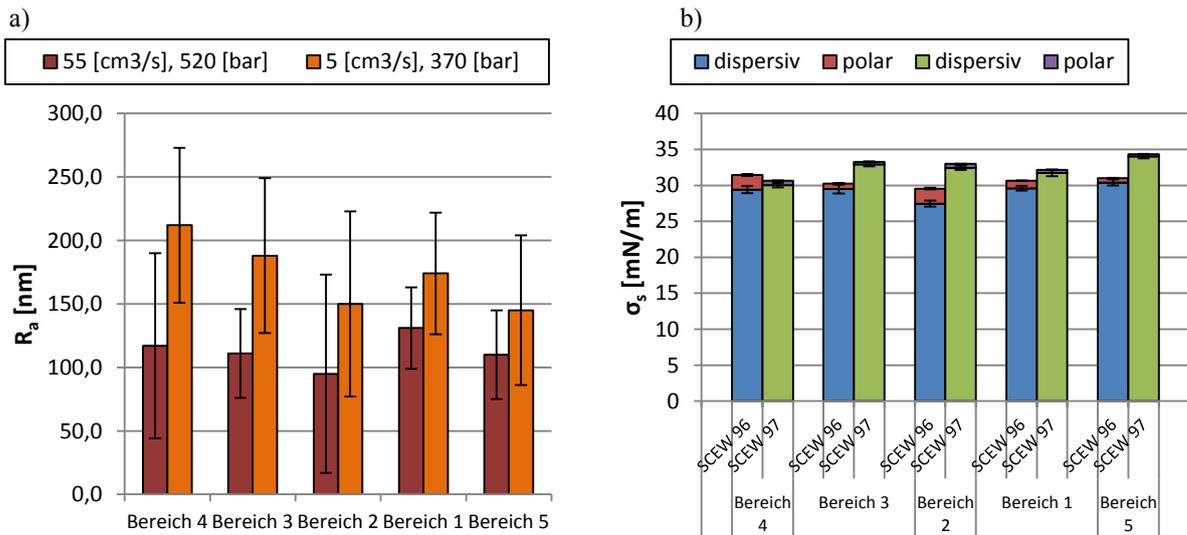


Abb. 4.7: a) Änderung der Rauigkeit R_a durch unterschiedliche Herstellrouten und b) Einfluss auf die Oberflächenenergie σ_s der PP-Proben.

4.2.2 Acrylnitril-Butadien-Styrol

Als nächstes sind die Topographie- und Phasenaufnahme (Abbildung 4.8) einer ABS-Probe zu sehen. Da es sich hierbei um einen amorphen Thermoplasten handelt, unterscheidet sich die Oberfläche zu PP doch sehr markant. Man erkennt kugelförmige Erhöhungen mit einem Durchmesser von ca. $3 \mu\text{m}$ und einer Höhe von 60 nm . Es wird vermutet, dass es sich hier um Butadien-Kügelchen (Elastomerphase) handelt, jedoch konnte auf dem Phasenbild kein Unterschied in der Härte des Materials erkannt werden [17]. Eine nachfolgende Untersuchung mittels FFM sollte dies verifizieren. Mittels FFM lassen sich die Materialien durch ihre unterschiedlichen Reibungsverhalten unterscheiden (vgl. [7]), jedoch konnte bei der untersuchten Probe kein Reibungscontrast festgestellt werden. Dies könnte daran liegen, dass die Butadien-Kügelchen unter der Oberfläche liegen.

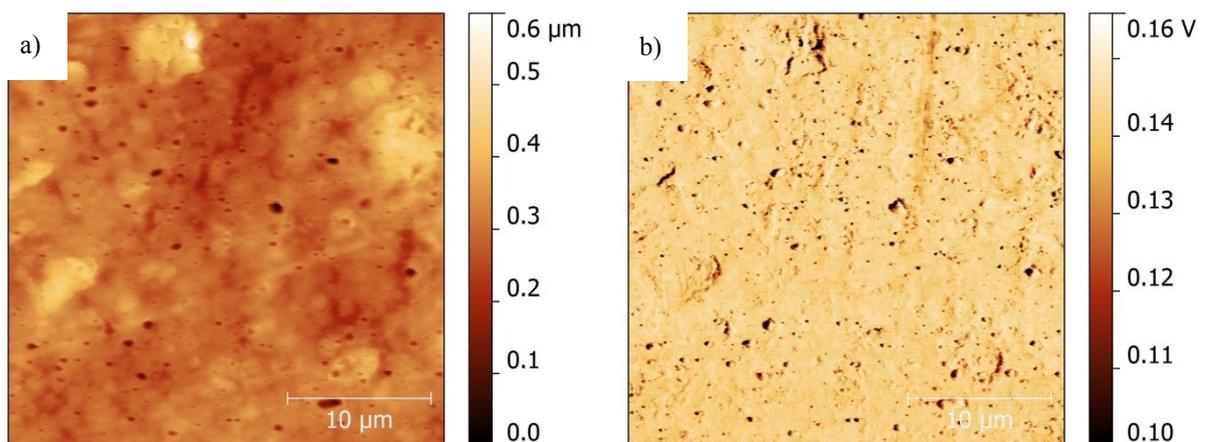


Abb. 4.8: a) AFM Topographie- und b) Reibungsbild einer ABS-Probe.

In Abbildung 4.9 ist auch für ABS wieder die unterschiedliche Rauigkeit, verursacht durch unterschiedliche Herstellbedingungen und ihr Einfluss auf die Oberflächenenergie dargestellt.

Trotz der unterschiedlichen Rauigkeit ist der Einfluss auf die Oberflächenenergie doch sehr gering, was wiederum an den großen relativen Schwankungen bei der Rauigkeit liegt.

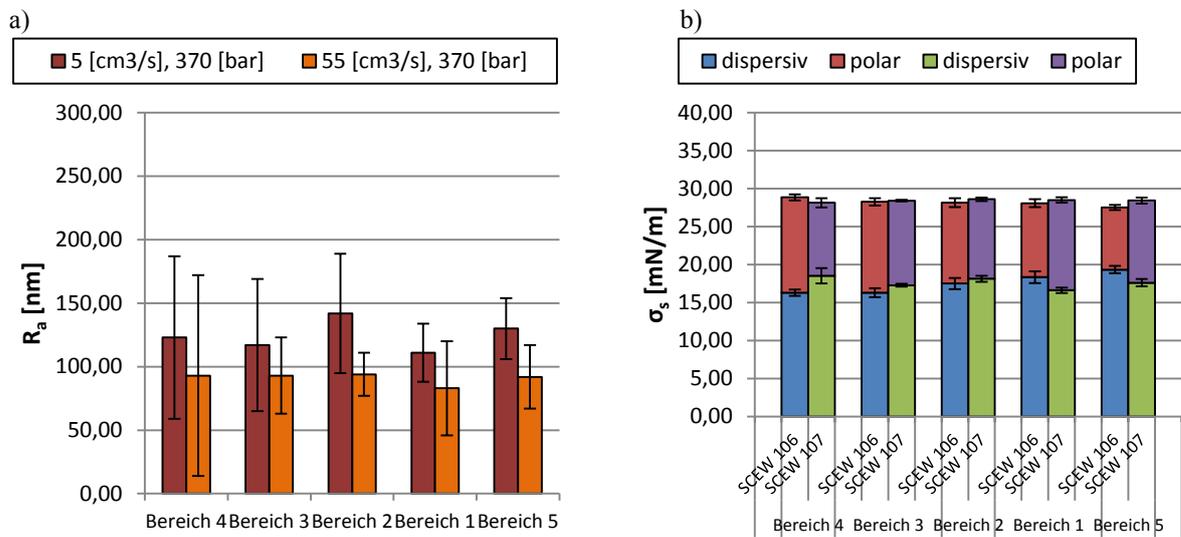


Abb. 4.9: a) Änderung der Rauigkeit R_a durch unterschiedliche Herstellrouten und b) Einfluss auf die Oberflächenenergie σ_s der ABS-Proben.

4.2.3 Acrylnitril-Butadien-Styrol / Polycarbonat

Die in Abbildung 4.10 zu sehende Topographieaufnahme zeigt wieder kleine kugelförmige Erhöhungen, welche wahrscheinlich von Butadien-Kügelchen stammen, die jedoch tiefer unter der Oberfläche liegen müssen, da sie auf dem Phasenbild nicht zu erkennen sind. Weiters ist die Oberflächenstruktur des Formenstahls noch teilweise erkennbar.

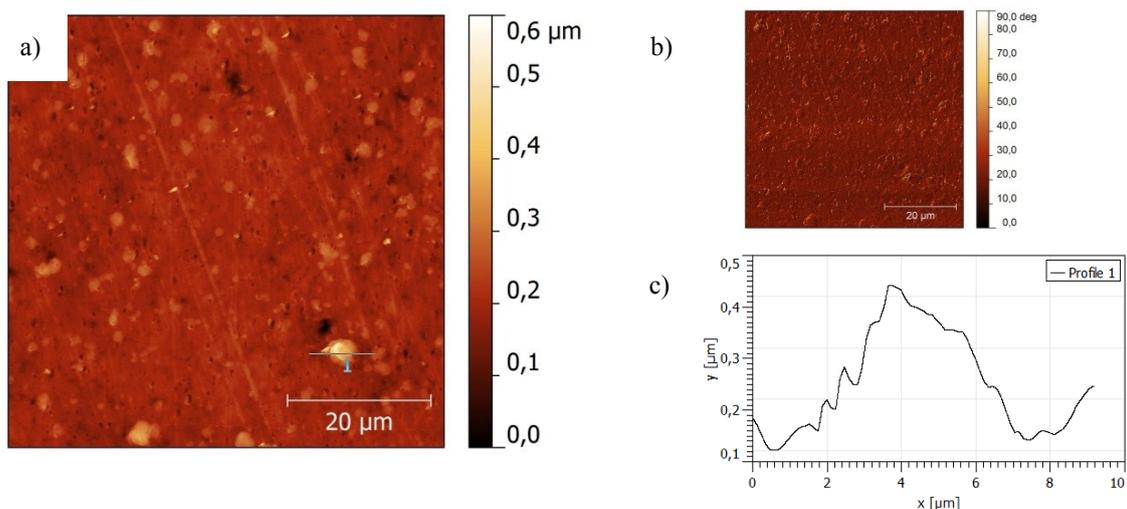


Abb. 4.10: a) AFM Topographie-, b) Phasenbild einer ABS/PC-Probe mit c) Querschnitt der in a) markierten Linie.

Bei einem Vergleich der unterschiedlichen Herstellbedingungen scheint sich nun herauszukristallisieren, dass weniger der Nachdruck als vielmehr die Einspritzgeschwindigkeit ausschlaggebend für die Rauigkeit ist, wobei eine hohe Einspritzgeschwindigkeit zu einer geringen Rauigkeit führt (Abbildung 4.11).

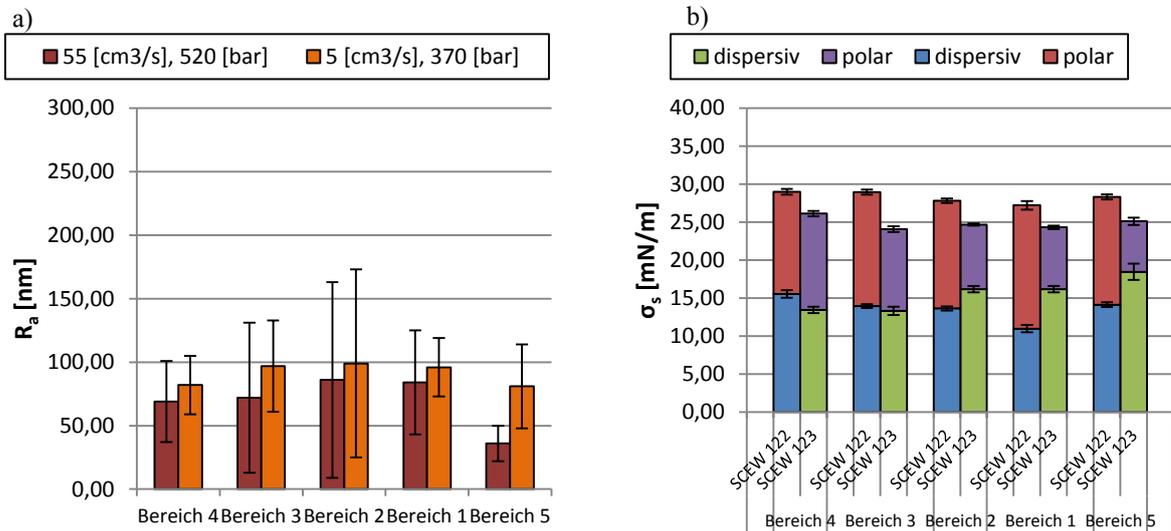


Abb. 4.11: a) Änderung der Rauigkeit R_a durch unterschiedliche Herstellrouten und b) Einfluss auf die Oberflächenenergie σ_s der ABS/PC-Proben.

4.3 Stähle

4.3.1 M333

Der Stahl mit der Bezeichnung M333 von der Firma Böhler Edelstahl zeichnet sich besonders durch seine optimierten Eigenschaften aus und findet vor allem als Kunststoffformenstahl große Anwendung. Er hat sehr gute Poliereigenschaften, was zu einem besseren und schnelleren Polierbild und dadurch zu besseren Oberflächeneigenschaften der hergestellten Produkte führt. Er zeichnet sich außerdem durch höhere Zähigkeits- und bessere Korrosionseigenschaften aus, was wiederum zu einem verringerten Verschleiß führt. Er besitzt auch eine verbesserte Wärmeleitfähigkeit. Dies führt zu kürzeren Zykluszeiten (Wärme kann schneller abtransportiert werden) und dadurch zu einer höheren Produktivität [18].

In Abbildung 4.12 ist die AFM Aufnahme einer auf Hochglanz polierten Probe mit passendem Profilbild dargestellt, wobei hier auf die unterschiedlichen Achsen-Skalen aufmerksam gemacht werden muss. Während die x-Achse von 0 – 60 μm reicht, geht die y-Achse von 0 – 0,15 μm .

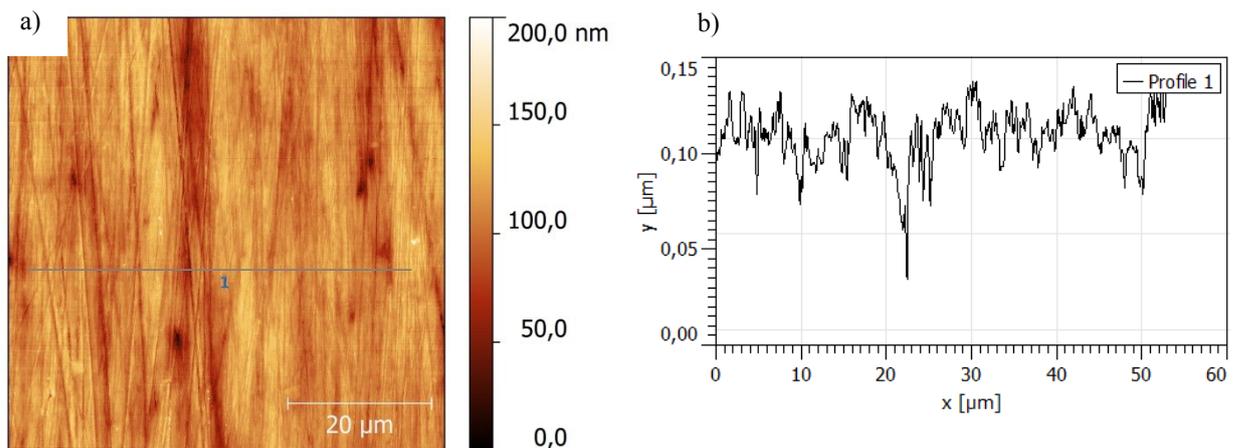


Abb. 4.12: a) AFM Aufnahme eines M333 mit Hochglanzpolitur, b) die Profilaufnahme der in a) markierten Linie; $\sigma_{\text{rms}} = 14,0 \text{ nm}$, $\xi = 1360 \text{ nm}$, $\alpha = 0,35$.

Auffällig in diesem Bild sind die Polierriefen vom letzten Polierschritt, die weißen Pünktchen stellen wahrscheinlich „verschmiertes / aufgeschobenes“ Material dar. Die errechnete laterale Kohärenzlänge, sie gibt den Abstand an, über den der z-Wert etwa gleich groß ist, passt sehr gut zu dem gemessenen Profil.

Abbildung 4.13 zeigt die Oberflächenenergie aufgetragen über die mittlere Rauigkeit R_q und die errechnete Grenzflächenspannung des Stahls M333 mit einer Polypropylen-Probe. Blau sind die dispersiven, rot die polaren Oberflächenenergieanteile, grün repräsentiert die Grenzflächenspannung. Es lässt sich ein Trend dahingehend erkennen, dass die Grenzflächenspannung bei einer bestimmten Rauigkeit ein Maximum einnimmt. Die sehr

kleinen Werte für die Grenzflächenspannung lassen sich mit der sehr geringen polaren Oberflächenenergie des PP erklären. Diese sind jedoch mit sehr großen relativen Abweichungen verbunden.

Trotz der geringen berechneten Werte und der großen relativen Abweichungen konnte bei einem früheren Reibversuch mit den gleichen Werkstoffen bei der Rauigkeit von 83 nm die geringsten Entformungskräfte festgestellt werden (Abbildung 4.14). Dies bestätigt die Vermutung, dass die Grenzflächenspannung mit den Reibungskräften korreliert.

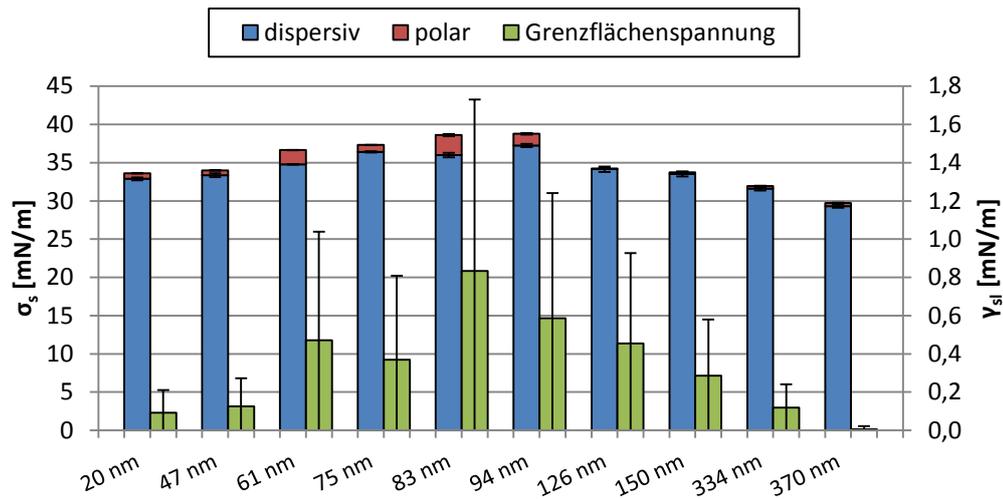


Abb. 4.13: Gemessene Oberflächenenergie σ_s und errechnete Grenzflächenspannung γ_{sl} in Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit R_a von M333 – PP.

