

Michael Bumberger BSc.

**Untersuchung zur Optimierung der
ästhetischen Eigenschaften von organischen Beschichtungen für
die Hausgeräteindustrie**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Technische Chemie

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Franz Stelzer

Institutsname

Institute for Chemistry and Technology of Materials

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

voestalpine

EINEN SCHRITT VORAUSS.

Danksagung

Herzlichen Dank möchte ich folgenden Personen aussprechen:

- **Herrn Dipl.-Ing. Rainer Dirschl** für die exzellente Betreuung, für die guten Inputs, die Geduld und für die angenehme Zusammenarbeit.
- **Herrn Dipl.-Ing. Dr. Bernhard Strauß** für die interessante Themenstellung und ebenfalls für eine hervorragende Betreuung.
- **Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Franz Stelzer** für seine Unterstützung, das von ihm aufgebrachte Interesse für meine Diplomarbeit.

Ein besonderer Dank gilt meinen Bürokollegen/innen, die mich immer mit nützlichen Ratschlägen unterstützt haben – **Dipl. -Ing Alexandra Eder, Dipl. -Ing Dr. Roman Tiefenthaler, Dipl. –Ing Dieter Ehrenstorfer**

Weiters möchte ich mich bei folgenden Personen bedanken:

- **Johann Gusenbauer** für die handwerkliche Unterstützung
- **Gerhard Mayerhofer** für seine kreativen Inputs
- **Hanna Nopp** für die Arbeit mit Quantiz[®] und für viele gute Ratschläge
- **Ing. Franz Hanetseder** für fachliches Know-how und seine aufmunternden Worte
- **Ing. Michael Pock**, der bei Fragen immer ein offenes Ohr hatte.
- **Dipl. -Ing Stefan Ziebermayer** für seine aufmunternde Art
- **Dipl. –Ing Markus Imlinger** für die Einschulung am Konfokalmikroskop
- **Dipl. –Ing Manuel Winter** für die Einschulung am Programm MountainsMap[®]

Ebenso möchte ich mich bei allen Mitarbeitern/innen der Abteilung Organische Beschichtung bedanken.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern und meinen Großeltern, die mich nicht nur finanziell unterstützt haben, sondern auch immer an mich geglaubt haben. Danke – ohne euch wäre das Chemie Studium nicht möglich gewesen.

Kurzfassung

Die voestalpine beliefert die Hausgeräteindustrie mit organisch vorbeschichtetem Stahlband seit nun mehr als 20 Jahren. Die Produktpalette umfasst sowohl Standard als auch Metallicfarben kombiniert mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen. Antifingerprint - Eigenschaften und der Widerstand gegen mechanische Beanspruchung (Kratzfestigkeit) sind für Kunden der voestalpine von besonderer Bedeutung, da das Erscheinungsbild der Beschichtung über Jahre hinweg gewahrt werden soll. Bis jetzt war es nicht möglich diese Eigenschaften mit einer geeigneten Methode zu quantifizieren.

Die Charakterisierung der Kratzfestigkeit erfolgte mit einem neuem Gerät der Type ABREX[®]-CE in Kombination mit konfokaler Mikroskopie. Diese Vorgehensweise liefert detaillierte Informationen über die Veränderung der Oberfläche, bedingt durch mechanische Einwirkung. Mithilfe von Topographie - Diagrammen und der ermittelten Kratztiefe können nun unterschiedliche Beschichtungen in Bezug auf Kratzfestigkeit miteinander verglichen werden. Weiters kann mit dieser Methode der Einfluss von Feuchtigkeit auf Kratzfestigkeit evaluiert werden.

Die Arbeit bei den Antifingerprint - Eigenschaften fokussierte sich auf verschiedene Applikationsmethoden von künstlichen Fingerabdrücken, der Visualisierung und deren Evaluierung auf verschiedenen Lackoberflächen. Im Zuge der Methodenentwicklung wurden verschiedene Prüfmedien und Applikationssysteme getestet. Mit Hilfe von Vaseline und einem speziellen Silikonstempel können künstliche Fingerabdrücke auf Oberflächen aufgebracht werden, welche ähnliche Charakteristika wie menschliche Fingerabdrücke aufweisen. Die Intensität und die Homogenität der Abdrücke wurden mit neu entwickelten Quantiz[®] - Origin[®] Methode überprüft. Kombiniert man die künstlichen Fingerabdrücke mit einem Antifingerprint Test, so ist es möglich verschiedene Lackoberflächen in Bezug auf Antifingerprint - Eigenschaften zu testen.

Abstract

The aim of this work is to investigate the aesthetic performance of pre-coated steel sheets, which are used in the appliance industry. Scratch resistance and anti-fingerprint properties of coatings are one of the most important criteria for many customers. Until now there was no method available, allowing a quantification method for these properties at voestalpine AG.

The quantification of scratch resistance was done with a new device of type ABREX[®]-CE in combination with confocal microscopy. This method provides detailed information from a single scratch. The topography images and the penetration depth of the scratches allow the comparison of different coatings in relation to scratch resistance. Furthermore the influence of humidity on scratch resistance was investigated with this new method.

The work on fingerprint resistance has focused on different application methods of artificial fingerprints and the evaluation of them, applied on various coatings.

Several test liquids and application systems were examined to apply artificial fingerprints. With the help of petroleum jelly and a silicone stamp it was feasible to bring up artificial fingerprints which have the same characteristics as natural fingerprints.

The artificial fingerprints were checked for homogeneity and intensity with a new method involving the device Quantiz[®] and the software Origin[®].

Using the artificial fingerprints in combination with an anti-fingerprint test, it was possible to characterize different coatings with respect to their anti-fingerprint properties.

1	Einleitung und Aufgabenstellung	1
2	Theoretischer Teil	2
2.1	Coil Coating	2
2.2	Bestandteile von organischen Beschichtungen	7
2.3	Beschichtungsstoffe für den Coil Coating - Prozess	9
3	Stand der Technik	11
3.1	Kratzfestigkeit	11
3.1.1	Untersuchungsmethoden	13
3.1.1.1	Vielfachkratztests	13
3.1.1.2	Einzelkratztests	15
3.2	Antifingerprint	18
4	Methoden	19
4.1	Methodenübersicht	19
4.2	Abriebprüfgerät ABREX [®] -CE	19
4.2.1	Einstellungen	20
4.2.2	Handabriebprüfung	21
4.2.3	Fingernagelkratztest	22
4.2.4	Fingerabdrucktest	23
4.3	Thermomechanische Analyse - TMA	24
4.3.1	Temperaturabhängigkeit des Polymerverhaltens	24
4.3.2	Messprinzip TMA	26
4.3.3	TMA Q400EM	27
4.4	Mikroeindringhärte	29
4.4.1	Eindringtiefen Messverfahren	29
4.4.2	Martenshärte	30
4.4.3	Relevante Kenngrößen	31
4.4.4	Schematische Darstellung des Messzyklusses	32

4.4.5	Fischerscope H100-C	33
4.5	T – Bend.....	33
4.5.1	T-Bend Test	34
4.5.2	Randfaserdehnung	35
4.5.3	Abbildung des Biegeversuchs bis zur 2-T Biegung.....	37
4.6	Kratzfestigkeit.....	38
4.7	Konfokalmikroskopie	39
4.7.1	Messprinzip.....	39
4.7.2	Konfokalkurve	40
4.7.3	Konfokaler Bildstapel	40
4.7.4	Quantitative Analyse mit MountainsMap [®] von DigitalSurf.....	41
4.7.5	NanoFocus μ surf mobile	43
5	Experimenteller Teil und Diskussion	44
5.1	Widerstand gegen mechanische Beschädigungen (Kratzfestigkeit)	44
5.1.1	Proben	44
5.1.2	Probencharakterisierung durch ausgewählte Schnelltests.....	44
5.1.3	Methodenentwicklung ABREX [®] -CE	49
5.1.4	Kratzfestigkeitsprüfung mit ABREX [®] -CE.....	58
5.1.4.1	Einzelkratztests – visuelle Beurteilung	58
5.1.4.2	Einzelkratztests – Eindringtiefe	60
5.1.4.3	Einzelkratztests – glatte / strukturierte Oberflächen	62
5.1.5	Kratzfestigkeit bei variablen Feuchtebedingungen.....	65
5.1.5.1	Einzelkratztests nach Wasserlagerung.....	65
5.2	Antifingerprinteigenschaften	69
5.2.1	Methodenentwicklung Fingerabdruck	69
5.2.1.1	Fingerabdruckapplikation mittels ABREX.....	70
5.2.1.2	Fingerabdruckapplikationsgerät	71