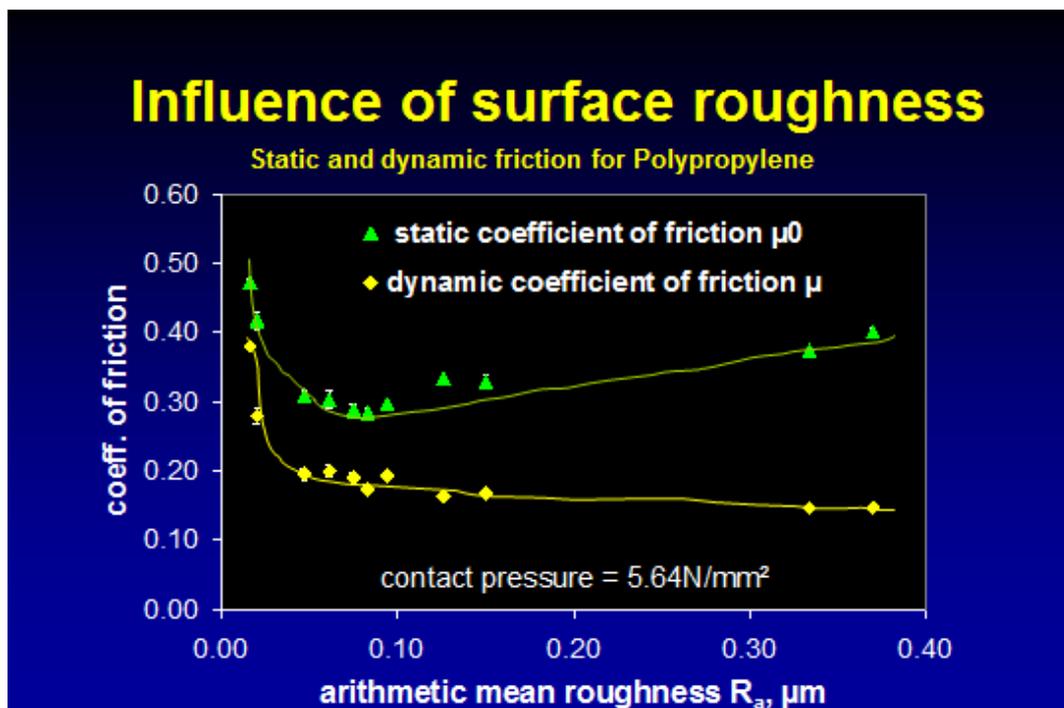


Abb. 4.14: Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Reibung [1].

Es ist auch zu erkennen, dass die Oberflächenenergie mit sinkender Rauigkeit kleiner wird, für eine bestimmte Rauigkeit aber einem Maximum zustrebt.

Generell lässt sich aber keine Aussage darüber treffen, dass mit höherer Oberflächenenergie die Grenzflächenspannung größer wird, wie in den Abbildungen 4.15 – 4.17 zu sehen ist. Für die Interpretation ist hier zu beachten, dass die Grenzflächenspannung bei den Abbildungen 4.15 und 4.16 von 0 – 18 mN/m reicht, jene bei Abbildung 4.17 von 0 – 3.6 mN/m, während die Achse bei der Abbildung 4.13 nur von 0 – 1,8 mN/m reicht.

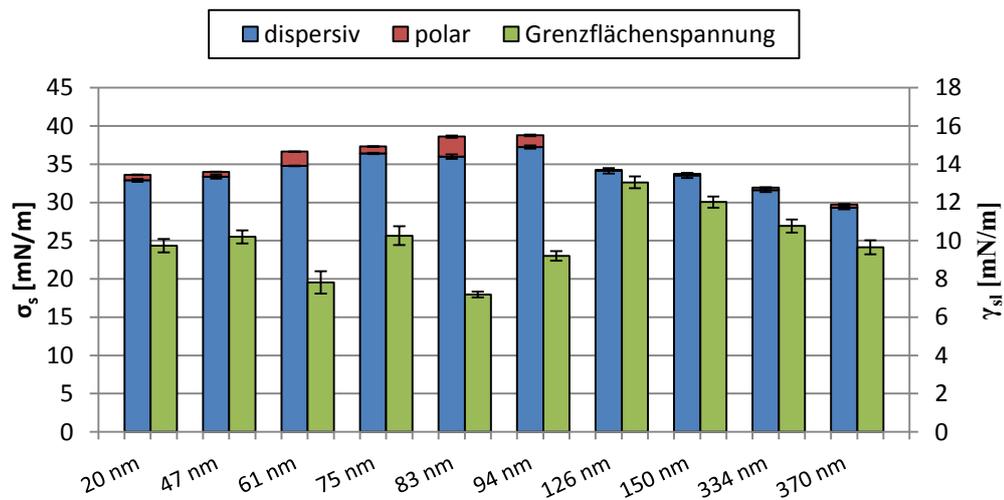


Abb. 4.15: Gemessene Oberflächenenergie σ_s und errechnete Grenzflächenspannung γ_{sl} in Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit R_a von M333 – ABS/PC.

Es muss immer die Oberflächenenergie des in Kontakt tretenden Partners berücksichtigt werden. Die Abbildungen zeigen die Oberflächenenergie und Grenzflächenspannung in Abhängigkeit der mittleren Rauigkeit R_a für die Werkstoffpaarungen M333 – ABS/PC (Abbildung 4.15), M333 – ABS (Abbildung 4.16), M333 – PC (Abbildung 4.17).

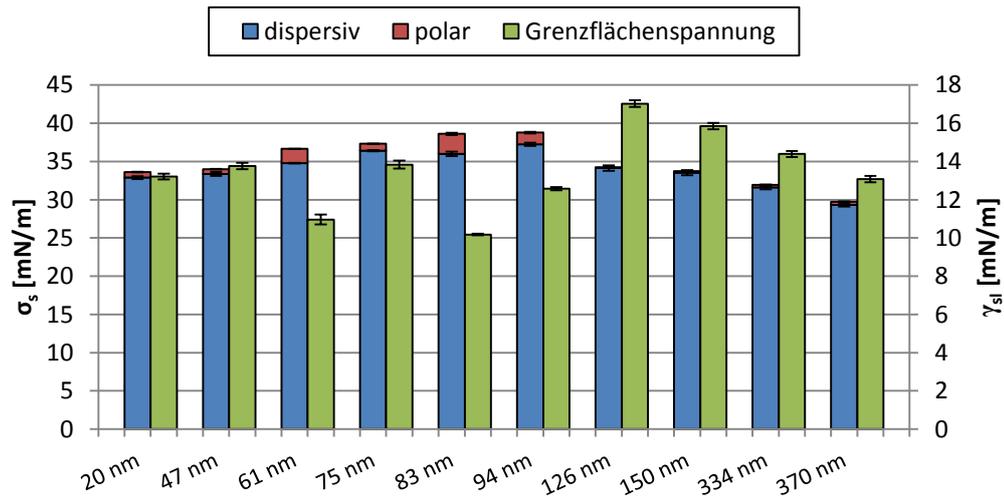


Abb. 4.16: Gemessene Oberflächenenergie σ_s und errechnete Grenzflächenspannung γ_{sl} in Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit R_a von M333 – ABS.

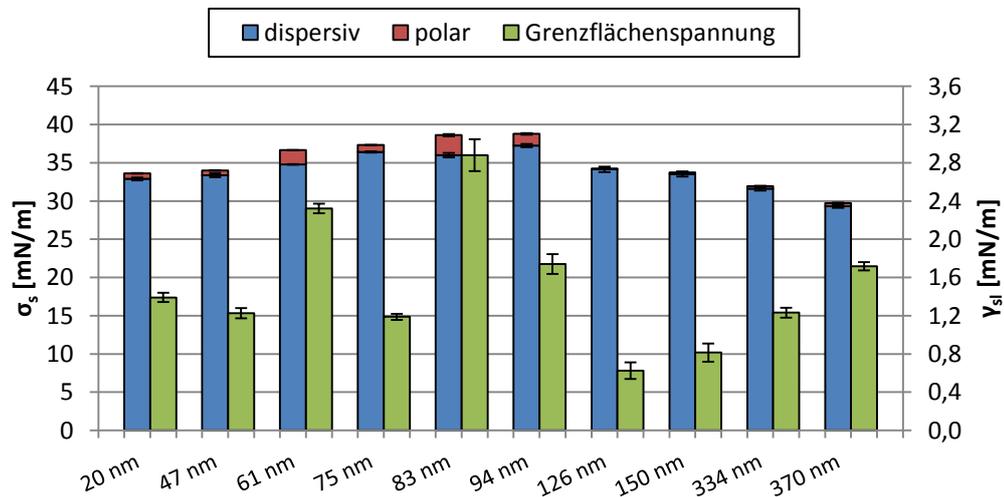


Abb. 4.17: Gemessene Oberflächenenergie σ_s und errechnete Grenzflächenspannung γ_{sl} in Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit R_a von M333 – PC.

Abschließend ist hier zu vermuten, dass der Stahl M333 generell eine geringe Polarität besitzt. Die Oberflächenenergie geht mit steigender Rauigkeit einem Maximum zu. Für die errechnete Grenzflächenspannung mit PP und PC lieferten Reibversuche eine Übereinstimmung, wenn auch die Aussagekraft bei PP, aufgrund der geringen Werte mit ihren großen relativen Schwankungen, mit Vorsicht zu behandeln ist.

4.3.2 M303

Der Stahl M303 lag in unterschiedlichen Spezifikationen vor, als EXTRA, EXTRA HIGH HARD und als ISOPLAST, sowohl vorvergütet als auch hochangelassen. Die gewählte Polierabfolge war ident.

Es handelt sich um einen korrosionsbeständigen, martensitischen Chromstahl mit sehr guter Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Zusätzlich hat er einen guten Verschleißwiderstand und eine verbesserte Zerspan- und Polierbarkeit. Seine Hauptanwendung liegt, wie beim M333, ebenfalls auf dem Gebiet des Kunststoffformenstahls zur Verarbeitung chemisch aggressiver Kunststoffe [19].

Die folgenden Abbildungen 4.18 – 4.21 zeigen jeweils die Oberfläche einer hochglanzpolierten Güte aus einer AFM Messung. Es sind auch jeweils die laterale Kohärenzlänge und der Rauigkeitsparameter angegeben, um sich ein genaueres Bild der Oberfläche machen zu können. Bei den Erhebungen, die in den Abbildungen 4.18 und 4.21 erkennbar sind, handelt es sich wahrscheinlich um „Aufschiebungen / Verschmierungen“ des Polierprozesses. Das wird daraus ersichtlich, dass nach Abgleich mit dem Phasenbild keine Unterschiede zwischen den Erhöhungen und der Grundmatrix festzustellen war. Bei der auf dem Phasenbild (Abbildung 4.18) zu erkennenden Struktur handelt es sich nur um Topographie bedingte Phasenunterschiede. Für einen echten Phasenkontrast sind die Unterschiede viel zu schwach. Trotz ähnlicher Rauigkeit zeigt der hochangelaßene M303 ISOPLAST ein gänzlich anderes Polierbild. Es ist auch zu erkennen, dass die Güte ISOPLAST keine „Verschmierungen“ zeigt und diese mit steigender Härte beim Werkstoff EXTRA weniger werden.

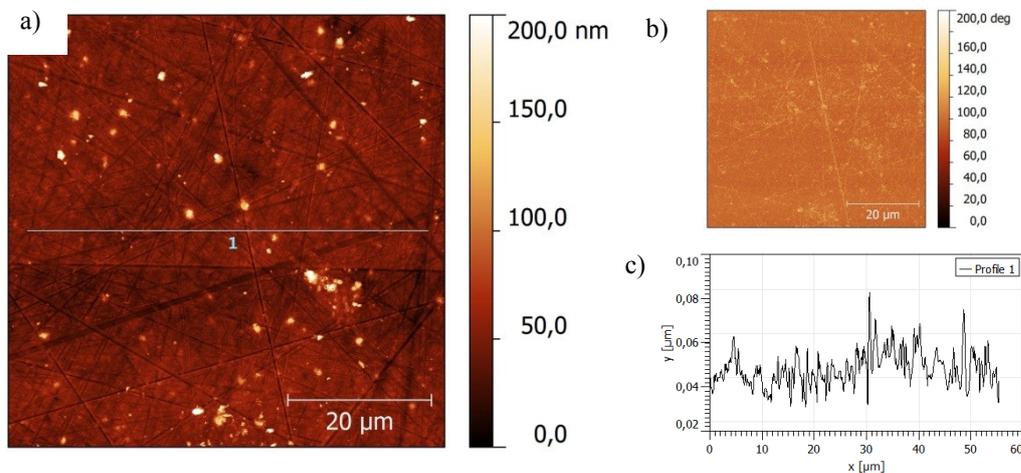


Abb. 4.18: a) AFM Aufnahme eines M303 (EXTRA) vorvergütet auf 30 HRC mit Hochglanzpolitur, mit b) dem Phasenbild und c) der Profilaufnahme der in a) markierten Linie; $\sigma_{\text{rms}} = 15,4 \text{ nm}$, $\xi = 460 \text{ nm}$, $\alpha = 0,60$.

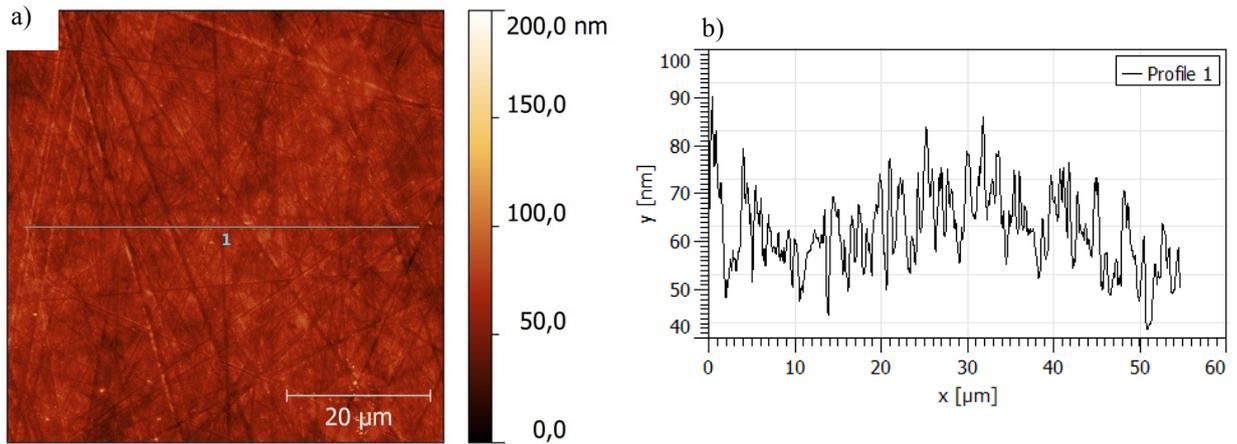


Abb. 4.19: a) AFM Aufnahme eines M303 (ISOPLAST) vorvergütet auf 30 HRC mit Hochglanzpolitur, unter b) die Profilaufnahme der in a) markierten Linie; $\sigma_{\text{rms}} = 9,1 \text{ nm}$, $\xi = 700 \text{ nm}$, $\alpha = 0,45$.

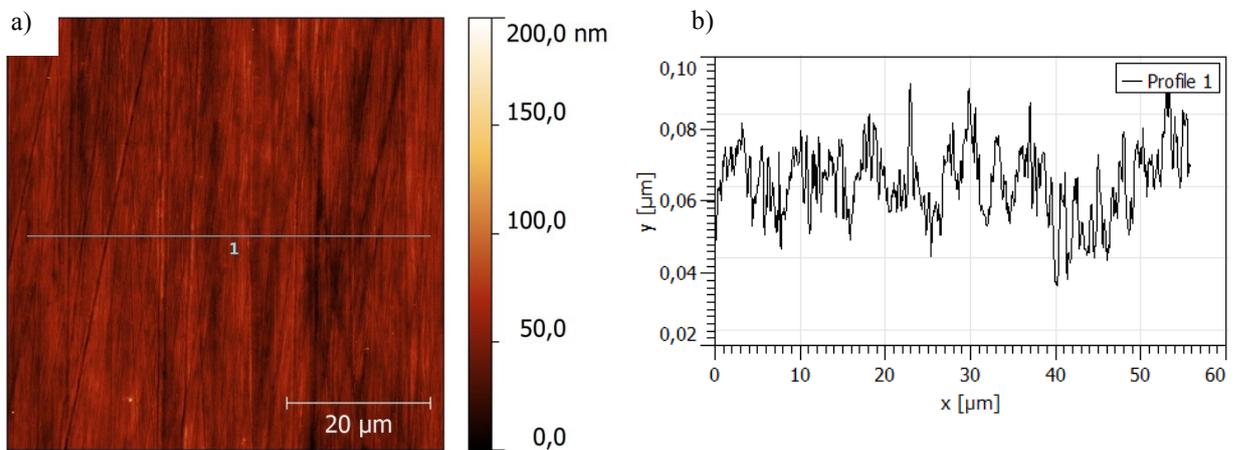


Abb. 4.20: a) AFM Aufnahme eines M303 (ISOPLAST) hochangelassen auf 50,5 HRC mit Hochglanzpolitur, unter b) die Profilaufnahme der in a) markierten Linie; $\sigma_{\text{rms}} = 10,5 \text{ nm}$, $\xi = 3960 \text{ nm}$, $\alpha = 0,45$.

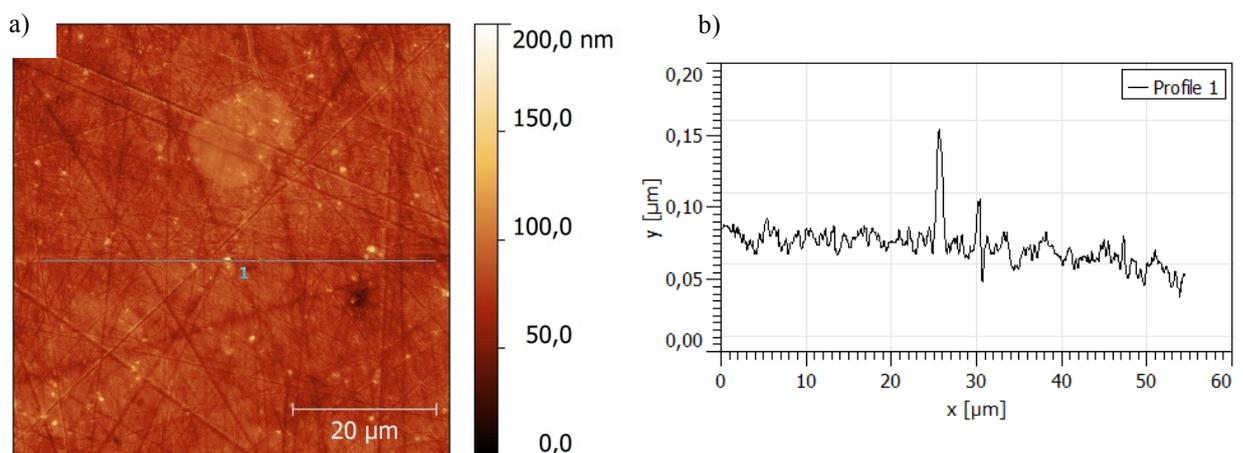


Abb. 4.21: a) AFM Aufnahme eines M303 (HIGH HARD) vorvergütet auf 40 HRC mit Hochglanzpolitur, unter b) die Profilaufnahme der in a) markierten Linie; $\sigma_{\text{rms}} = 10,0 \text{ nm}$, $\xi = 850 \text{ nm}$, $\alpha = 0,45$.