5.2.1.3	Methode 1: Silikonstempel / Kunstschweiß	74
5.2.1.4	Methode 2: Stempel mit Stabilit [®] Auflage / Rapsöl.....	76
5.2.1.5	Methode 3 Stempel mit Stabilit [®] Auflage / Vaseline	78
5.2.1.6	Methode 4 - Silikonstempel Vaseline.....	81
5.2.1.7	Methodenvergleich	82
5.2.2	Visualisierung von Fingerabdrücken	84
5.2.2.1	Visualisierung mittels Digitalkamera unter definierten Beleuchtungswinkeln	84
5.2.2.2	Visualisierung mittels Helfeldbeleuchtung	84
5.2.3	Bewertung der Fingerabdrücke.....	87
5.2.3.1	Methodenentwicklung „Quantiz [®] – Origin [®] “	87
5.2.3.2	Auswertung der Abdrücke von Methode 3.....	88
5.2.3.3	Auswertung der Abdrücke von Methode 4.....	91
5.2.4	Vergleich Methode 3 vs. Methode 4.....	91
5.2.5	Erkennbarkeit in Abhängigkeit von Farbe, Glanzgrad und Oberflächenstruktur	93
5.2.5.1	AFP-Test Methodenentwicklung.....	93
5.2.5.2	Probenherstellung	94
5.2.5.3	Beurteilung	98
5.2.5.4	Auswertung	99
5.2.6	Reinigungsprozedere für einen „Standardfingerabdruck“	101
6	Anregung für zukünftige Arbeiten	106
7	Zusammenfassung	108
7.1	Kratzfestigkeit.....	108
7.2	Antifingerprint	109
8	Literaturverzeichnis	111
9	Anhang	115
10	Abbildungsverzeichnis	126

11 Tabellenverzeichnis..... 129

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Im Coil-Coating-Verfahren (= Bandlackierung) beschichtete Stahlbänder werden bei voestalpine bereits endlackiert und anschließend beim Kunden im beschichteten Zustand umgeformt und fertig verarbeitet. Ein bedeutender Anwender für vorlackiertes Stahlband ist die Hausgeräteindustrie, wo unter dem Begriff „Weiße Ware“ Gehäuse für Kühlschränke, Waschmaschinen etc. aus Coil-Coating-Material zum Einsatz kommen.

Das Anforderungsprofil für Weiße Ware – Oberflächen verlangt einerseits flexibles Verhalten (bei der Verarbeitung), andererseits aber auch eine hohe Robustheit im Gebrauch (v.a. Oberflächenhärte, Kratzfestigkeit, Flecken- und Chemikalienbeständigkeit sowie sogenannte „Anti-Fingerprint-Eigenschaften“). Erreicht wird dieser Eigenschaftsmix durch Einbrennlacke auf Polyesterpolyol-Basis sowie mit Melamin- oder Isocyanat-basierenden Vernetzern. Die resultierenden Beschichtungen weisen einen Glasübergangsbereich auf, der im Bereich der Umgebungstemperatur liegt und so ausreichende Flexibilität mit guter Zähigkeit verbindet.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Ansätze zur quantitativen Beschreibung der Kratz- und Scheuer-beständigkeit mit einem neuem Normprüfgerät der Type ABREX-CE[®] erarbeitet werden. Weiters sollen auch die wichtigsten Anti-Fingerprint-Einflussgrößen untersucht werden. Um dies zu realisieren soll eine Methode entwickelt werden, mit der man reproduzierbare künstliche Fingerabdrücke auf Lackoberflächen aufbringen kann. Diese sollen in weiterer Folge quantifiziert und auf Homogenität geprüft werden. Mit Hilfe der künstlichen Fingerabdrücke sollen verschiedenen Lackoberflächen in Bezug auf Anti-Fingerprint Eigenschaften und Reinigungseigenschaften getestet werden.

2 Theoretischer Teil

2.1 Coil Coating

„Coil Coating (Bandbeschichtung) ist der weltweit etablierte Begriff für das industrielle Verfahren, gewalzte Bänder aus Stahl und Aluminium kontinuierlich organisch zu beschichten.“

Bei diesem Verfahren werden Stahlbandrollen mit Lacken oder Kunststofffilmen beschichtet, wieder aufgewickelt und anschließend beim Verarbeiten, entsprechend ihrer Anwendung geschnitten, profiliert, umgeformt, tiefgezogen, gefügt oder geklebt. Abb.1 verdeutlicht die Vorteile des Coil Coating Prozesses.

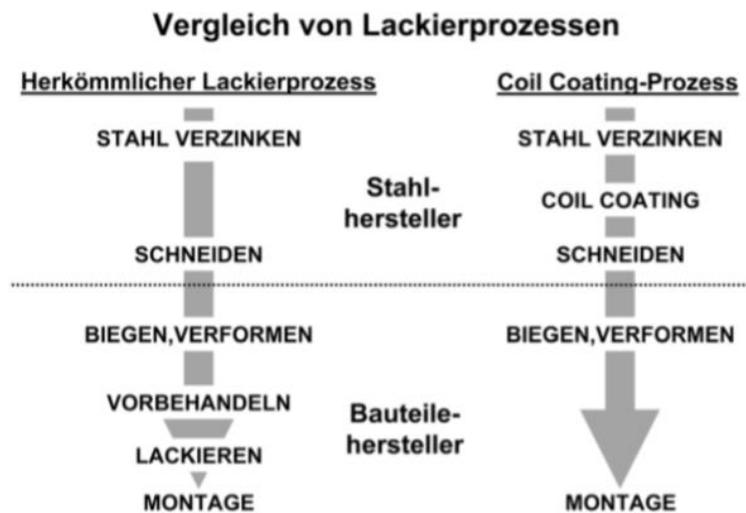


Abbildung 1: Vergleich von Lackierprozessen [1]

Für den Bauteilhersteller ergibt sich eine hohe Kostenersparnis in der Produktfertigung, da die Stückbeschichtung und die damit verbundenen Probleme, wie die Vorbehandlung, die Abwasser- und Abluftreinigung, die Entsorgung der Reststoffe und die Investitions- und Instandhaltungskosten für die Lackieranlage und Trocknung entfallen. Ein weiterer Vorteil gegenüber alternativen Verfahren ist der Walzauftrag, der eine gleichmäßige Beschichtung über Bandbreite und Bandlänge ermöglicht. Als Haupteinsatzgebiete für Coil Coating Produkte kann die Fahrzeugindustrie, die Hausgeräteindustrie sowie die Bauindustrie genannt werden. In diesem Kapitel soll nun der Coil Coating Prozess und der Schichtaufbau von Coil Coating Systemen näher erläutert werden. Als Literaturgrundlage dient [1].

In der folgenden Abbildung ist eine mögliche Anordnung einer Coil Coating Anlage zu sehen.

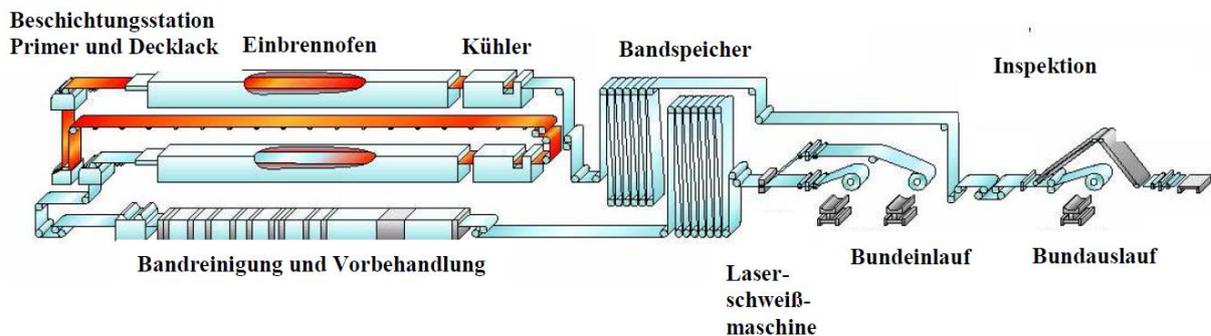


Abbildung 2: Bandbeschichtungsanlage [2]

Eingangsstation

Das Einbringen und Verschweißen eines neuen Coils und das Abtrennen und Abnehmen eines lackierten Coils sind diskontinuierliche Prozesse. Aus diesem Grund befinden sich am Einlauf und am Auslauf jeweils Bandspeicher, die der Anlage einen Puffer bieten, um die kontinuierliche Verfahrensweise aufrecht zu erhalten.

Reinigung

Um das Stahlband von Metallspänen, Öl, Schmutz und Oxidschichten zu befreien, ist eine Vorreinigung notwendig. Mit Hilfe einer alkalischen Reinigungslösung wird die Oberfläche leicht angeätzt, wobei Oberflächenoxide abgelöst werden. Durch Alkalihydroxide werden Schmutz, Metallspäne und Ablagerungen entfernt. Zusätzlich reagieren diese mit Fetten und Ölen zu wasserlöslichen Seifen. Beigemischte Phosphate senken die Wasserhärte und sorgen für eine gute Benetzbarkeit. Zudem werden Schmutzpartikel suspendiert, damit sich diese nicht wieder auf der Oberfläche absetzen können. Der Reinigungsprozess erfolgt durch Bürsten und Spülen.