Im Folgenden sind wieder die gemessenen Oberflächenenergien der einzelnen Stahlsorten und die errechneten Grenzflächenspannungen zu den Polymeren dargestellt. Man erkennt, dass die Herstellroute hier wenig Einfluss auf die Oberflächenenergie hat. In Abbildung 4.22a ist auch wieder der große relative Fehler der Grenzflächenspannung zu sehen.

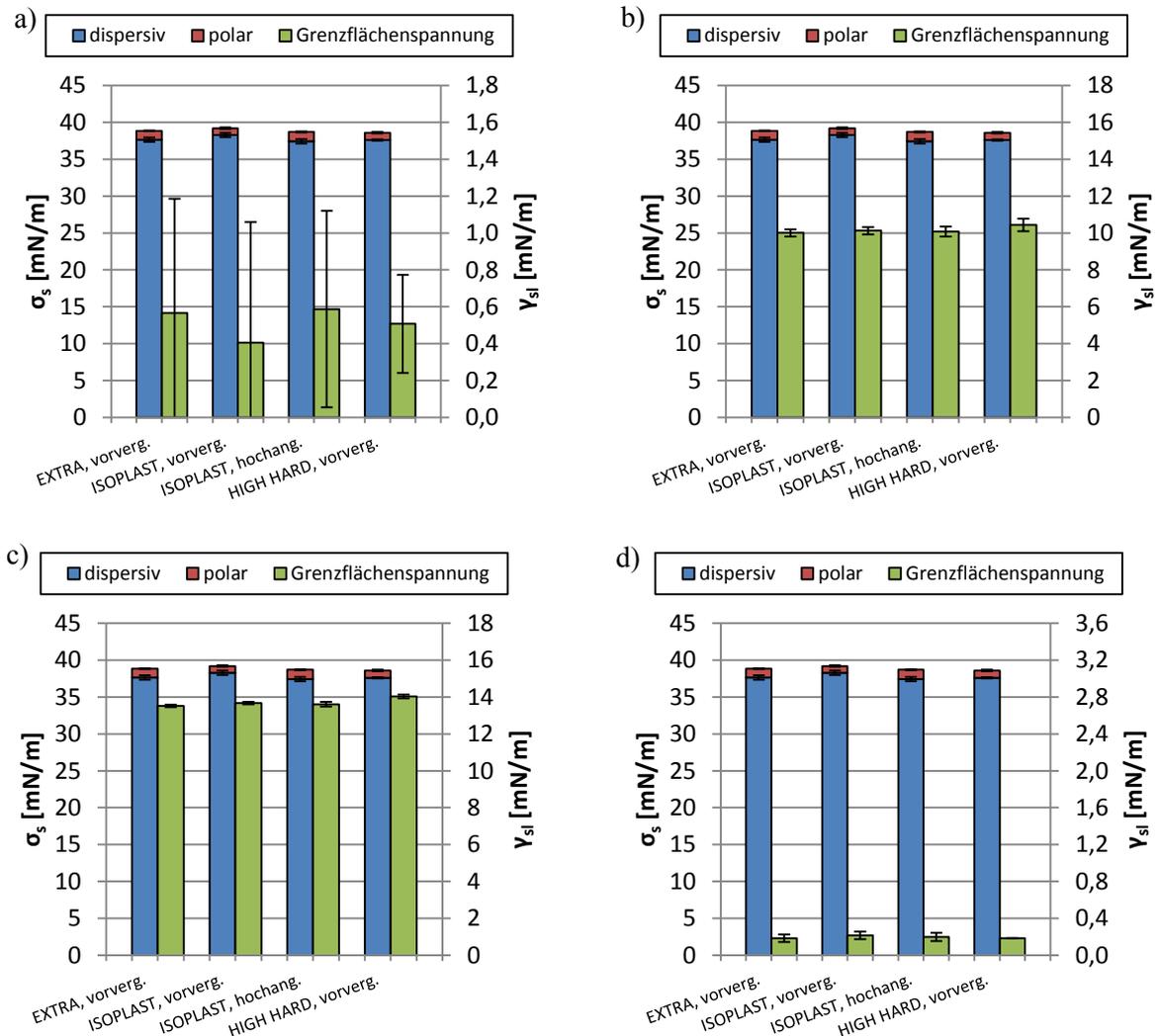


Abb. 4.22: Interpolierte Oberflächenenergie σ_s bei ähnlicher Rauigkeit ($\sigma_{rms} \sim 10$ nm) und errechnete Grenzflächenspannung γ_{sl} des Stahls M303 mit: a) PP, b) ABS/PC, c) ABS, d) PC.

Man erkennt weiter, dass die Oberflächenenergie wieder eine geringe Polarität aufweist, und sich mit der Herstelltechnologie nur leicht ändert. Somit ist der Einfluss der Herstellroute auf die Grenzflächenspannung auch sehr gering.

4.3.3 M390PM

Dieser Stahl wurde in 2 unterschiedlichen Ausführungen geliefert, hochangelassen auf 57,8 HRC, und niedrigangelassen auf 62,3 HRC. Beim M390PM handelt sich um einen hoch korrosionsbeständigen und verschleißbeständigen Stahl der durch Feinkörnigkeit praktisch

isotrope Eigenschaften bietet und ausgezeichnet polierbar ist. Sein Haupteinsatzgebiet liegt wiederum in der Kunststoffverarbeitung für Formen und Formeinsatz, Spritzgießzylinder, Schnecke, etc. [20].

Auch bei diesen Aufnahmen sind wieder Erhöhungen zu erkennen, bei denen es sich wahrscheinlich wieder um Verschmierungen oder Aufschiebungen des Polierprozesses handelt. Beim M390PM wurde eine Untersuchung der Oberflächenenergie in Abhängigkeit der Rauigkeit durchgeführt. Dafür wurden die Proben speziell vorbereitet, die jeweils untersuchten Proben stellen die 5 Einzelschritte der Politur dar. In Abbildung 4.23 und 4.24 sind die untersuchten Oberflächen mit einer Profilaufnahme mit den jeweiligen Parametern zu sehen.

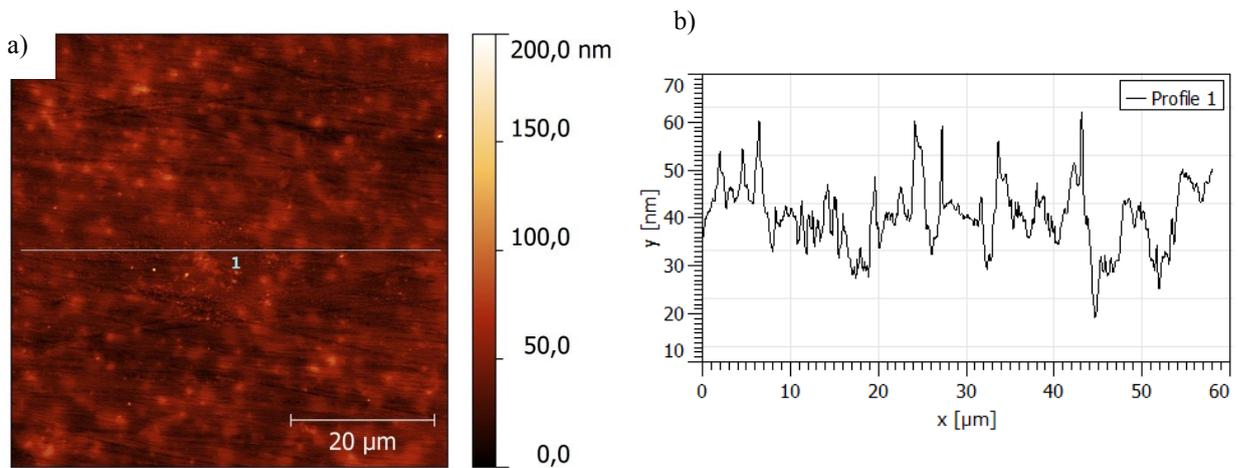


Abb. 4.23: a) AFM Aufnahme eines M390PM hochangelassen auf 57,8 HRC (Hochglanzpolitur) mit b) einer Profilaufnahme der in a) markierten Linie; $\sigma_{\text{rms}} = 10,8 \text{ nm}$, $\xi = 1810 \text{ nm}$, $\alpha = 0,60$.

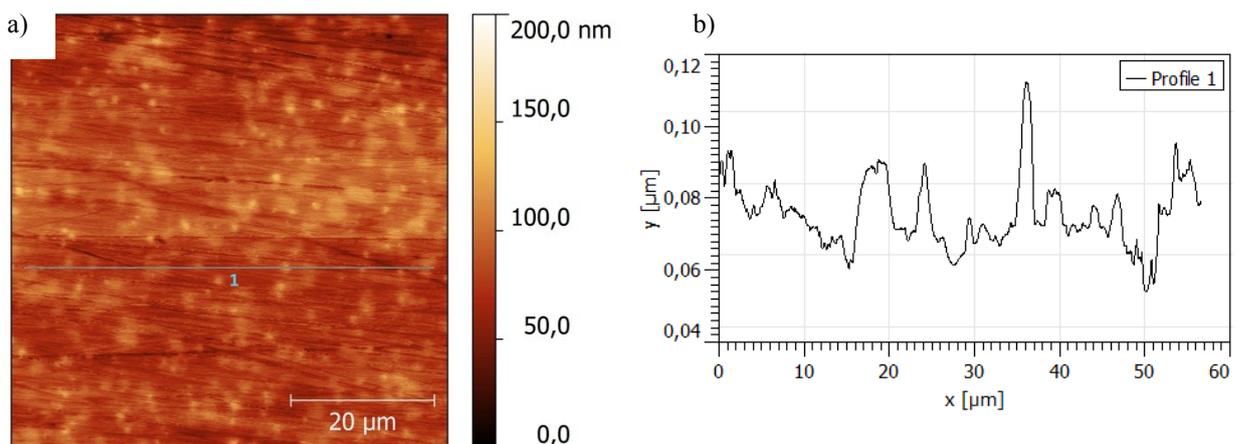


Abb. 4.24: AFM Aufnahme eines M390PM niedrigangelassen auf 62,3 HRC (Hochglanzpolitur) mit b) einer Profilaufnahme der in a) markierten Linie; $\sigma_{\text{rms}} = 13,8 \text{ nm}$, $\xi = 1770 \text{ nm}$, $\alpha = 0,60$.

Im Vergleich zu den vorher vermessenen Stählen ergibt sich beim M390PM ein gänzlich anderes Bild (siehe Abbildung 4.25). Im Allgemeinen nimmt die Oberflächenenergie mit sinkender Rauigkeit ab. Die Oberflächenenergie strebt hier über der Rauigkeit einem Minimum zu. Dies ist wahrscheinlich auf eine unterschiedliche Oberflächenchemie zurückzuführen, nachfolgende Untersuchungen mit einem XPS sollen hier noch Klarheit schaffen.

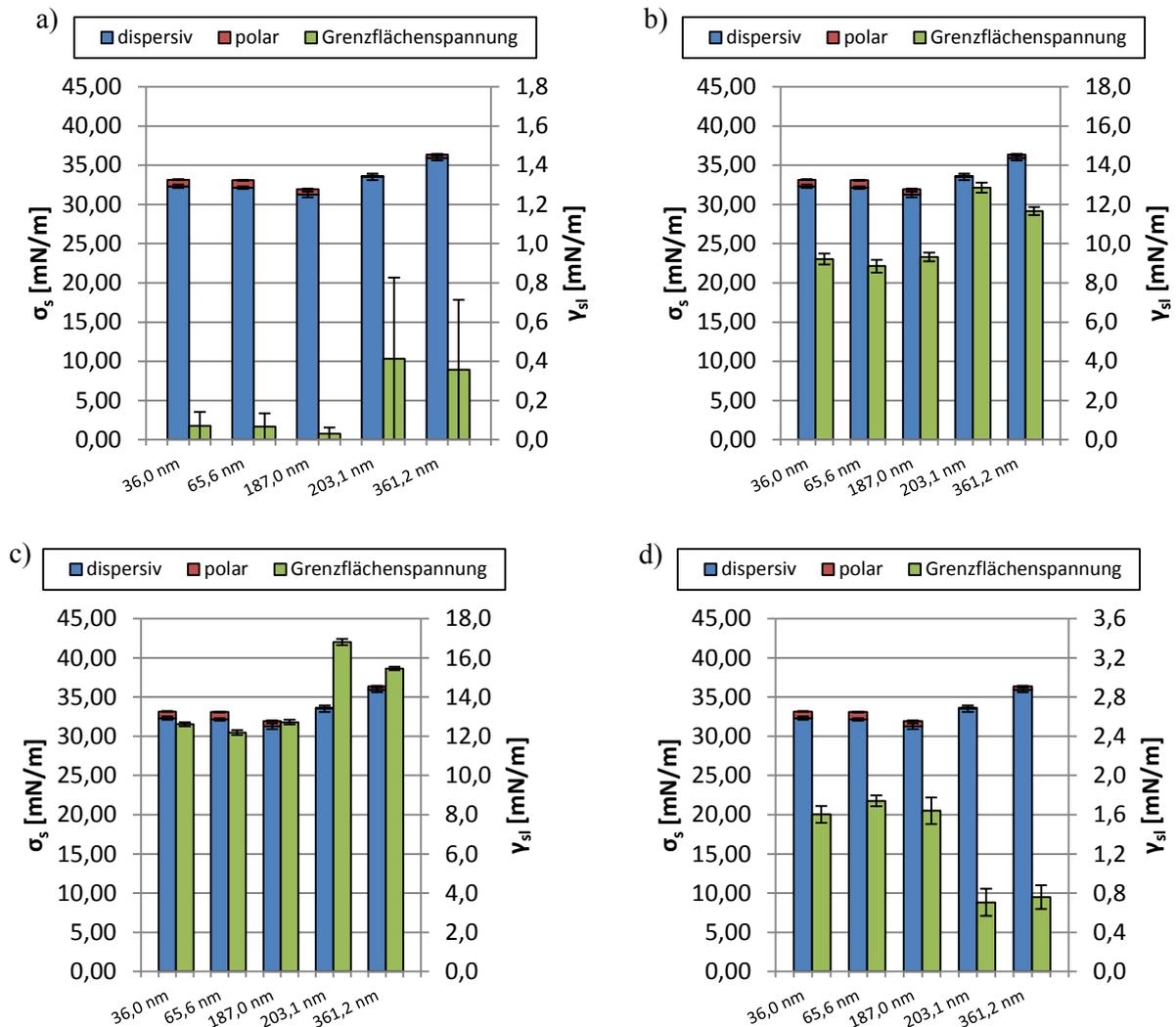


Abb. 4.25: Gemessene Oberflächenenergie σ_s und errechnete Grenzflächenspannung γ_{sl} in Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit von M390PM (hochangelassen) mit: a) PP, b) ABS/PC, c) ABS, d) PC.

Die gleiche Abhängigkeit gilt auch für den niedrig angelassenen Stahl, auch hier sieht man, dass die Oberflächenenergie über der Rauigkeit einem Minimum zustrebt (siehe Abbildung 4.26). Ob sich der errechnete Verlauf der Grenzflächenspannung mit den

Reibversuchen deckt (vergleiche Kapitel 4.3.1), kann nicht beurteilt werden, da diese Versuche noch nicht durchgeführt wurden.

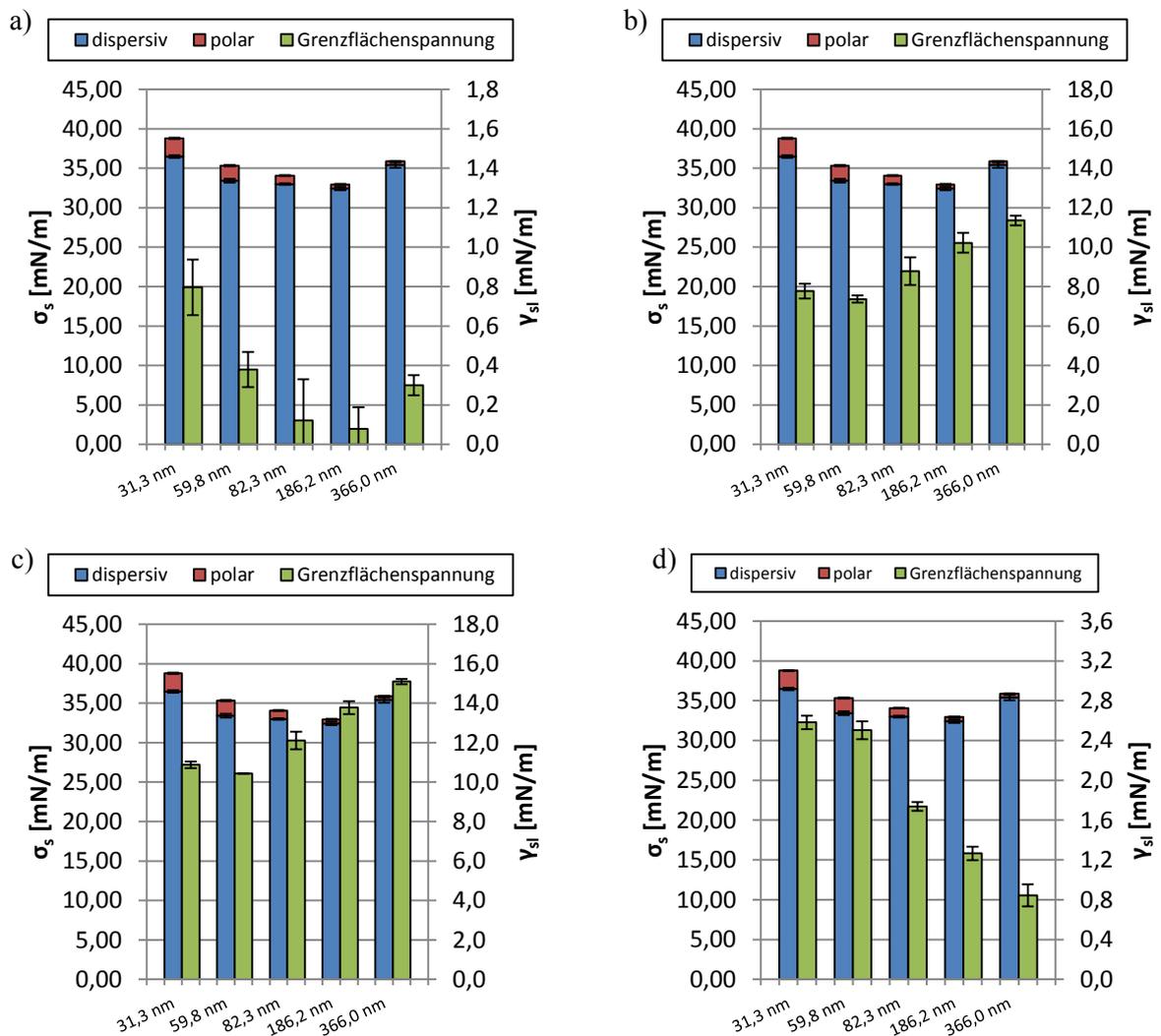


Abb. 4.26: Gemessene Oberflächenenergie σ_s und errechnete Grenzflächenspannung γ_{sl} in Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit von M390PM (niedrigangelassen) mit: a) PP, b) ABS/PC, c) ABS, d) PC.