Vorbehandlung

Im Zuge der Vorbehandlung wird eine amorphe Schicht anorganischen Materials mit Schichtdicken von wenigen nm, auf der Metalloberfläche aufgetragen. Die Vorbehandlung dient dazu, die reaktive metallische Oberfläche vor Korrosion zu schützen. Zudem soll sie die Haftung für die nachfolgenden organischen Schichten sicherstellen, sowie die Umformeigenschaften und die Beständigkeit der Lackschicht verbessern. Die voestalpine verwendet eine Vorbehandlungslösung der Firma Henkel, mit der Produktbezeichnung GR 1455. Die Applikation der Vorbehandlungslösung geschieht durch Tauchen, Spritzen oder mit einer Beschichtungswalze in einem Roll-Coater (Chemcoater). Im Anschluss an die Vorbehandlung erfolgt ein Trocknungsschritt, bei dem sich sofort eine transparente dünne Schicht bildet.

Lackieren, Trocknen und Härtung

Das Aufbringen flüssiger Beschichtungsstoffe erfolgt beim Coil Coating Prozess mit rotierenden Walzen durch so genannte Coater. Die Walzapplikation ermöglicht eine Verteilung des Lacks mit Abweichungen von +/- 1µm über die gesamte Fläche. Die Lackverluste sind bei dieser Art der Applikation nur sehr gering.

Am Ende des Prozesses steht das Trocknen und Aushärten der Lackschicht. Unter Trocknen versteht man in diesem Zusammenhang das Austreiben von Lösungsmittel, um eine physikalische Filmbildung zu ermöglichen. Beim anschließenden Härten der Vernetzung wird durch die chemische Reaktion zweier oder mehrerer Komponenten auf dem Substrat ein festhaftender zusammenhängender Lackfilm gebildet. Die Vernetzung geschieht durch Polyaddition oder Polykondensation bei erhöhten Temperaturen. Dieser Schritt wird als thermische Härtung oder Einbrennen bezeichnet. Folgende Trocknungsmethoden können beim Bandbeschichtungsprozess eingesetzt werden:

- Strahlungstrocknung (Konvektionstrocknung)
- Strahlungstrocknung (Infrarottrocknung)
- Strahlungshärtung (UV-Strahlen)
- Trocknung mittels elektrischen Verfahren

In der Bandbeschichtungsanlage der voestalpine kommt die Konvektionstrocknung zum Einsatz. Das Metallband durchläuft dabei einen ca. 40 m langen Durchhangofen. Der Ofen teilt sich in mehrere Heizzonen mit bestimmten Temperaturen. Das zu Beginn verdampfte Lösungsmittel wird einer Nachverbrennung zugeführt. Die dabei entstehende Wärme wird anschließend dazu genutzt, um frische Luft für die Beheizung der Einbrennöfen zu erwärmen.

In den letzten Heizzonen wird das Band auf die sogenannte PMT (peak metal temperature) erhitzt. Das ist jene Temperatur, die zum Aushärten des Lackes notwendig ist. Die notwendige PMT ist vom Lack abhängig und liegt typischerweise im Bereich von 230 bis 250 °C.

Folienkaschierung

Nach dem Einbrennprozess wird das Band innerhalb weniger Sekunden abgekühlt und durchläuft den Bandspeicher, eine visuelle Inspektion und wird letztendlich zu einem Coil aufgewickelt. Alternativ sind direkt nach dem Ofen Folienkaschierstationen an vielen Bandbeschichtungsanlagen integriert. Diese Folien sollen das organisch beschichtete Stahlband vor Beschädigungen und Verschmutzungen während des Transports, der Lagerung und bei Umformprozessen schützen. Am häufigsten wird hierbei die Heißkaschierung angewandt, bei der eine Polyolefinfolie ohne Klebstoff direkt nach dem Einbrennofen auf das noch heiße Band bei Temperaturen zwischen 200 und 240 °C auflaminiert wird.

Aufbau Lackschichten

Bei einem Anlagendurchlauf können auf jeder Seite des Stahlsubstrates zwei Lackschichten aufgetragen werden. Als Substrate werden kaltgewalzte, feuerverzinkte oder elektrolytisch verzinkte Stahlbänder eingesetzt. Die Wahl des Beschichtungsaufbaus wird an die Gegebenheiten der Weiterverarbeitung und an die Verwendung angepasst. In den folgenden Abbildungen sind beispielhaft zwei mögliche Schichtaufbauten dargestellt.