4.3.4 M268

Beim M268 handelt es sich um einen vorvergüteten Kunststoffformenstahl mit hohem Reinheitsgrad, was sich positiv bei der Polierbarkeit bemerkbar macht. Durch den Zusatz von Nickel ist eine gleichmäßige Festigkeit über den gesamten Querschnitt gegeben, wodurch sich dieser Stahl hervorragend für Bauteile mit großen Abmessungen eignet. Jedoch ist er wegen des geringen Zusatzes von Chrom nicht sehr korrosionsbeständig [21].

Hier wurde ebenfalls wieder eine Polierreihe untersucht und die Oberflächenenergie in Abhängigkeit der Rauigkeit gemessen. Weiters wurde die Grenzflächenspannung wieder für den Kontakt des Werkstoffs mit unterschiedlichen Polymeren berechnet. Abbildung 4.27 zeigt eine AFM Aufnahme der auf Hochglanz polierten Probe.

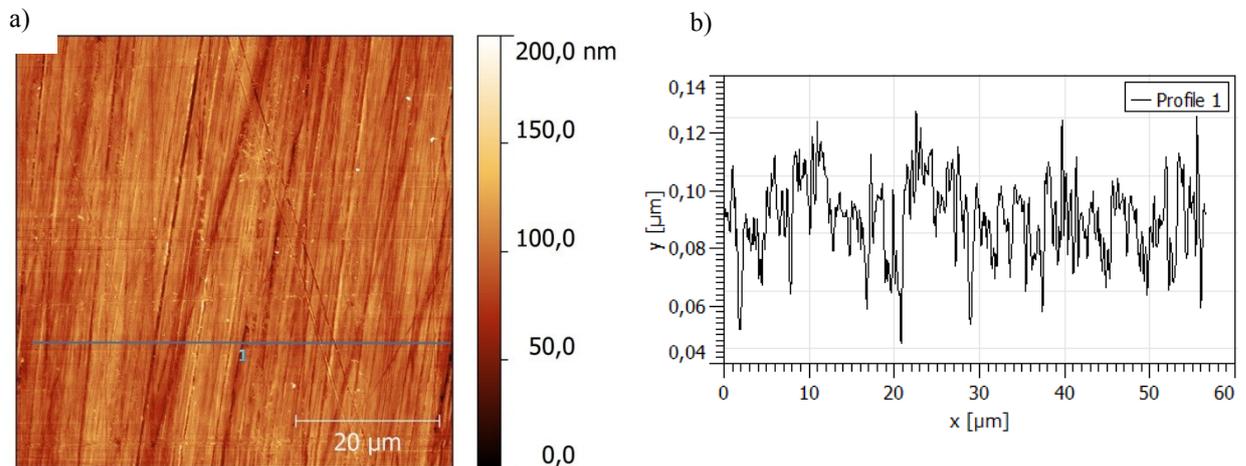


Abb. 4.27: a) AFM Aufnahme eines M268 vorvergütet auf 40 HRC mit Hochglanzpolitur, b) die Profilaufnahme der in a) markierten Linie; $\sigma_{\text{rms}} = 14,3 \text{ nm}$, $\xi = 1960 \text{ nm}$, $\alpha = 0,45$.

Auch hier sieht man wieder ein ähnliches Bild wie beim Stahl M390PM, über die Rauigkeit gibt es ein Minimum der Oberflächenenergie, siehe Abbildung 4.28. Interessant ist, dass die Grenzflächenspannung für PP, ABS und ABS/PC mit steigender Rauigkeit zunimmt, während für PC hingegen die Grenzflächenspannung für kleine Rauigkeiten große Werte annimmt und auf geringe Reibung schließen lässt.

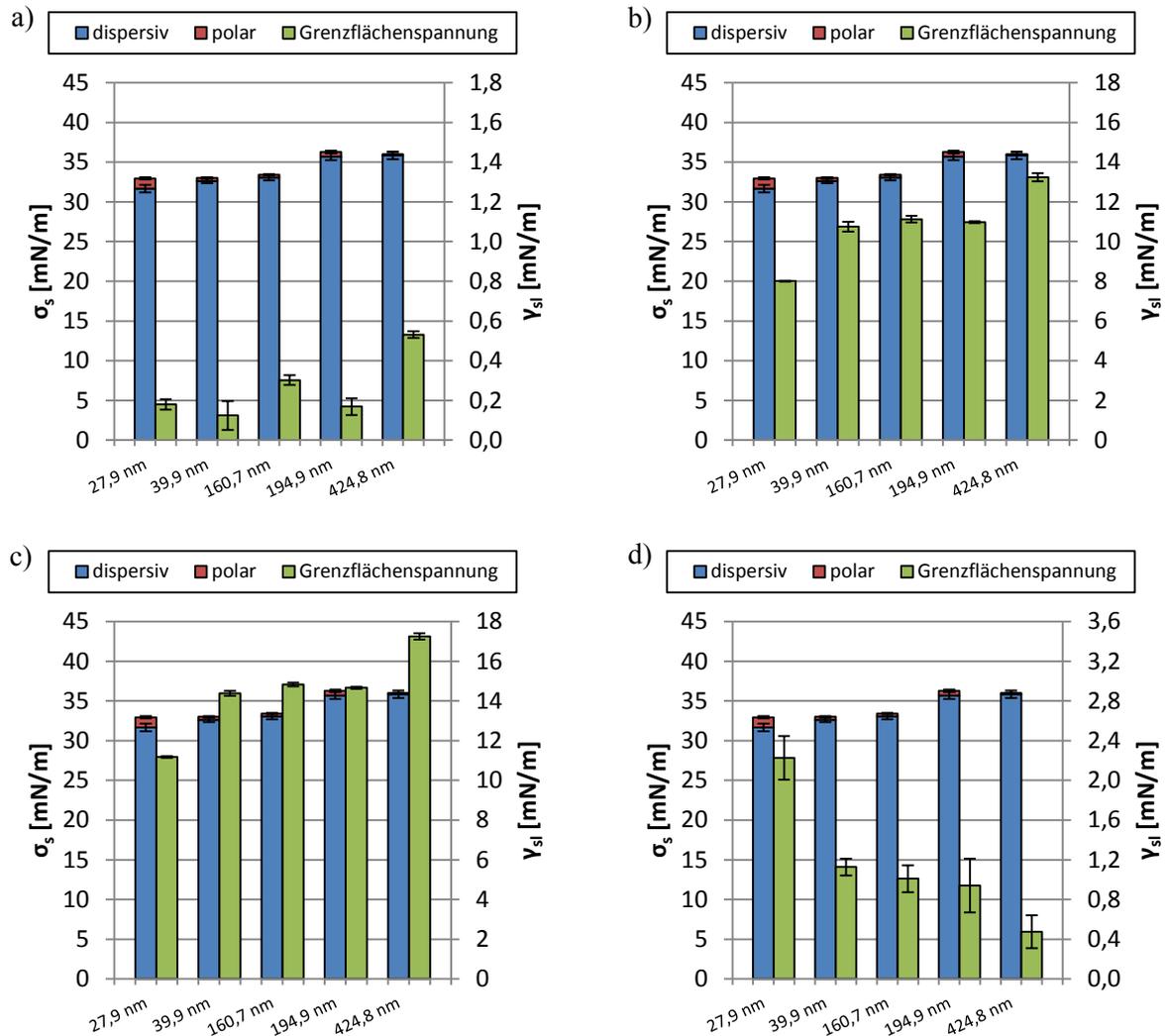


Abb. 4.28: Gemessene Oberflächenenergie σ_s und errechnete Grenzflächenspannung γ_{sl} in Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit von M268 mit: a) PP, b) ABS/PC, c) ABS, d) PC.

Abschließend bleibt noch zu bemerken, dass Stahl, egal welcher Zusammensetzung, Herstellroute und Wärmebehandlung eine relativ geringe Polarität besitzt. Der Kontaktwinkel und somit die Oberflächenenergie hängen einerseits vom Stahl, andererseits von seiner Rauigkeit ab, wobei der Rauigkeitseinfluss überwiegt. Aussagen der Grenzflächenspannung über die Entformbarkeit (zumindest bei Polypropylen) sind sehr schwierig, da man sehr geringe Werte mit großer relativer Schwankung hat.

4.4 Beschichtungen

Alle Beschichtungen wurden von der Fa. Oerlikon Balzers hergestellt. Als Grundmaterial diente der Stahl M333, hochangelassen und auf Hochglanz poliert. Im folgenden Kapitel werden die Schichten näher beschrieben und es wird auf die Unterschiede in Bezug auf ihre

Oberflächenenergie eingegangen. Alle Schichten (außer CrN, TiN, DLC classic und ta-DLC) lagen im „as-deposited“ Zustand vor, von welchem auch die AFM Messungen gemacht wurden. Danach wurden die Beschichtungen poliert, um alle auf eine ähnliche Rauigkeit zu bringen.

4.4.1 AFM-Untersuchungen

Hergestellt wurden alle Beschichtungen mittels Lichtbogen-Sputtern. Als erstes zu sehen ist eine Beschichtungsserie, ausgehend von Cr_2O_3 über CrN zu CrC, siehe Abbildung 4.29 bis Abbildung 4.35. Einzig die CrN-Schicht lag bereits im polierten Zustand vor. Was auffällt ist, dass die Phasenbilder nur topographiebedingten Kontrast zeigen, was darauf schließen lässt, dass sowohl die Tropfen (diese kommen vom Beschichtungsprozess) als auch das Grundmaterial aus dem selben Material bestehen. Von Cr_2O_3 zu $\text{CrO}_x\text{N}_{1-x}$ ($x = 0,82$) ändert sich die laterale Korrelationslänge ξ nur minimal und der Rauigkeitsparameter α sowie die durchschnittliche Tropfengröße (zu sehen an den Histogrammen) bleiben annähernd gleich.

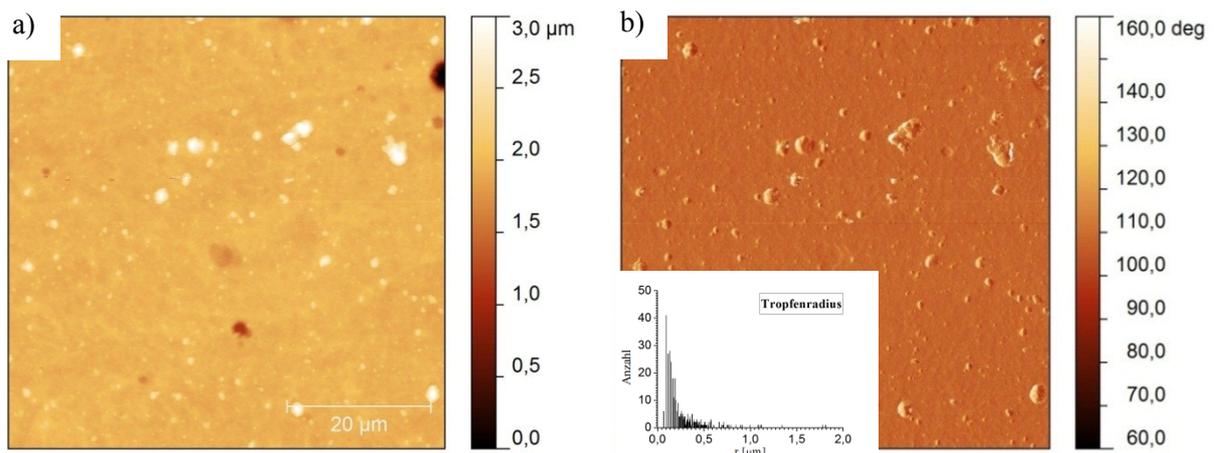


Abb. 4.29: Cr_2O_3 links als a) Topographiebild und b) Phasenbild mit dem Histogramm der Tropfenradien als Inset; $\sigma_{\text{rms}} = 115 \text{ nm}$, $\xi = 990 \text{ nm}$, $\alpha = 0,75$.

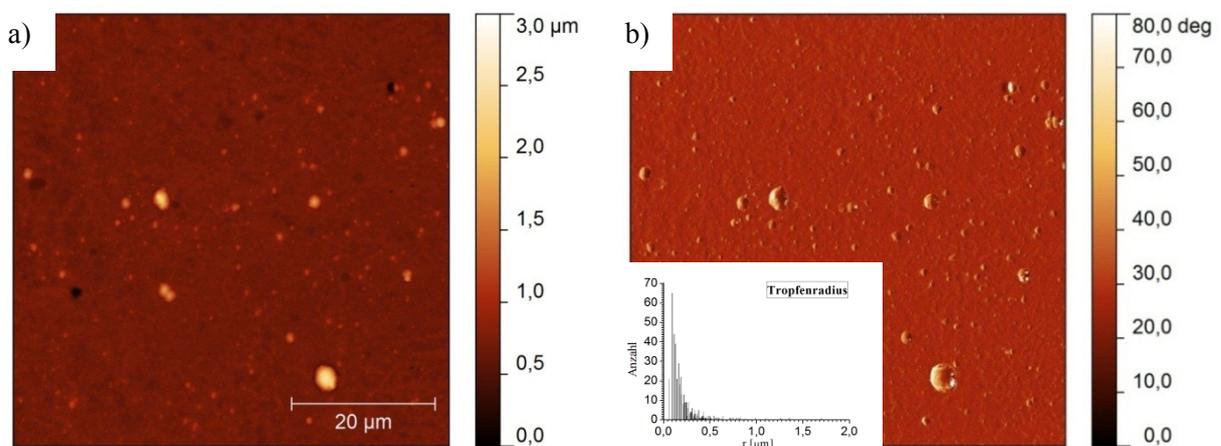


Abb. 4.30: $\text{CrO}_x\text{N}_{1-x}$ ($x = 0,82$) als a) Topographiebild und b) Phasenbild mit dem Histogramm der Tropfenradien als Inset; $\sigma_{\text{rms}} = 95 \text{ nm}$, $\xi = 970 \text{ nm}$, $\alpha = 0,75$.

Geht man eine Stufe weiter und reduziert den Sauerstoffanteil noch mehr (Abbildung 4.31), so nimmt sowohl die Rauigkeit als auch laterale Korrelationslänge zu. Man sieht auch, dass sowohl die Tropfendichte als auch ihre Größe zunehmen.

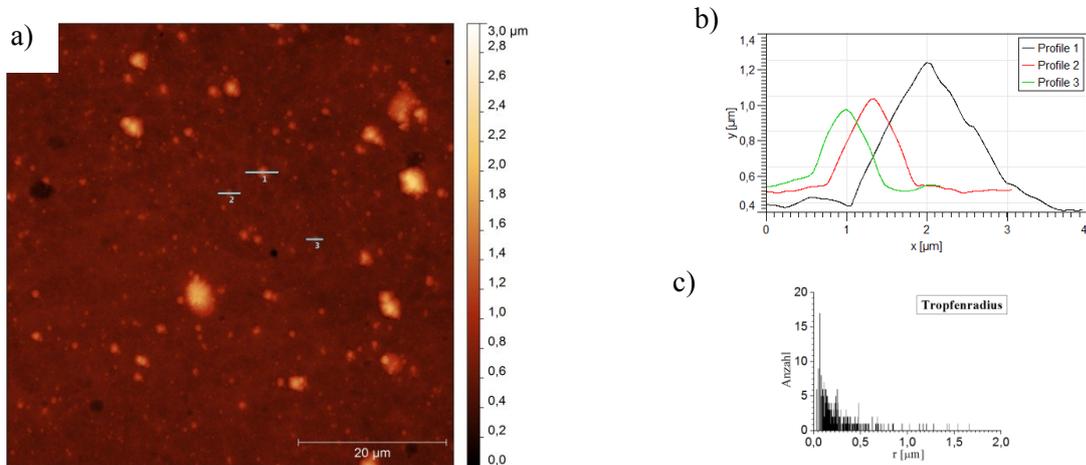


Abb. 4.31: $\text{CrO}_x\text{N}_{1-x}$ ($x = 0,29$) als a) Topographiebild mit b) Profilaufnahmen einiger kleiner Punkte und c) ein Histogramm der Tropfenradien; $\sigma_{\text{rms}} = 114 \text{ nm}$, $\xi = 1140 \text{ nm}$, $\alpha = 0,70$.

Für die CrN-Schicht (Abbildung 4.32) ergibt sich trotz minimaler Rauigkeit eine relativ große laterale Korrelationslänge, was auf die Politur zurückzuführen ist. Durch eine Phasenaufnahme konnte auch hier ausgeschlossen werden, dass es sich bei den Erhöhungen um Rückstände des Poliermittels handelt.

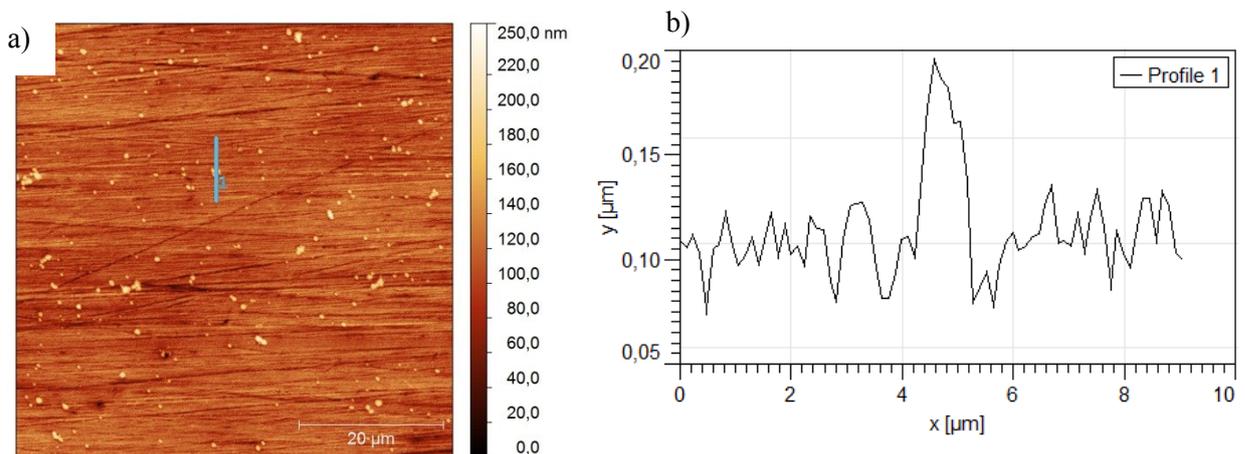


Abb. 4.32: CrN als a) Topographiebild und b) Profilaufnahme der in a) markierten Linie; $\sigma_{\text{rms}} = 19,4 \text{ nm}$, $\xi = 2080 \text{ nm}$, $\alpha = 0,65$.

Wird nun die Kohlenstoffkonzentration erhöht, ändert sich wenig in Bezug auf die Oberflächenparameter (siehe Abbildung 4.33). Erst bei hoher Kohlenstoffkonzentration

erkennt man eine kleine Reduktion der Tropfengröße bei gleichzeitiger Vergrößerung ihrer Anzahl (siehe Histogramm in Abbildung 4.34).

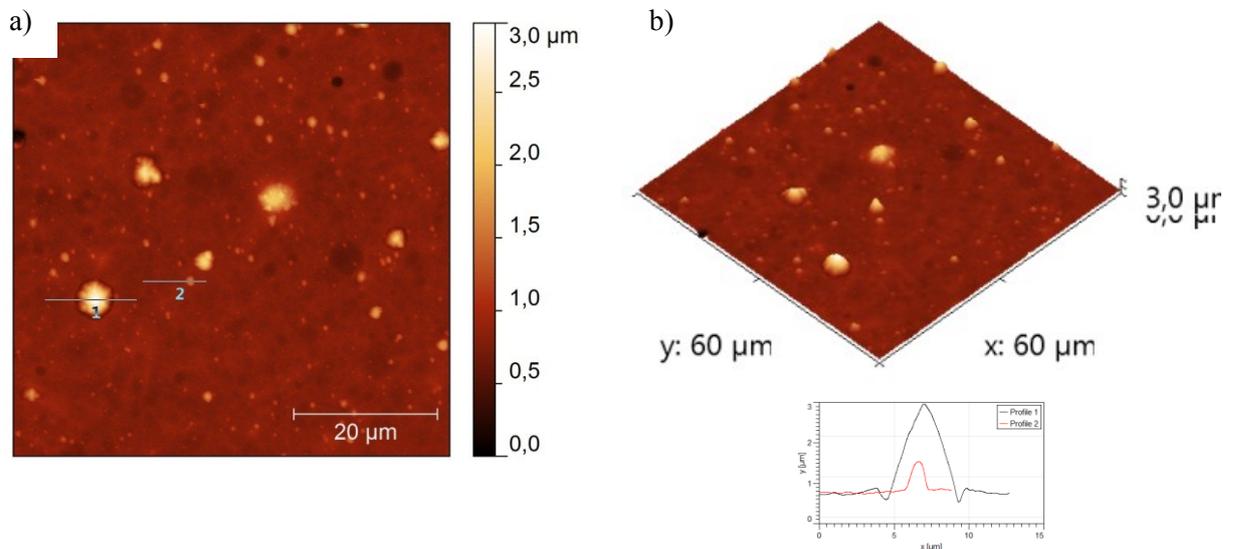


Abb. 4.33: $\text{CrC}_x\text{N}_{1-x}$ ($x = 0,37$) als a) Topographiebild und b) als 3-D Darstellung mit einer Profilaufnahme eines großen und eines kleinen Droplets; $\sigma_{\text{rms}} = 152 \text{ nm}$, $\xi = 1240 \text{ nm}$, $\alpha = 0,80$.

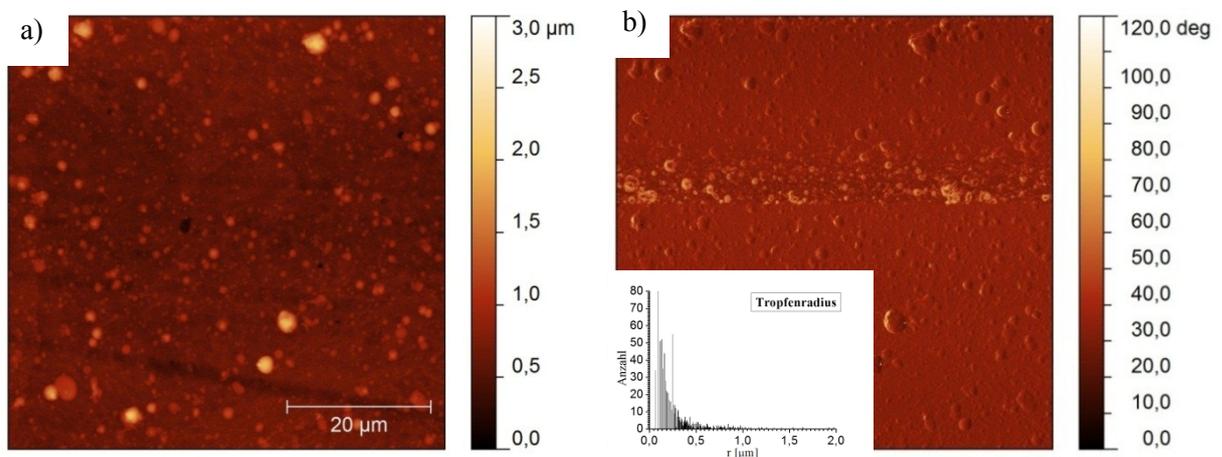


Abb. 4.34: $\text{CrC}_x\text{N}_{1-x}$ ($x = 0,85$) als a) Topographiebild und b) als Phasenbild mit dem Histogramm der Tropfenradien als Inset; $\sigma_{\text{rms}} = 152 \text{ nm}$, $\xi = 950 \text{ nm}$, $\alpha = 0,75$.

Was für reines CrC auffällt (Abbildung 4.35), ist einerseits die größere Anzahl der Tropfen, was sich durch eine geringere laterale Korrelationslänge zeigt, zum anderen ihre Form. Sie wechselt von pyramidenförmig für Cr_2O_3 und Cr-C-N zu kugelförmig für CrC mit annähernder Plateaubildung wie in Abbildung 4.35 zu sehen ist.

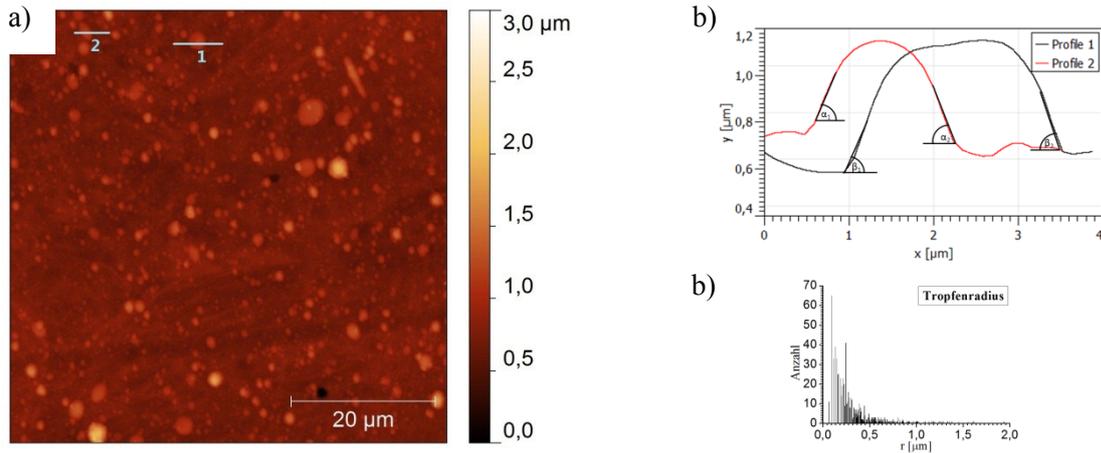


Abb. 4.35: CrC als a) Topographiebild mit b) einer Profilaufnahme und c) mit einem Histogramm der Tropfenradien; $\alpha_1 = 53^\circ$, $\alpha_2 = 43^\circ$, $\beta_1 = 37^\circ$, $\beta_2 = 45^\circ$, $\sigma_{\text{rms}} = 132 \text{ nm}$, $\xi = 950 \text{ nm}$, $\alpha = 0,80$.

Al_2O_3 ist eine sehr raue Beschichtung, was auch klar auf dem 3D-Bild zu sehen ist, siehe Abbildung 4.36.

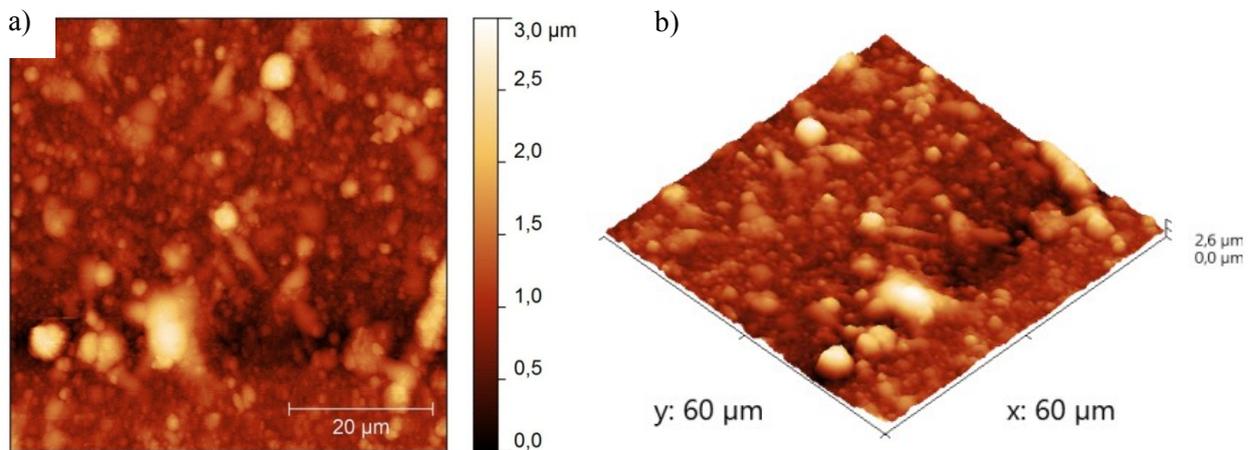


Abb. 4.36: Al_2O_3 als a) Topographiebild und b) als 3-D Bild zu sehen; $\sigma_{\text{rms}} = 352 \text{ nm}$, $\xi = 2030 \text{ nm}$, $\alpha = 0,75$.

Bei NbN (Abbildung 4.37) sieht man eine Schicht, die sich von den bisher gezeigten unterscheidet. Auffällig sind hier die vielen Löcher in der Oberfläche, die bei einer Schichtdicke von lediglich $4,5 \mu\text{m}$ fast bis zum Grundmaterial mit Tiefen von bis zu $2,9 \mu\text{m}$ reichen, dieses aber noch geschützt ist (erkennbar im Phasenbild). Es ist zu erwarten, dass diese Löcher auch durch einen etwaigen Polierprozess nicht gänzlich zu entfernen sind.

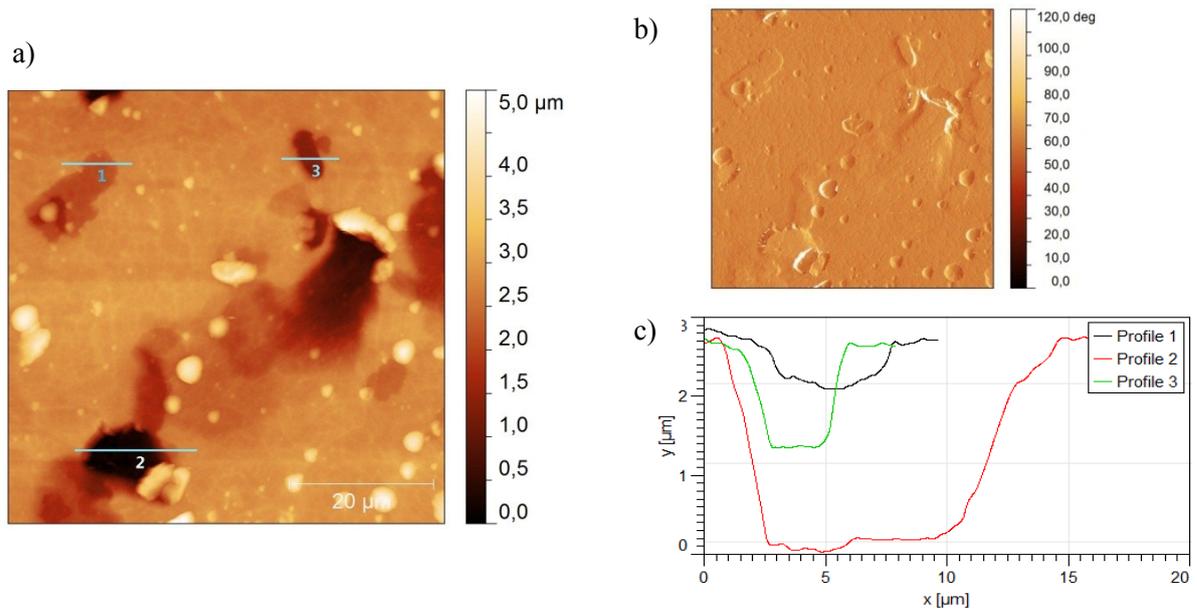


Abb. 4.37: NbN als a) Topographiebild und b) das Phasenbild mit c) einer Profilaufnahme der in a) markierten Löcher; $\sigma_{\text{rms}} = 620 \text{ nm}$, $\xi = 4970 \text{ nm}$, $\alpha = 0,65$.

Auch die TiN-Schicht (Abbildung 4.38) hat eine spezielle Morphologie, fast honigwabenartig, jedoch stellt diese Abbildung schon den polierten Zustand dar.

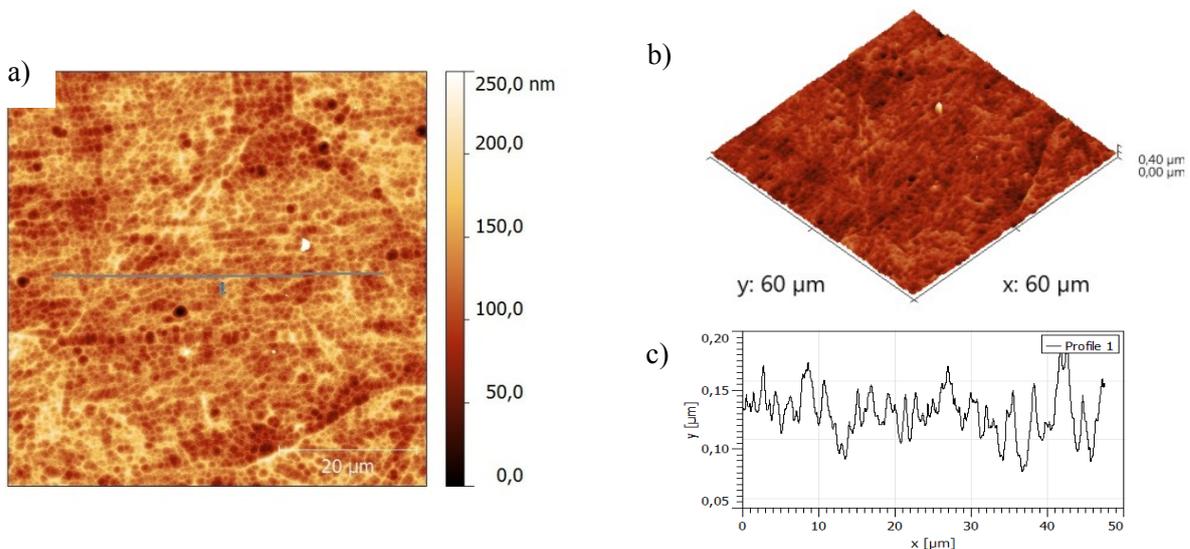


Abb. 4.38: TiN als a) Topographiebild und b) als 3-D Bild mit c) einer Profilaufnahme der in a) markierten Linie; $\sigma_{\text{rms}} = 27,0 \text{ nm}$, $\xi = 1270 \text{ nm}$, $\alpha = 0,55$.

Als letztes werden noch die Diamant ähnlichen Beschichtungen DLC (*diamond like carbon*) behandelt. Das *ta*- bei der zweiten Schicht steht für tetragonal. Ein Vergleich dieser beiden DLC-Schichten ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich, da nur eine in polierter Form vorliegt. Der Rauigkeitseinfluss auf die Oberflächenenergie ist zu groß, als dass hier ein direkter Vergleich der beiden Schichten zulässig ist (siehe Abbildung 4.39).

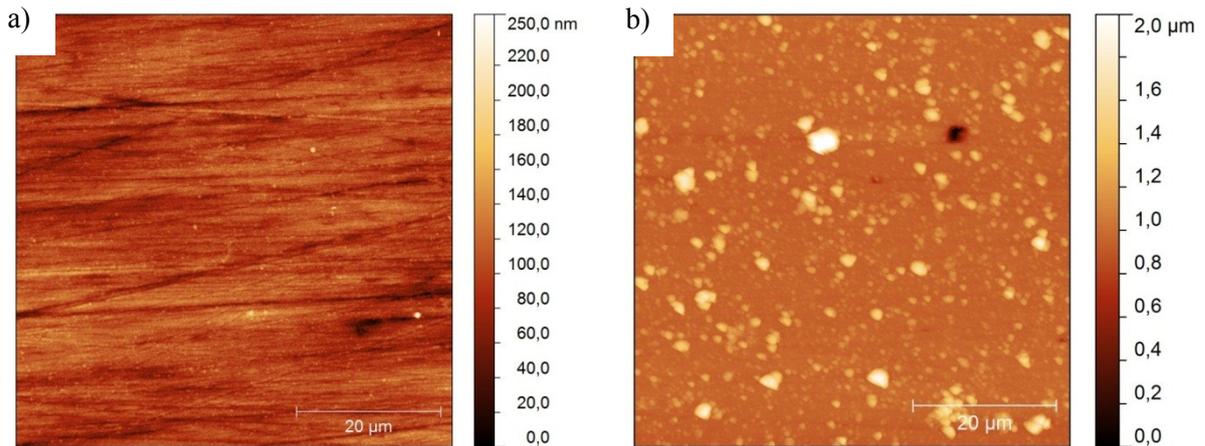


Abb. 4.39: a) DLC-classic Beschichtung; $\sigma_{\text{rms}} = 17,4 \text{ nm}$, $\xi = 670 \text{ nm}$, $\alpha = 0,45$ b) ta-DLC Beschichtung; $\sigma_{\text{rms}} = 121 \text{ nm}$, $\xi = 1090 \text{ nm}$, $\alpha = 0,75$; zu beachten ist der unterschiedliche Höhenmaßstab.

4.4.2 Oberflächenenergie und Grenzflächenspannung

In dem Diagramm in Abbildung 4.40 ist die Oberflächenenergie (linke vertikale Achse) gegenüber der Oberflächenrauigkeit (rechte vertikale Achse) der einzelnen Schichten aufgetragen. Man sieht, dass nur einzelne Beschichtungen direkt miteinander vergleichbar sind, nämlich jene, die eine ähnliche Rauigkeit aufweisen. Dies wären: CrN – TiN – DLC classic mit einem $\sigma_{\text{rms}} \sim 20 \text{ nm}$, Cr_2O_3 – $\text{CrO}_x\text{N}_{1-x}$ (viel O_2) – ta-DLC mit einem $\sigma_{\text{rms}} \sim 110 \text{ nm}$, $\text{CrO}_x\text{N}_{1-x}$ (wenig O_2) – $\text{CrC}_x\text{N}_{1-x}$ (viel C) – $\text{CrC}_x\text{N}_{1-x}$ (wenig C) – CrC mit einem $\sigma_{\text{rms}} \sim 155 \text{ nm}$ und Al_2O_3 – NbN mit einem $\sigma_{\text{rms}} \sim 430 \text{ nm}$.

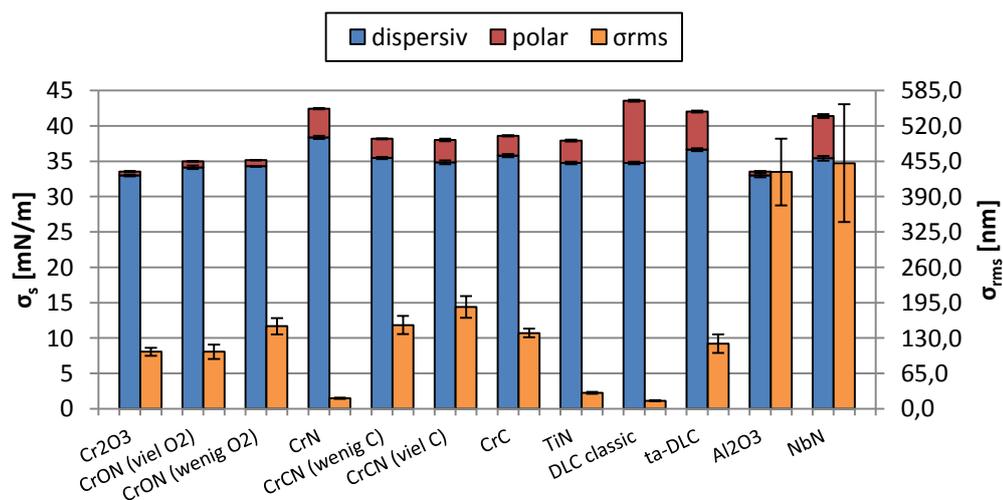


Abb. 4.40: Gemessene Oberflächenenergie σ_s und gemessene Oberflächenrauigkeiten σ_{rms} ($= R_q$) der einzelnen Beschichtungen.