- **Einschichtaufbau**



Abbildung 3: Einschichtaufbau [3]

- **Zweischichtaufbau mit Schutzfolie**

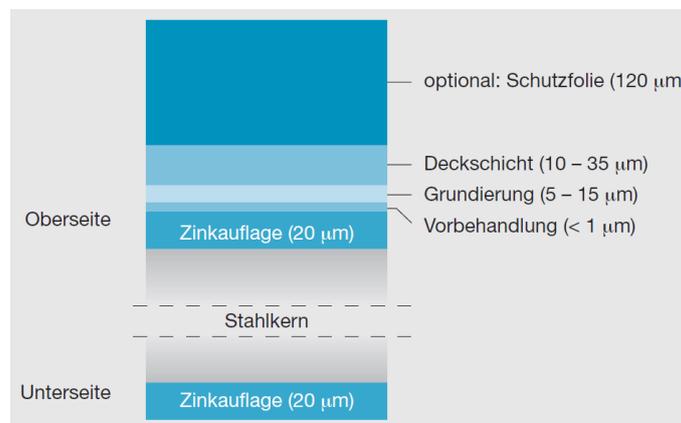


Abbildung 4: Zweischichtaufbau mit Schutzfolie [3]

2.2 Bestandteile von organischen Beschichtungen

Beschichtungsstoffe bestehen im Allgemeinen aus Kunstharzen oder Kunststoffen, denen Pigmente, Additive und sofern erforderlich, Lösungsmittel beigemischt werden. Der Beschichtungsstoff dient als Korrosionsschutz, verleiht der Oberfläche funktionelle Eigenschaften und liefert das Dekor. Die organischen Beschichtungsstoffe werden durch einen Batch Prozess hergestellt. Dabei werden die einzelnen Komponenten laut Rezeptur miteinander vermischt. Die Reaktion der Bestandteile zu einem Film erfolgt im Einbrennofen der Bandbeschichtungsanlage.

- Filmbildner

Der Filmbildner ist der grundlegende Bestandteil des Beschichtungsstoffes. Aufgrund der vielfältigen Anforderungen, die an den Beschichtungsstoff gestellt werden, können in der Regel nur polymere oder oligomere Verbindungen eingesetzt werden. Zu den am häufigsten eingesetzten Filmbildnern zählen Polyester, Polyurethan, Epoxid, Acrylat, Polyvinylidenfluorid (PVDF) und PVC Systeme.

- Pigmente

Pigmente bestehen aus feinen Partikeln, die im Filmbildner praktisch unlöslich sind und dem Film die gewünschte Farbe geben. Zusätzlich können sie vor Korrosion schützen oder der Beschichtung elektrische oder elektromagnetische Eigenschaften verleihen. Bei den Pigmenten spielt die Teilchengröße beziehungsweise die Teilchengrößenverteilung eine wichtige Rolle, da mit diesen Parametern Farbigkeit, Farbeffekte und Deckvermögen gesteuert werden können. Auch der Glanz wird von den zugesetzten Pigmenten beeinflusst. Konzentration und Dispersionsgrad der Pigmente sind entscheidende Faktoren, wobei nur die Teilchen wirksam sind, die sich direkt an der Oberfläche befinden. „Der Glanzgrad ist umso geringer, je höher die Pigmentkonzentration ist“. Grundsätzlich lassen sich Pigmente in folgende Gruppen einteilen:

- unbunte Pigmente
- Buntpigmente
- Korrosionspigmente / funktionelle Pigmente

- Weichmacher

Weichmacher werden Polymeren zugesetzt, um sie für die Verarbeitung und den Gebrauch dehnbar, weich und biegsam zu machen. Weichmacher verändern das Polymer nur physikalisch, sie reagieren also nicht mit den Komponenten des Beschichtungsstoffes. Charakteristisch sind polare und unpolare Molekülanteile. Durch diese Struktur können sich Weichmacher zwischen die Polymerketten schieben. Die Gruppen behindern die intermolekulare Annäherung und fördern dadurch die Beweglichkeit. Das erhält eine größere Elastizität. Am häufigsten werden Weichmacher aus der Stoffgruppe der Phthalsäurediester und der Phthalate verwendet.