Tabelle 4.1 zeigt die vergleichbaren Beschichtungen mit einem qualitativen Vergleich der Oberflächenenergien.

Tabelle 4.1: Vergleich der Beschichtungen mit ähnlicher Rauigkeit.

$\sigma_{\text{rms}} = R_q$ (nm)	Oberflächenenergie
~ 430	$\text{Al}_2\text{O}_3 \ll \text{NbN}$
~ 155	$\text{CrO}_x\text{N}_{1-x}$ ($x = 0,29$) < CrC, $\text{CrC}_x\text{N}_{1-x}$ ($x = 0,37$ & $0,85$)
~ 110	Cr_2O_3 , $\text{CrO}_x\text{-N}_{1-x}$ ($x = 0,82$) < ta-DLC
~ 20	TiN < CrN < DLC Classic

In den folgenden Abbildungen sind wieder die Oberflächenenergien gegen die Grenzflächenspannung aufgetragen, jeweils für PP (Abbildung 4.41), PC (Abbildung 4.42), ABS/PC (Abbildung 4.43) und ABS (Abbildung 4.44). Für PP und PC erkennt man, dass eine geringe Polarität der Oberflächenenergie der Beschichtung eine kleine Grenzflächenspannung verursacht, eine höhere Polarität aber zu großen Änderungen führt.

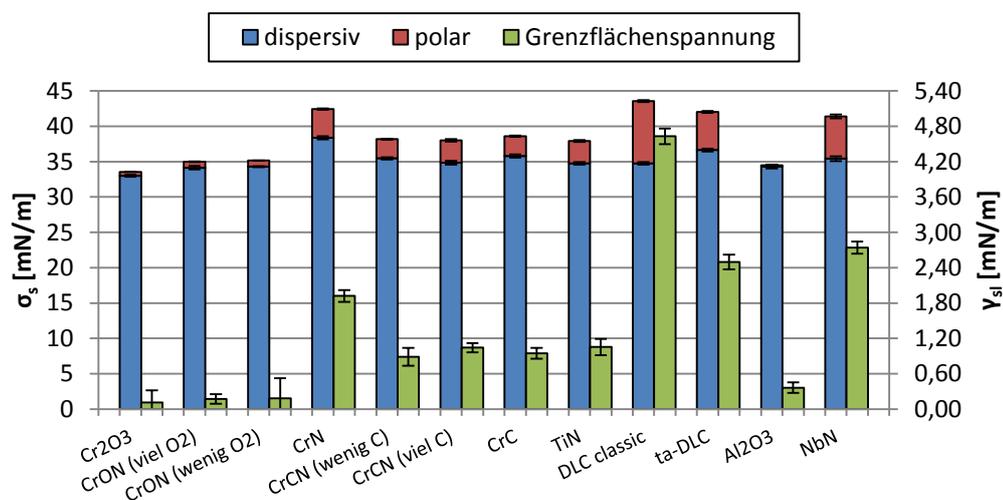


Abb. 4.41: Gemessene Oberflächenenergie σ_s und errechnete Grenzflächenspannung γ_{sl} eines möglichen Kontaktes der einzelnen Beschichtungen mit PP.

Dies lässt sich dadurch erklären, dass PP und PC an sich fast keine Polarität besitzen und dadurch mit Oberflächen mit einer hohen Polarität weniger wechselwirken können (Erniedrigung der γ_{sl}).

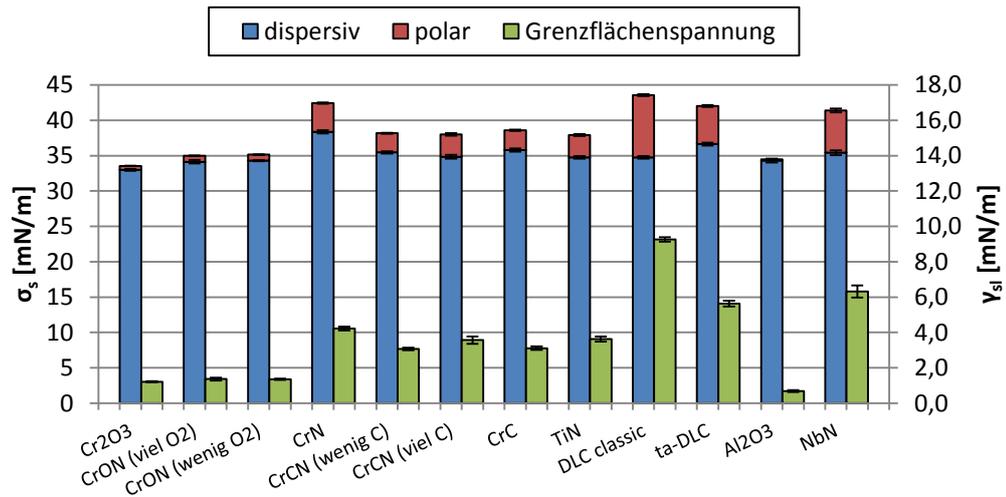


Abb. 4.42: Gemessene Oberflächenenergie σ_s und errechnete Grenzflächenspannung γ_{sl} eines möglichen Kontaktes der einzelnen Beschichtungen mit PC.

Für den Fall eines Kontaktes mit ABS/PC bzw. ABS, beide besitzen hochpolare Oberflächen, zeigt sich das umgekehrte Bild (Abbildungen 4.43 und 4.44). Werkstoffoberflächen mit geringer Polarität verursachen eine hohe Grenzflächenspannung, solche mit großer Polarität eine geringe.

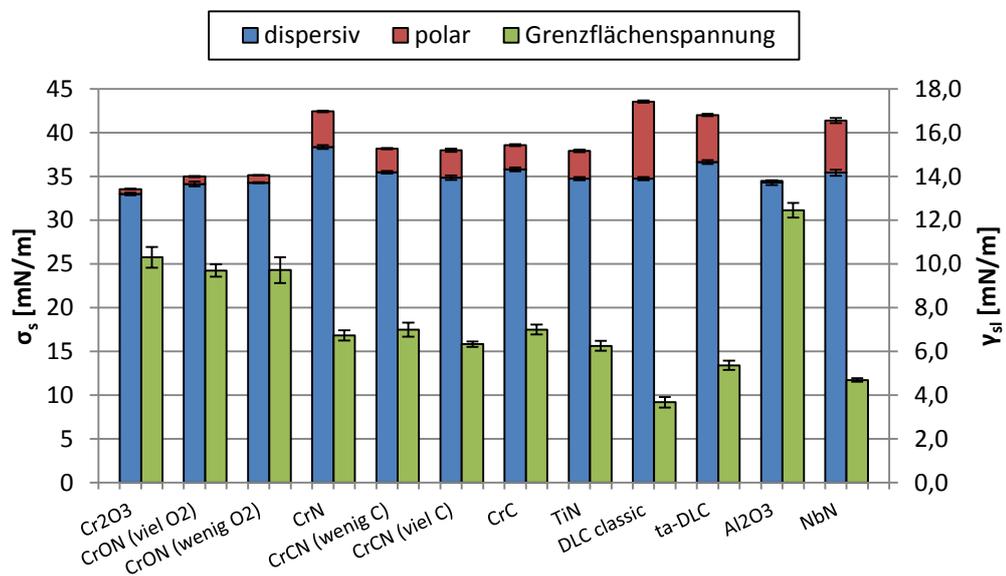


Abb. 4.43: Gemessene Oberflächenenergie σ_s und errechnete Grenzflächenspannung γ_{sl} eines möglichen Kontaktes der einzelnen Beschichtungen mit ABS/PC.

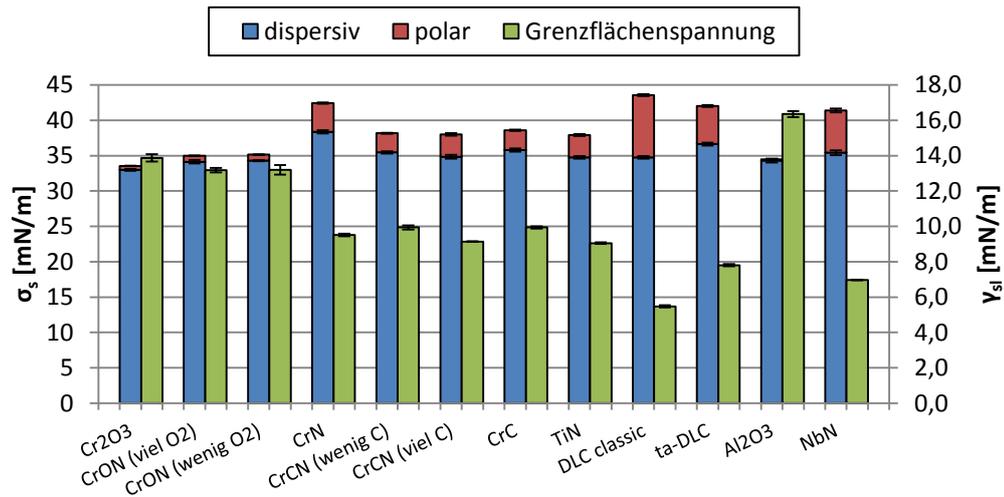


Abb. 4.44: Gemessene Oberflächenenergie σ_s und errechnete Grenzflächenspannung γ_{sl} eines möglichen Kontaktes der einzelnen Beschichtungen mit ABS.

In einem nächsten Untersuchungsschritt wurden die as-deposited Beschichtungen einem Polierschritt unterzogen, zu sehen in Abbildung 4.45. Man erkennt, dass die Oberflächenenergie von Cr₂O₃, CrO_xN_{1-x}, CrC_xN_{1-x} und CrC annähernd gleich ist, für CrN jedoch einen sehr viel größeren Wert und eine viel größere Polarität annimmt. Auch die ta-DLC Schicht zeigt eine große Oberflächenenergie und Polarität.

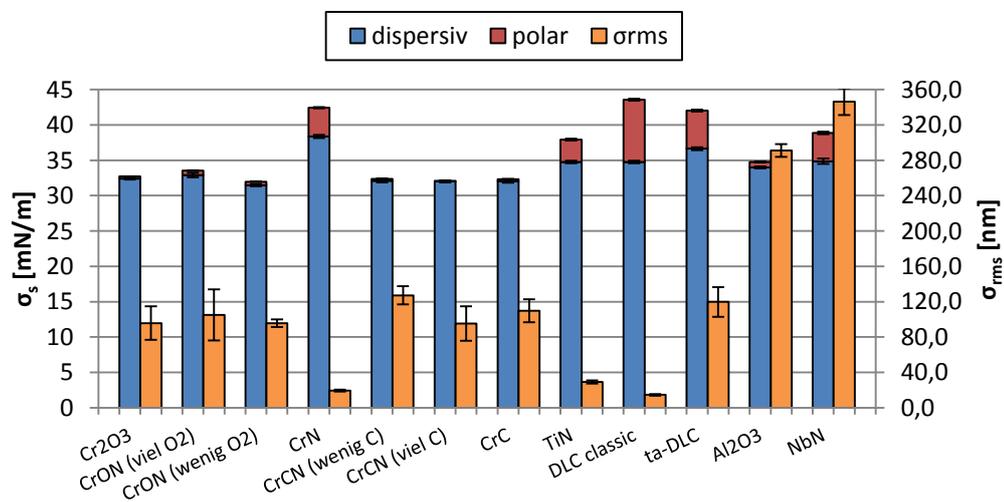


Abb. 4.45: Gemessene Oberflächenenergie σ_s und gemessene Rauigkeit σ_{rms} der Beschichtungen nach dem 1. Poliervorgang.

Bei einer Gegenüberstellung der Oberflächenenergien des unpolierten und des polierten Zustandes (Abbildung 4.46) zeigt sich wieder, dass mit sinkender Rauigkeit sowohl der disperse als auch der polare Anteil der Oberflächenenergie abnehmen. Bei den Schichten Cr₂O₃ und C-O-N verringert sich der polare Anteil der Oberflächenenergie durch das

einmalige Polieren nur geringfügig, für die Schichten Cr-C-N und CrN hingegen sinkt er sehr stark und geht beinahe gegen Null.

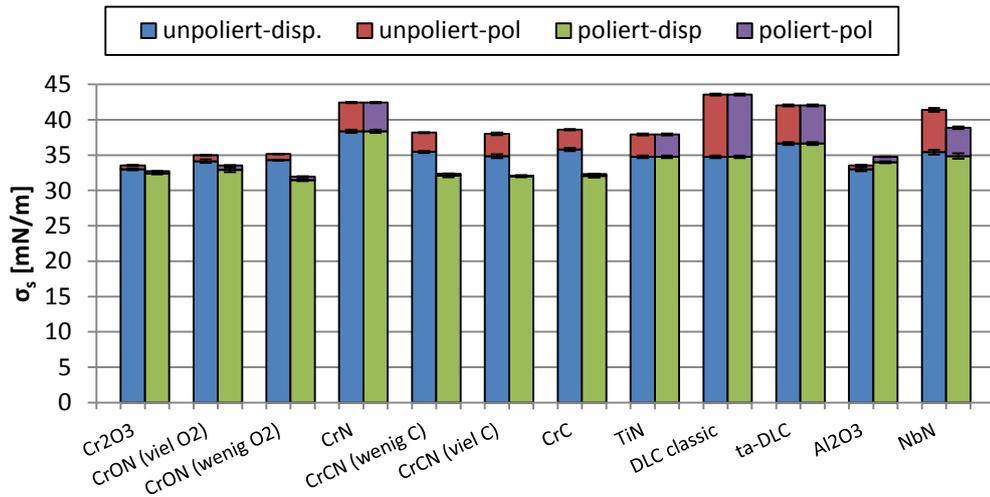


Abb. 4.46: Gegenüberstellung der gemessenen Oberflächenenergien σ_s des unpolierten (blau, rot) und des polierten Zustandes (grün, violett).

Daraus lässt sich schließen, dass sich die Grenzflächenspannung für Cr_2O_3 , $\text{CrO}_x\text{N}_{1-x}$, $\text{CrC}_x\text{N}_{1-x}$ und CrC wenig unterscheiden werden. Für CrN, für den Fall mit unpolarem PP und PC jedoch nimmt die Grenzflächenspannung größere Werte an (Abbildung 4.47 und 4.48). Das lässt auf geringere Reibkräfte bei der Entformung schließen.

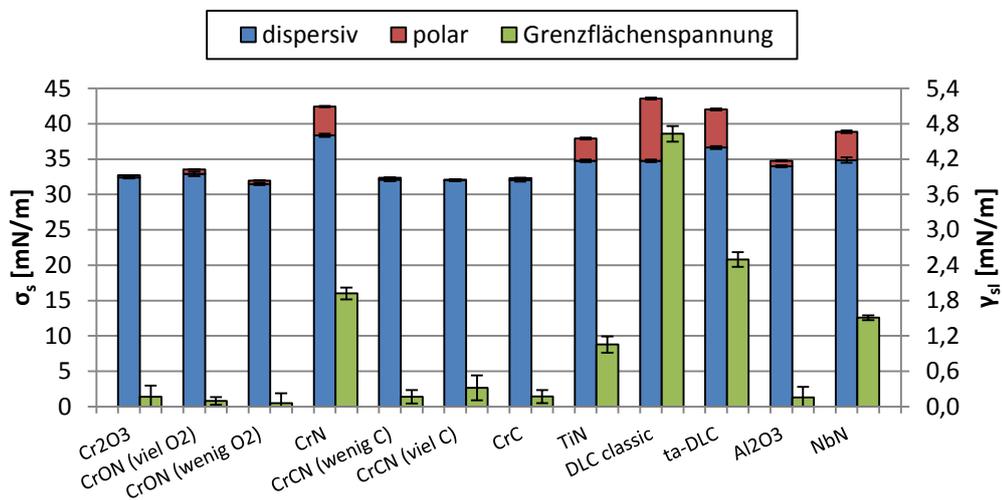


Abb. 4.47: Gemessene Oberflächenenergie σ_s von polierten Beschichtungen und errechnete Grenzflächenspannung γ_{sl} eines möglichen Kontakts mit PP.

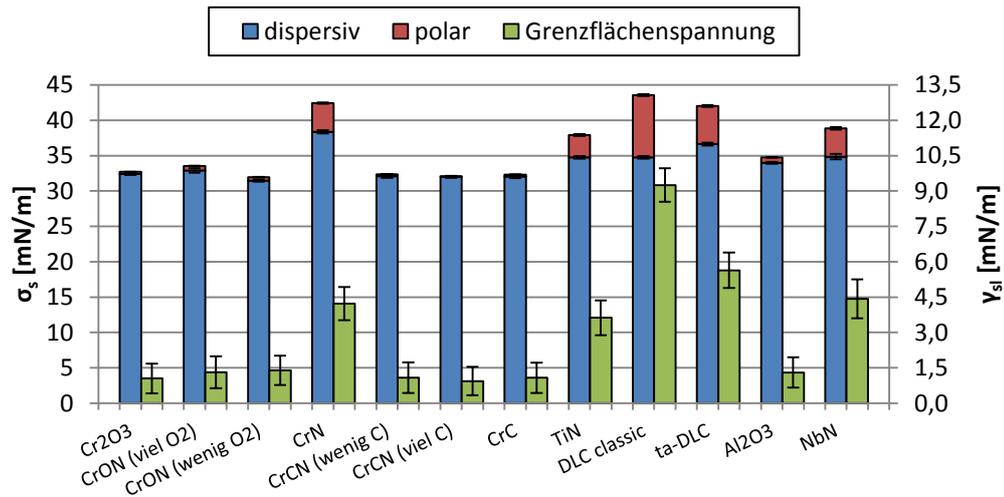


Abb. 4.48: Gemessene Oberflächenenergie σ_s von polierten Beschichtungen und errechnete Grenzflächenspannung γ_{sl} eines möglichen Kontakts mit PC.

In Abbildung 4.49 ist das entsprechende Diagramm für ABS gezeigt. Beim ABS/PC würde sich qualitativ an der Grenzflächenspannung nichts ändern und daher wird auf die Darstellung verzichtet. Trotz der annähernd gleichen Oberflächenenergien von Cr_2O_3 und $\text{CrO}_x\text{N}_{1-x}$ zeigt sich ein Abfall der Grenzflächenspannung hin zu geringeren Sauerstoffkonzentration. Bei Erhöhung der Kohlenstoffkonzentration von CrN über $\text{CrC}_x\text{N}_{1,x}$ hin zu CrC ist hingegen ein starker Anstieg von γ_{sl} zu beobachten. Vergleicht man die Daten mit jenen der unpolierten Proben (Abbildung 4.44), erkennt man eine deutliche Zunahme der Grenzflächenspannung, was auf geringere Oberflächenenergien und geringere Polaritäten zurückzuführen ist.

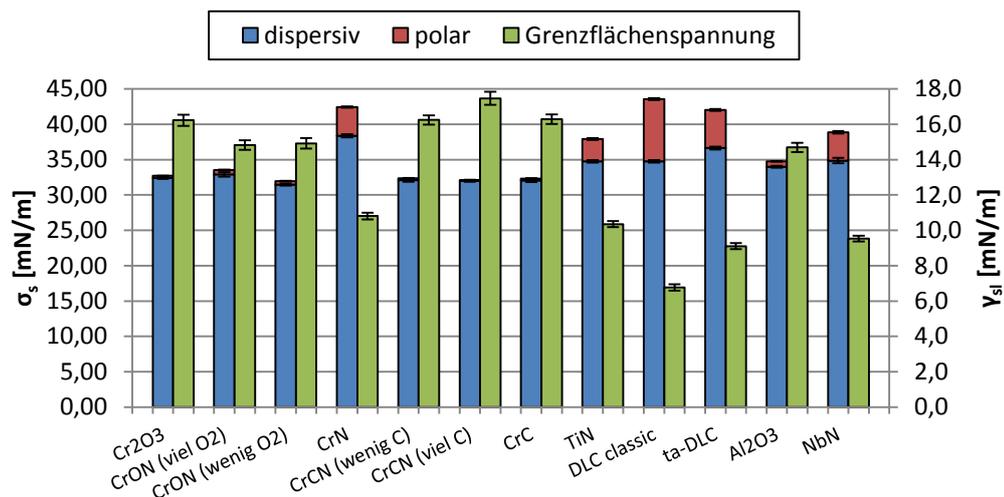


Abb. 4.49: Gemessene Oberflächenenergie σ_s von polierten Beschichtungen und errechnete Grenzflächenspannung γ_{sl} eines möglichen Kontakts mit ABS.

Mit den hiermit gewonnenen Daten lassen sich nun Aussagen über mögliche Entformungskräfte treffen. Tabelle 4.2 zeigt quantitativ die Ergebnisse früherer Reibwertversuche [1]. Vergleicht man die Ergebnisse mit den in dieser Arbeit erhaltenen Grenzflächenspannungen (Tabelle 4.3) sieht man eine große Übereinstimmung. Aufgrund des großen Einflusses der Rauigkeit auf die Oberflächenenergie sind nur Vergleiche der unterschiedlichen Werkstoffe bei ähnlicher Rauigkeit zulässig. Hier sei nochmal daran erinnert, dass geringe Entformungskräfte einer hohen Grenzflächenspannung entsprechen und umgekehrt, vgl. Kapitel 2.3.2.

Tab. 4.2: Quantitativer Vergleich der Entformungskräfte einzelner Beschichtungen und Stähle bei unterschiedlichen Rauigkeiten [1].

Rauigkeit [nm]	PP Hostacom PPU X9067	PC Makrolon 2407
21	M333 < M390	M390 < M333
~ 30	CrN < M333	CrN < M333
~ 55	CrN < TiN	CrN = TiN
~ 130	M333 < M390	M390 < M333

Tab. 4.3: Qualitativer Vergleich der hier erhaltenen Grenzflächenspannungen der Beschichtungen und Stähle von Tabelle 4.2.

Rauigkeit [nm]	PP Hostacom PPU X9067	PC Makrolon 2407
21	0,09 > 0,07	1,60 > 1,39
~ 30	1,92 > 0,13	4,23 > 1,23
~ 55	1,92 > 1,05	4,23 ~ 3,63
~ 130	0,45 > 0,03	1,64 > 0,63

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit ist die Abhängigkeit der Oberflächenenergie von der Oberflächenrauigkeit systematisch bei unterschiedlichen Werkstoffen untersucht worden. Dabei wurden Formenstähle unterschiedlicher Zusammensetzung und Wärmebehandlungsrouten (Böhler M333, M303, M390PM, M268) und Beschichtungen (Oerlikon Balzers) untersucht. Der teilkristalline Kunststoff Polypropylen (PP) und die amorphen Kunststoffe Polycarbonat (PC), Acrylnitril-Butadien-Styrol – Polycarbonat (ABS/PC) und Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) sind jeweils bei unterschiedlichen Prozessbedingungen während des Spritzgießens hergestellt worden. Zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit wurden ein Rasterkraftmikroskop und ein konfokales Weißlichtmikroskop eingesetzt. Die Oberflächenenergie wurde mit einem Kontaktwinkelmessgerät bei Raumtemperatur mit Standardflüssigkeiten bestimmt.

Es konnte gezeigt werden, dass die Oberflächenenergie mit sinkender Rauigkeit meist geringer wird, jedoch auch deutlich von den Herstellungsprozessen der Proben abhängt.

Beim Spritzgießen von thermoplastischen Kunststoffen wird zuerst heiße Polymerschmelze unter Druck in einen kälteren, aus Stahl gebildeten Formhohlraum (Kavität) gespritzt. Anschließend wird die Schmelze zu einem festen Bauteil abgekühlt, der dann beim Entformungsvorgang unter Reibung von der Stahloberfläche getrennt wird. Die sogenannte Grenzflächenspannung ist ein Wert, der das Trennverhalten eines Festkörpers von einem anderen Festkörper beschreiben könnte. In dieser Arbeit wurde untersucht, ob die Grenzflächenspannung als Vorhersagekenngröße für das reale Entformungsverhalten dienen kann. Aus der mathematischen Analyse der Grenzflächenspannung und ihrer Einflussgrößen ergibt sich:

- Je unterschiedlicher die Polarität der Oberflächenenergien der beiden Festkörper, desto größer ist die Grenzflächenspannung.
- Je höher die Oberflächenenergien, desto größer ist die Grenzflächenspannung.
- Bei geringem Unterschied der Oberflächenenergien und gleicher Polarität wird die Grenzflächenspannung niedriger. Beim Extremfall gleicher Werkstoffe wird die Grenzflächenspannung Null.
- Da gleiche Werkstoffe am besten zueinander haften und daher deren Trennung am schwierigsten sein wird, gilt im Umkehrschluss: **Je höher die Grenzflächenspannung, desto leichter die Trennung.**

Um dies zu überprüfen, wurden die Grenzflächenspannungen verschiedener Kombinationen aus den oben genannten Kunststoffen, Formenstählen und Formbeschichtungen berechnet und mit Erkenntnissen aus früheren prozessnahen Entformungskraftmessversuchen (Reibversuch direkt in einem Spritzgießprozess) verglichen.

Die errechneten Werte der Grenzflächenspannung bei Betrachtung der weitgehend unpolaren Kunststoffe PP und PC lagen bei den Beschichtungen generell über jenen der Stähle. Dies deckt sich mit den Erwartungen, da die getesteten Beschichtungen ob ihrer Reduzierung der Entformungskraft eingesetzt werden. Für die polaren Kunststoffe ABS und ABS/PC würden die Stähle vergleichsweise günstiger als die Beschichtungen abschneiden, dies konnte jedoch mangels experimentellen Ergebnissen noch nicht verifiziert werden.

In Weiterführung dieser Arbeit soll bei dem Stahl M390PM mittels XPS seine Oberflächenchemie untersucht werden. Weiters sollen die Oberflächenenergien und Grenzflächenspannungen der untersuchten Werkstoffe auch temperaturabhängig bestimmt werden, da in der Praxis die Entformungstemperaturen deutlich über Raumtemperatur liegen.

6 Literatur

- [1] Unveröffentlichte Gesamtpräsentation, Polymer Competence Center Leoben, 15.09.2009.
- [2] G. Jakob: 'Messtechnik zur Bestimmung von Topographie. Topographie und Rauheit – Messen und Bewerten von technischen Oberflächen', B01, Bergisch Gladbach, Fries Research & Technology, 2002.
- [3] MFP-3D Atomic Force Microscope, Handbuch, Fa. Asylum Research, Santa Barbara/Kalifornien/USA, 2004.
- [4] G. Binnig, C. F. Quate und C. Gerber, Atomic force microscope, Physical Review Letters, 56(9): 930 – 933, 1986.
- [5] C. Teichert: in 'Handbuch der Nanoanalytik Steiermark', (ed. S. Psutka, F. Hofer), 2010, p. 105.
- [6] Tanja Drobek: Reibungskraftmikroskopie http://www.nano-science.de/external/research/instruments/afm/afm_detail_deutsch/afm_dt.htm, Institut für Kristallographie und Mineralogie, Universität München, Jänner 2012.
- [7] Q. Shen, Diplomarbeit: Friction Force Microscopy characterization of organic thin films, Montanuniversität Leoben, Juni 2009.
- [8] FRT, Datenblatt zu FRT MicroSpy[®] Topo, http://www.frt-gmbh.com/frt/upload/pdf_de/FRT_MicroSpy_Topo_de.pdf, Februar 2012.
- [9] J. C. Berg: 'Wettability', Surfactant Science Series Volume 49, Marcel Dekker, INC, New York, 1993.
- [10] KRÜSS, Seminar zur Tensiometrie, Kontaktwinkelmessung und Schaumanalytik – Methoden zur Bestimmung von Ober- und Grenzflächenspannungen von Flüssigkeiten und Festkörpern, ofi – Forschungsinstitut für Chemie und Technik, Wien, September 2011.
- [11] R. T. Thomas: 'Rough Surfaces', 1. Ausgabe, Imperial College Press, London, 1999.
- [12] Y. Zhao, G. C. Wang und T. M. Lu: 'Characterization of amorphous and crystalline rough surface: principles and applications', Academic Press, San Diego, 2001.
- [13] Olympus, Standard Silicon Cantilever Classic, http://probe.olympus-global.com/en/product/omcl_ac160ts_w2/, Februar 2012.

- [14] G. Pacher, Bakkalauresarbeit: Untersuchung der Abformgüte unterschiedlicher stochastischer Oberflächenstrukturen beim Spritzgießen von PP, PC, ABS und ABS/PC unter Variation der Prozessparameter Nachdruck und Einspritzdruck, Montanuniversität Leoben, April 2009.
- [15] M. Reitter, Diplomarbeit: Charakterisierung von hochglänzenden Werkzeu-oberflächen und den damit abgeformten Kunststoffformteilen, Montanuniversität Leoben, März 2006.
- [16] H. G. Elias: 'Industrielle Polymere und Synthese', Band 3, Wiley-VCH, 2001.
- [17] C. Teichert, A. Haas, G. M. Wallner, R. W. Lang, Nanometer scale characterization of polymer films by atomic-force microscopy, Macromolecular Symposia, 181: 457 – 466, 2002
- [18] Böhler Edelstahl, „Böhler M333 ISOPLAST“, http://www.boehler-edelstahl.com/files/M333DE_web.pdf, Februar 2012.
- [19] Böhler Edelstahl, „Böhler M303 EXTRA“, <http://www.boehler-international.com/M303DE.pdf>, Februar 2012.
- [20] Böhler Edelstahl, „Pulvermetallurgisch hergestellter nichtrostender Stahl“, http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/M_390.pdf, Jänner 2012.
- [21] Böhler Edelstahl, „Böhler M268 VMR“, http://www.boehler-edelstahl.com/english/files/M268DE_web.pdf, Jänner 2012.

7 Anhang

7.1 Stähle

7.1.1 Oberflächenenergien

Tabelle 1: Oberflächenenergie σ_s des Stahls M390PM.

σ_s (mN/m)	B11		B12		B13		B14		B15	
	parallel	senkrecht								
gesamt	36,38	36,32	35,33	31,93	31,36	32,57	33,65	32,52	33,62	32,69
Stabw.	0,47	0,29	0,41	0,53	0,43	0,45	0,28	0,17	0,17	0,42
dispersiv	35,78	36,05	35,22	31,82	30,71	31,82	32,92	31,36	32,66	31,98
Stabw.	0,38	0,22	0,37	0,48	0,38	0,37	0,23	0,12	0,08	0,37
polar	0,60	0,27	0,11	0,11	0,65	0,74	0,73	1,16	0,96	0,70
Stabw.	0,09	0,08	0,04	0,05	0,05	0,08	0,06	0,05	0,09	0,05
Polarität	1,65	0,74	0,31	0,34	2,07	2,27	2,17	3,57	2,86	2,14

Tabelle 2: Oberflächenenergie σ_s des Stahls M390PM.

σ_s (mN/m)	B21		B22		B23		B24		B25	
	parallel	senkrecht								
gesamt	35,33	36,4	32,92	32,97	34,32	33,81	35,12	35,52	38,5	39,07
Stabw.	0,42	0,38	0,42	0,12	0,17	0,15	0,27	0,35	0,2	0,25
dispersiv	34,41	36,38	32,35	32,51	33,41	32,58	33,9	32,95	36,4	36,55
Stabw.	0,34	0,36	0,36	0,07	0,13	0,1	0,2	0,28	0,14	0,18
polar	0,92	0,02	0,59	0,46	0,92	1,23	1,22	2,58	2,1	2,52
Stabw.	0,08	0,01	0,06	0,05	0,04	0,05	0,07	0,07	0,07	0,08
Polarität	2,60	0,05	1,79	1,40	2,68	3,64	3,47	7,26	5,45	6,45

Tabelle 3: Oberflächenenergie σ_s des Stahls M268.

σ_s (mN/m)	D11		D12		D13		D14		D15	
	parallel	senkrecht								
gesamt	35,78	36,19	32,73	34,08	36,36	36,20	32,51	33,54	32,79	33,25
Stabw.	0,73	0,31	0,44	0,40	0,65	0,58	0,32	0,34	0,56	0,60
dispersiv	35,53	36,15	32,53	33,58	35,91	35,46	32,23	33,01	31,53	31,80
Stabw.	0,65	0,29	0,38	0,30	0,46	0,44	0,28	0,28	0,48	0,48
polar	0,25	0,05	0,21	0,50	0,45	0,74	0,29	0,53	1,25	1,32
Stabw.	0,08	0,02	0,06	0,10	0,19	0,14	0,05	0,05	0,16	0,12
Polarität	0,70	0,14	0,64	1,47	1,24	2,04	0,89	1,58	3,81	3,97

Tabelle 4: Oberflächenenergie σ_s des Stahls M333.

σ_s (mN/m)	Nr. 11	Nr. 35	Nr. 27	Nr. 28	Nr. 33	Nr. 31	Nr. 25	Nr. 26	Nr. 36	Nr. 24
gesamt	33,61	33,98	36,65	37,31	38,56	38,77	34,25	33,75	31,96	29,71
Stabw.	0,23	0,28	0,07	0,12	0,42	0,3	0,37	0,39	0,26	0,24
dispersiv	32,9	33,37	34,77	36,4	35,995	37,24	34,14	33,53	31,61	29,31
Stabw.	0,19	0,25	0,04	0,09	0,29	0,21	0,34	0,35	0,23	0,21
polar	0,71	0,61	1,88	0,91	2,62	1,53	0,11	0,22	0,35	0,45
Stabw.	0,04	0,03	0,03	0,03	0,14	0,09	0,03	0,04	0,04	0,03
Polarität (%)	2,11	1,80	5,13	2,44	6,79	3,95	0,32	0,65	1,08	1,50

Tabelle 5: Oberflächenenergie σ_s des Stahls M333.

σ_s (mN/m)	E11	E31	E51	E71	AB8
gesamt	38,85	39,2	38,7	38,60	37,05
Stabw.	0,70	0,4	0,35	0,74	0,3
dispersiv	37,65	38,3	37,45	37,60	35,85
Stabw.	0,60	0,3	0,3	0,42	0,25
polar	1,20	0,9	1,25	1,00	1,2
Stabw.	0,10	0,1	0,05	0,32	0,05
Polarität (%)	3,09	2,30	3,23	2,59	3,24

7.1.2 Oberflächenrauigkeiten

Tabelle 6: Oberflächenrauigkeit des Stahls M390PM, gemessen mit WLM.

R_q (nm)	B11		B12		B13		B14		B15	
	parallel	senkrecht								
	358	362	190	220	182	176	49	66	34	36
	370	363	195	214	191	187	59	69	35	35
	364	353	192	216	181	186	62	66	42	35
	359	360	192	215	189	186	67	69	35	36
	366	342	194	215	185	195	71	67	40	35
	370	367	177	217	196	190	73	69	34	35
Mittelwert:	364,50	357,83	190,00	216,17	187,33	186,67	63,50	67,67	36,67	35,33
Stabw.	4,75	8,23	6,03	1,95	5,25	5,71	8,08	1,37	3,14	0,47

Tabelle 7: Oberflächenrauigkeit des Stahls M390PM, gemessen mit WLM.

R _q (nm)	B21		B22		B23		B24		B25	
	parallel	senkrecht								
	359	369	183	190	72	93	52	70	31	32
	359	370	188	188	73	91	49	96	31	32
	377	359	180	183	73	86	52	56	31	31
	350	362	177	186	73	89	48	78	30	32
	369	379	193	185	78	88	55	53	31	32
	363	376	194	187	79	93	53	55	31	32
Mittelwert:	362,83	369,17	185,83	186,50	74,67	90,00	51,50	68,00	30,83	31,83
Stabw.	8,49	7,06	6,36	2,22	2,75	2,58	2,36	15,42	0,37	0,37

Tabelle 8: Oberflächenrauigkeit des Stahls M268, gemessen mit WLM.

R _q (nm)	D11		D12		D13		D14		D15	
	parallel	senkrecht								
	409	433	138	189	184	197	37	42	25	29
	404	442	133	174	194	194	38	42	26	29
	412	427	165	176	190	198	37	43	28	29
	403	452	148	173	191	194	36	43	26	30
	419	426	139	177	199	199	39	41	27	30
	436	435	137	179	194	205	37	44	27	29
Mittelwert:	413,83	435,83	143,33	178,00	192,00	197,83	37,33	42,50	26,50	29,33
Stabw.	11,25	8,97	10,69	5,29	4,58	3,72	0,94	0,96	0,96	0,47

Tabelle 9: Oberflächenrauigkeit des Stahls M333, gemessen mit AFM.

R _q (nm)	E11	E31	E51	E71	AB08
	12,00	9,3	10,3	10	9,9
	11,90	8,9	11,5	12,5	9,1
	11,60	9,2	11,5	9,5	15,4
	11,80	9,2	10	9,9	9,3
	10,10	9,4	10,3	8,9	10,6
	11,80	9,1	9,5	10	10
Mittelwert:	11,53	9,18	10,52	10,13	10,72
Stabw.	0,65	0,16	0,74	1,13	2,15

7.1.3 Grenzflächenspannungen

Tabelle 10: Grenzflächenspannung γ_{sl} des Stahls M390PM mit unterschiedlichen Polymeren.

B11_B15-PP	γ_{sl} (mN/m)	Stabw.	B11_B15-ABS/PC	γ_{sl} (mN/m)	Stabw.
B11-PP	0,36	0,05	B11-ABS/PC	11,67	0,21
B12-PP	0,41	0,03	B12-ABS/PC	12,86	0,25
B13-PP	0,03	0,03	B13-ABS/PC	9,32	0,22
B14-PP	0,07	0,14	B14-ABS/PC	8,85	0,33
B15-PP	0,07	0,10	B15-ABS/PC	9,22	0,27
B11_B15-ABS	γ_{sl} (mN/m)	Stabw.	B11_B15-PC	γ_{sl} (mN/m)	Stabw.
B11-ABS	15,46	0,08	B11-PC	0,76	0,12
B12-ABS	16,80	0,16	B12-PC	0,71	0,14
B13-ABS	12,72	0,12	B13-PC	1,64	0,14
B14-ABS	12,19	0,12	B14-PC	1,74	0,06
B15-ABS	12,61	0,10	B15-PC	1,60	0,09

Tabelle 11: Grenzflächenspannung γ_{sl} des Stahls M390PM mit unterschiedlichen Polymeren.