- Additive

Additive werden nur in kleinen Mengen zugemischt, um bestimmte Eigenschaften wie zum Beispiel Kratzfestigkeit, Lichtbeständigkeit oder Mattierung zu erzeugen. Meist wirken diese multifunktionell und beeinflussen gleich mehrere Eigenschaften der Beschichtung. Katalysatoren steuern beim Einbrennen die Reaktionsgeschwindigkeit von Harz und Vernetzer. Tenside wirken als Netzmittel, Entschäumer und Benetzungsmittel. Verlaufmittel helfen die Applikation der Lacke zu erleichtern. Wachse erhöhen die Abriebbeständigkeit beziehungsweise die Kratzfestigkeit.

Des Weiteren werden Additive auch eingesetzt, um die mechanisch - technologischen Filmeigenschaften sowie Glanz und Farbe zu beeinflussen.

Gerade bei Antifingerprint Eigenschaften spielen Glanz und Farbe eine wichtige Rolle. Soll zum Beispiel eine Oberfläche matter werden, so wird feinteilige Kieselsäure als Mattierungsmittel beigegeben. Die Teilchengrößenverteilung von Mattierungsmitteln liegt im Schichtdickenbereich des ausgehärteten Lackfilms. Dadurch wird die Oberflächenglätte gestört. „Die Oberfläche wird vergrößert und einfallendes Licht an der so erzeugten Mikrostruktur unregelmäßig reflektiert“. Durch diesen Effekt ergibt sich die matte Oberfläche, die mit einem niedrigen Glanzgrad einher geht.

- Füllstoffe

Typische Füllstoffe sind Silikate, Talkum oder Glimmer. Sie haben die Aufgabe eine stabile, kompakte Grundstruktur zu bilden und füllen die Beschichtung

räumlich auf. Die Korngrößenverteilung muss dabei so eingestellt werden, dass eine möglichst hohe Packungsdichte erreicht wird. Füllstoffe haben hauptsächlich Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften wie zum Beispiel Schlagzähigkeit. Sie beeinflussen aber auch die Wasserdampfdurchlässigkeit und das Quellverhalten.

- Lösungsmittel

Als Lösungsmittel werden aromatische und aliphatische Kohlenwasserstoffe, Ester, Ketone und Alkohole eingesetzt. Sie beeinflussen Parameter wie Rheologie, Flüchtigkeit und Oberflächenspannung. Die Hauptaufgabe der Lösungsmittel ist es, die Bindemittel physikalisch zu lösen, mit denen Pigmente und Füllstoffe benetzt werden sollen. In der Regel werden beim Bandbeschichtungsprozess Lösungsmittelgemische eingesetzt. Die Rezeptur muss dabei so gewählt werden, dass sich eine krater- und kocherfreie Oberfläche ausbildet. Die Lösungsmittel verdunsten aufgrund ihrer unterschiedlichen Siedepunkte nacheinander und transportieren die Reaktionsprodukte an die Oberfläche. Sie nehmen nicht an der chemischen Vernetzungsreaktion teil, sie verdunsten beim Einbrennvorgang komplett.

2.3 Beschichtungsstoffe für den Coil Coating - Prozess

Primer

Beim überwiegend verwendeten Zwei - Schicht - System wird zuerst der Primer (Grundierung) auf die vorbehandelte Oberfläche aufgetragen und eingebrannt. Der Primer wird relativ dünn mit einer Schichtdicke zwischen 5 und 10 μm aufgetragen und bei 200 bis 230 $^{\circ}\text{C}$ eingebrannt. Er dient einerseits als Haftvermittler zwischen Substrat und Decklack, andererseits schützt er das Substrat vor Korrosion. Außerdem beeinflusst der Primer die Farbgestaltung mit. Hauptsächlich werden Polyester und Polyurethan Systeme eingesetzt. Früher wurde für jeden Decklack ein eigener Primer entwickelt. Zu Beginn der 80er Jahre kamen dann so genannte Universalprimer zum Einsatz. Diese Primer können auf nahezu allen Substraten, kaltgewalztem, elektrolytisch- und feuerverzinktem Stahl aufgetragen werden und sind mit einer Vielzahl von Decklacken kompatibel.

Decklacke

Der Decklack stellt die dekorative und schützende Schicht dar. Für diese Arbeit sind folgende Lacksysteme von Bedeutung.