B21_B25-PP	γ_{sl} (mN/m)	Stabw.	B21_B25-ABS/PC	γ_{sl} (mN/m)	Stabw.
B21-PP	0,30	0,05	B21-ABS/PC	11,35	0,25
B22-PP	0,08	0,11	B22-ABS/PC	10,22	0,50
B23-PP	0,12	0,21	B23-ABS/PC	8,78	0,69
B24-PP	0,38	0,09	B24-ABS/PC	7,37	0,18
B25-PP	0,80	0,14	B25-ABS/PC	7,77	0,37
B21_B25-ABS	γ_{sl} (mN/m)	Stabw.	B21_B25-PC	γ_{sl} (mN/m)	Stabw.
B21-ABS	15,10	0,13	B21-PC	0,84	0,11
B22-ABS	13,78	0,32	B22-PC	1,27	0,07
B23-ABS	12,11	0,44	B23-PC	1,74	0,05
B24-ABS	10,43	0,02	B24-PC	2,50	0,09
B25-ABS	10,87	0,17	B25-PC	2,58	0,07

Tabelle 12: Grenzflächenspannung γ_{sl} des Stahls M268 mit unterschiedlichen Polymeren.

D11_D15-PP	γ_{sl} (mN/m)	Stabw.	D11_D15-ABS/PC	γ_{sl} (mN/m)	Stabw.
D11-PP	0,53	0,02	D11-ABS/PC	13,23	0,21
D12-PP	0,17	0,04	D12-ABS/PC	11,13	0,17
D13-PP	0,30	0,02	D13-ABS/PC	10,98	0,05
D14-PP	0,12	0,07	D14-ABS/PC	10,75	0,25
D15-PP	0,18	0,03	D15-ABS/PC	8,01	0,03
D11_D15-ABS	γ_{sl} (mN/m)	Stabw.	D11_D15-PC	γ_{sl} (mN/m)	Stabw.
D11-ABS	17,25	0,16	D11-PC	0,48	0,17
D12-ABS	14,83	0,10	D12-PC	1,01	0,14
D13-ABS	14,67	0,06	D13-PC	0,94	0,27
D14-ABS	14,39	0,13	D14-PC	1,13	0,08
D15-ABS	11,18	0,04	D15-PC	2,23	0,22

Tabelle 13: Grenzflächenspannung γ_{sl} des Stahls M333 mit unterschiedlichen Polymeren.

Projekt 2302-PP	γ_{sl} (mN/m).	Stabw.	Projekt 2302-ABS_PC	γ_{sl} (mN/m).	Stabw.
Nr.11-PP	0,09	0,03	Nr.11-ABS_PC	9,73	0,35
Nr.35-PP	0,13	0,02	Nr.35-ABS_PC	10,20	0,35
Nr.27-PP	0,47	0,10	Nr.27-ABS_PC	7,82	0,59
Nr.28-PP	0,37	0,07	Nr.28-ABS_PC	10,26	0,49
Nr.33-PP	0,83	0,06	Nr.33-ABS_PC	7,19	0,15
Nr.31-PP	0,59	0,07	Nr.31-ABS_PC	9,21	0,25
Nr.25-PP	0,45	0,02	Nr.25-ABS_PC	13,05	0,31
Nr.26-PP	0,29	0,01	Nr.26-ABS_PC	12,02	0,29
Nr.36-PP	0,12	0,00	Nr.36-ABS_PC	10,77	0,34
Nr.24-PP	-0,01	0,01	Nr.24-ABS_PC	9,65	0,37
Projekt 2302-ABS	γ_{sl} (mN/m).	Stabw.	Projekt 2302-PC	γ_{sl} (mN/m).	Stabw.
Nr.11-ABS	13,22	0,15	Nr. 11-PC	1,39	0,05
Nr.35-ABS	13,76	0,17	Nr. 35-PC	1,23	0,05
Nr.27-ABS	10,96	0,26	Nr. 27-PC	2,32	0,05
Nr.28-ABS	13,84	0,21	Nr. 28-PC	1,19	0,03
Nr.33-ABS	10,18	0,04	Nr. 33-PC	2,88	0,17
Nr.31-ABS	12,58	0,08	Nr. 31-PC	1,74	0,10
Nr.25-ABS	17,02	0,17	Nr. 25-PC	0,63	0,09
Nr.26-ABS	15,85	0,17	Nr. 26-PC	0,81	0,10
Nr.36-ABS	14,39	0,16	Nr 36-PC	1,23	0,05
Nr.24-ABS	13,08	0,17	Nr. 24-PC	1,72	0,04

Tabelle 14: Grenzflächenspannung γ_{sl} des Stahls M333 mit unterschiedlichen Polymeren.

Stahl-PP	γ_{sl} (mN/m).	Stabw.	Stahl-ABS_PC	γ_{sl} (mN/m).	Stabw.
E11-PP	0,57	0,62	E11-ABS_PC	10,00	0,19
E31-PP	0,41	0,65	E31-ABS_PC	10,12	0,19
E51-PP	0,59	0,53	E51-ABS_PC	10,08	0,27
E71-PP	0,51	0,27	E71-ABS_PC	10,44	0,34
AB8-PP	0,20	0,49	AB8-ABS_PC	8,36	0,30
Stahl-ABS_PC	γ_{sl} (mN/m).	Stabw.	Stahl-PC	γ_{sl} (mN/m).	Stabw.
E11-ABS_PC	10,00	0,19	E11-PC	0,18	0,04
E31-ABS_PC	10,12	0,19	E31-PC	0,21	0,04
E51-ABS_PC	10,08	0,27	E51-PC	0,20	0,05
E71-ABS_PC	10,44	0,34	E71-PC	0,18	0,00
AB8-ABS_PC	8,36	0,30	AB8-PC	0,36	0,03

7.2 Beschichtungen

7.2.1 Oberflächenenergien

Tabelle 15: Beschichtungen vor der Politur.

σ_s (mN/m)	AB08	AB11	AB12	AB13	AB14	AB15	AB16	AB17	AB21	AB31	AB41	AB42
gesamt	34,49	33,55	35,00	35,15	42,45	38,19	38,00	38,59	41,38	37,92	43,55	42,03
Stabw.	0,30	0,15	0,31	0,07	0,32	0,23	0,45	0,31	0,63	0,32	0,30	0,36
dispersiv	34,30	33,00	34,15	34,29	38,36	35,48	34,86	35,81	35,43	34,74	34,74	36,65
Stabw.	0,27	0,13	0,26	0,05	0,22	0,16	0,27	0,22	0,34	0,18	0,18	0,21
polar	0,19	0,55	0,85	0,86	4,08	2,70	3,14	2,78	5,96	3,18	8,82	5,38
Stabw.	0,03	0,02	0,05	0,02	0,10	0,07	0,19	0,10	0,28	0,14	0,12	0,14
Polarität (%)	0,55	1,64	2,43	2,45	9,61	7,07	8,26	7,20	14,40	8,39	20,25	12,80

Tabelle 16: Beschichtungen nach der Politur.

σ_s (mN/m)	AB08	AB11	AB12	AB13	AB14	AB15	AB16	AB17	AB21	AB31	AB41	AB42
gesamt	34,75	32,71	33,54	31,97	42,45	32,38	32,12	32,33	38,87	37,92	43,55	42,03
Stabw.	0,19	0,19	0,35	0,19	0,32	0,26	0,15	0,26	0,54	0,32	0,30	0,36
dispersiv	33,98	32,41	32,91	31,48	38,36	32,10	32,00	32,06	34,87	34,74	34,74	36,65
Stabw.	0,14	0,15	0,31	0,16	0,22	0,22	0,14	0,22	0,38	0,18	0,18	0,21
polar	0,77	0,30	0,63	0,49	4,08	0,28	0,12	0,27	4,00	3,18	8,82	5,38
Stabw.	0,05	0,03	0,04	0,03	0,10	0,04	0,01	0,04	0,16	0,14	0,12	0,14
Polarität (%)	2,22	0,92	1,88	1,53	9,61	0,86	0,37	0,84	10,29	8,39	20,25	12,80

7.2.2 Oberflächenrauigkeiten

Tabelle 17: Beschichtungen vor der Politur, gemessen mit AFM.

Rq (nm)	AB08	AB11	AB12	AB13	AB14	AB15	AB16	AB17	AB21	AB31	AB41	AB42
	389,00	100,00	93,00	144,00	18,30	130,00	151,00	135,00	530,00	28,90	15,00	109,00
	459,00	110,00	87,00	161,00	18,00	146,00	183,00	140,00	304,00	27,20	12,70	123,00
	354,00	94,00	107,00	126,00	21,40	180,00	199,00	154,00	610,00	28,80	14,90	125,00
	533,00	106,00	117,00	160,00	18,20	163,00	209,00	136,00	435,00	27,10	15,10	123,00
	441,00	114,00	120,00	168,00	19,80	151,00	193,00	131,00	379,00	30,70	16,20	98,00
Mittelwert:	435,20	104,80	104,80	151,80	19,14	154,00	187,00	139,20	451,60	28,54	14,78	115,60
Stabw.	61,47	7,11	12,97	15,10	1,30	16,77	19,88	7,93	108,23	1,32	1,14	10,50

Tabelle 18: Beschichtungen nach der Politur, gemessen mit WLM.

Rq (nm)	AB08	AB11	AB12	AB13	AB14	AB15	AB16	AB17	AB21	AB31	AB41	AB42
	284	123	93,00	96,00	100	131	117	130	370	28,90	15,00	109,00
	286	112	87,00	73	101	115	105	120	355	27,20	12,70	123,00
	286	72	107,00	158	90	117	70	100	345	28,80	14,90	125,00
	299	83	117,00	109	92	143	74	97	333	27,10	15,10	123,00
	301	89	120,00	90	95	130	111	102	328	30,70	16,20	98,00
Mittelwert:	291,20	95,80	104,80	105,20	95,60	127,20	95,40	109,80	346,20	28,54	14,78	115,60
Stabw.	7,25	18,86	12,97	28,83	4,32	10,24	19,52	12,91	15,17	1,32	1,14	10,50

7.2.3 Grenzflächenspannungen

Tabelle 19: Grenzflächenspannung γ_{sl} der unpolierten Beschichtungen mit unterschiedlichen Polymeren.

<i>Beschichtung-PP</i>	γ_{sl} (mN/m)	Stabw.	<i>Beschichtung-ABS_PC</i>	γ_{sl} (mN/m)	Stabw.
CrN-PP	1,92	0,10	CrN-ABS_PC	6,73	0,23
TiN-PP	1,05	0,14	TiN-ABS_PC	6,26	0,22
DLC_cl-PP	4,63	0,13	DLC_cl-ABS_PC	3,68	0,24
ta_DLC-PP	2,50	0,12	ta-DLC-ABS_PC	5,37	0,21
AL ₂ O ₃ -PP	0,37	0,09	AL ₂ O ₃ -ABS_PC	12,45	0,34
Cr ₂ O ₃ -PP	0,11	0,21	Cr ₂ O ₃ -ABS_PC	10,30	0,47
v_CrON-PP	0,17	0,08	v_CrON-ABS_PC	9,70	0,29
w_CrON-PP	0,18	0,34	w_CrON-ABS_PC	9,72	0,60
w_CrCN-PP	0,89	0,15	w_CrCN-ABS_PC	6,99	0,32
v_CrCN-PP	1,04	0,08	v_CrCN-ABS_PC	6,33	0,12
CrC-PP	0,95	0,09	CrC-ABS_PC	7,00	0,22
NbN-PP	2,74	0,10	NbN-ABS_PC	4,69	0,08
<i>Beschichtung-ABS</i>	γ_{sl} (mN/m)	Stabw.	<i>Beschichtung-PC</i>	γ_{sl} (mN/m)	Stabw.
CrN-ABS	9,51	0,07	CrN-PC	4,23	0,12
TiN-ABS	9,05	0,05	TiN-PC	3,63	0,15
DLC_cl-ABS	5,48	0,06	DLC_cl-PC	9,26	0,13
ta-DLC-ABS	7,81	0,06	ta-DLC-PC	5,64	0,16
Al ₂ O ₃ -ABS	16,35	0,17	Al ₂ O ₃ -PC	0,69	0,06
Cr ₂ O ₃ -ABS	13,88	0,21	Cr ₂ O ₃ -PC	1,22	0,02
v_CrON-ABS	13,19	0,13	v_CrON-PC	1,36	0,08
w_CrON-ABS	13,21	0,27	w_CrON-PC	1,36	0,04
w_CrCN-ABS	9,94	0,11	w_CrCN-PC	3,08	0,07
v_CrCN-ABS	9,14	0,01	v_CrCN-PC	3,57	0,21
CrC-ABS	9,95	0,06	CrC-PC	3,11	0,11
NbN-ABS	6,97	0,02	NbN-PC	6,32	0,35

Tabelle 20: Grenzflächenspannung γ_{sl} der polierten Beschichtungen mit unterschiedlichen Polymeren.

Beschichtung-PP	γ_{sl} (mN/m)	Stabw.	Beschichtung-ABS/PC	γ_{sl} (mN/m)	Stabw.
Cr ₂ O ₃ -PP	0,17	0,19	Cr ₂ O ₃ -ABS/PC	13,21	0,05
v_CrON-PP	0,10	0,06	v_CrON-ABS/PC	11,99	0,08
w_CrON-PP	0,06	0,17	w_CrON-ABS/PC	12,08	0,03
CrN-PP	1,92	0,10	CrN-ABS/PC	8,72	0,16
w_CrCN-PP	0,17	0,11	w_CrCN-ABS/PC	13,23	0,04
v_CrCN-PP	0,32	0,21	v_CrCN-ABS/PC	14,31	0,14
CrC-PP	0,17	0,11	CrC-ABS/PC	13,27	0,04
TiN-PP	1,05	0,14	TiN-ABS/PC	8,25	0,18
DLC_cl-PP	4,63	0,13	DLC_cl-ABS/PC	5,67	0,15
ta_DLC-PP	2,50	0,12	ta_DLC-ABS/PC	7,36	0,19
Al ₂ O ₃ -PP	0,16	0,18	Al ₂ O ₃ -ABS/PC	11,87	0,00
NbN-PP	1,51	0,04	NbN-ABS/PC	7,61	0,28
Beschichtung-ABS	γ_{sl} (mN/m)	Stabw.	Beschichtung-PC	γ_{sl} (mN/m)	Stabw.
Cr ₂ O ₃ -ABS	16,23	0,31	Cr ₂ O ₃ -PC	1,05	0,63
v_CrON-ABS	14,82	0,27	v_CrON-PC	1,31	0,67
w_CrON-ABS	14,92	0,30	w_CrON-PC	1,39	0,62
CrN-ABS	10,81	0,19	CrN-PC	4,23	0,71
w_CrCN-ABS	16,24	0,27	w_CrCN-PC	1,08	0,65
v_CrCN-ABS	17,47	0,37	v_CrCN-PC	0,94	0,60
CrC-ABS	16,29	0,27	CrC-PC	1,08	0,65
TiN-ABS	10,35	0,17	TiN-PC	3,63	0,74
DLC_cl-ABS	6,78	0,18	DLC_cl-PC	9,26	0,72
ta_DLC-ABS	9,11	0,18	ta_DLC-PC	5,64	0,75
Al ₂ O ₃ -ABS	14,69	0,27	Al ₂ O ₃ -PC	1,31	0,64
NbN-ABS	9,54	0,17	NbN-PC	4,43	0,82

7.3 Polymere

7.3.1 Oberflächenenergien

Tabelle 21: Oberflächenenergie σ_s des Polymers SCEW 96.

σ_s (mN/m)	Bereich 4	Bereich 3	Bereich 2	Bereich 1	Bereich 5
gesamt	31,44	30,26	29,55	30,65	30,99
Stabw.	0,64	0,71	0,55	0,38	0,48
dispersiv	29,41	29,51	27,47	29,60	30,40
Stabw.	0,51	0,62	0,43	0,33	0,44
polar	2,03	0,75	2,08	1,05	0,60
Stabw.	0,13	0,09	0,12	0,06	0,05

Tabelle 22: Oberflächenenergie σ_s des Polymers SCEW 97.

σ_s (mN/m)	Bereich 4	Bereich 3	Bereich 2	Bereich 1	Bereich 5
gesamt	30,66	33,29	32,98	32,14	34,34
Stabw.	0,37	0,31	0,32	0,46	0,30
dispersiv	30,02	32,93	32,43	31,71	34,01
Stabw.	0,32	0,28	0,29	0,43	0,27
polar	0,63	0,35	0,55	0,43	0,33
Stabw.	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03

Tabelle 23: Oberflächenenergie σ_s des Polymers SCEW 106.

σ_s (mN/m)	Bereich 4	Bereich 3	Bereich 2	Bereich 1	Bereich 5
gesamt	28,85	28,27	28,06	28,09	27,51
Stabw.	0,79	1,06	1,32	1,30	0,81
dispersiv	16,30	16,30	17,50	18,34	19,34
Stabw.	0,41	0,57	0,73	0,79	0,47
polar	12,55	11,97	10,65	9,75	8,17
Stabw.	0,38	0,48	0,59	0,51	0,34

Tabelle 24: Oberflächenenergie σ_s des Polymers SCEW 107.

σ_s (mN/m)	Bereich 4	Bereich 3	Bereich 2	Bereich 1	Bereich 5
gesamt	28,14	28,42	28,61	28,51	28,44
Stabw.	1,62	0,29	0,65	0,70	0,91
dispersiv	18,53	17,28	18,13	16,63	17,62
Stabw.	1,00	0,18	0,41	0,36	0,50
polar	9,61	11,14	10,48	11,88	10,81
Stabw.	0,62	0,11	0,23	0,34	0,41

Tabelle 25: Oberflächenenergie σ_s des Polymers SCEW 108.

σ_s (mN/m)	Bereich 4	Bereich 3	Bereich 2	Bereich 1	Bereich 5
gesamt	26,69	26,76	26,94	27,32	27,50
Stabw.	0,35	0,45	0,22	0,46	0,56
dispersiv	17,50	16,67	19,33	20,14	18,52
Stabw.	0,19	0,23	0,14	0,30	0,38
polar	9,19	10,09	7,62	7,17	8,98
Stabw.	0,17	0,22	0,07	0,15	0,18

Tabelle 26: Oberflächenenergie σ_s des Polymers SCEW 122.

σ_s (mN/m)	Bereich 4	Bereich 3	Bereich 2	Bereich 1	Bereich 5
gesamt	29,00	28,96	27,82	27,22	28,31
Stabw.	0,86	0,59	0,59	1,04	0,66
dispersiv	15,54	13,93	13,63	10,98	14,13
Stabw.	0,49	0,25	0,28	0,47	0,33
polar	13,46	15,04	14,19	16,23	14,18
Stabw.	0,37	0,34	0,29	0,57	0,33

Tabelle 27: Oberflächenenergie σ_s des Polymers SCEW 123.

σ_s (mN/m)	Bereich 4	Bereich 3	Bereich 2	Bereich 1	Bereich 5
gesamt	26,12	24,07	23,18	24,32	25,11
Stabw.	0,78	0,94	0,38	0,67	1,55
dispersiv	13,44	13,31	16,18	16,18	18,45
Stabw.	0,42	0,56	0,43	0,43	1,07
polar	12,68	10,76	8,49	8,14	6,66
Stabw.	0,36	0,37	0,15	0,24	0,48