- Polyester-Lacke

Grundbausteine dieser Systeme sind Polyole und Polycarbonsäuren, welche durch den Mechanismus der Polykondensation zu Polyestern reagieren. Typische Polyole sind Monoethylenglycol, Neopentylglykol, Cyclohexandimethanol und Hexandiol-1,6. Bei den Polycarbonsäuren kommen hauptsächlich Phthalsäure, Isophthalsäure und Adipinsäure zum Einsatz. Die Zusammensetzung des Polyesters hat einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften des Lacksystems. Während Hexandiol-1,6 den Lackfilm weich macht, erhöht Neopentylglykol die Steifigkeit und das E-Modul. Die Vernetzung der Polyester erfolgt durch Hexa-(methoxymethyl)-melamin (HMMM). Melamin ist dabei das Ausgangsprodukt für HMMM. [4]

- Polyurethan-Lacke

Die Vernetzungsreaktion dieser Lacksysteme basiert auf dem Prinzip der Polyaddition. Polyisocyanate werden an den Isocyanatgruppen mit wasserstoffabspaltenden Verbindungen blockiert. Monomere Diisocyanate sind die Ausgangsverbindungen für die Polyisocyanate. Hexamethylen-diisocyanat (HDI), Isophorondiisocyanat (IPDI) und Bis-(4-isocyanatocyclohexyl)methan (H_{12} MDI) können hier als klassische Beispiele genannt werden. Als Blockierungsmittel werden zum Beispiel Phenole, Alkohole und Lactame eingesetzt. Das Blockierungsmittel wird bei der thermischen Reaktivierung wieder abgespalten. Nach der Abspaltung erfolgt die Vernetzungsreaktion, bei der das Polyisocyanat mit dem OH-funktionellen Polyesterharz reagiert. [1],[5]

3 Stand der Technik

3.1 Kratzfestigkeit

Das Entstehen von Verkratzungen ist ein sehr komplexer Vorgang. Kratzer werden durch den Kontakt von harten und spitzen Gegenständen und einer großen Anzahl von abrasiven Partikeln hervorgerufen. Im Zuge einer Verkratzung treten oft unterschiedliche Schadensbilder auf, angefangen von Materialverschiebungen (Wulste am Rand der Kratzfurche) bis zur irreversiblen Rissbildungen und auch Materialabtragungen. „Die Ursache der vielfältigen Erscheinungsformen von Kratzern sind in den viskoelastischen Eigenschaften der Beschichtung zu suchen.“ [6]

Eine in der Literatur weit anerkannte Klassifikation der Schäden betrifft die Eindringtiefe. Schäden mit einer geringeren Eindringtiefe, bezogen auf die Gesamtschichtdicke, (zB. 0,1-2 μm) werden in der Regel als "mar – leichte Beschädigung" bezeichnet, während bei tieferen Schäden (zB $>2 \mu\text{m}$) der Begriff "Scratch - Kratzer" herangezogen wird. (Abb.5) [7]



Abbildung 5: Oberflächenschäden [7]

Zudem gibt es eine weitere Klassifikation, die sich auf unterschiedliche Morphologien der Schädigungen bezieht. Anhand dieser Definition unterscheidet man zwischen plastischer Verformung oder Bruch der Beschichtung. (Abb.6) [7]

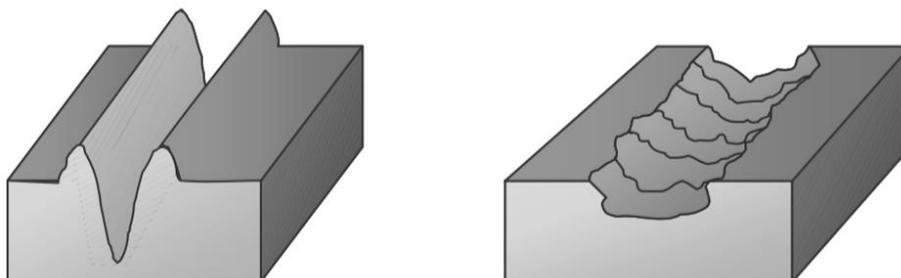


Abbildung 6: plastische Deformation / Sprödbbruch [7]

In manchen Literaturstellen wird auch über einen Unterschied in der optischen Erscheinung zwischen diesen Typen berichtet. [8] [9]

Plastische Deformation: Bei der plastischen Verformung wird die Oberfläche der Beschichtung verändert, wobei aber die Netzwerkstruktur unberührt bleibt. Wenn die Verformung von plastischer Natur ist, kann der Kratzer als eine Furche, welche von jeder Seite durch eine Schulter begrenzt ist, beschrieben werden. Da entlang der Richtung des Kratzers keine Diskontinuitäten beziehungsweise Unregelmäßigkeiten auftreten, differiert die Reflexion von Licht entlang der Kratzspur nicht signifikant zu der der Oberfläche (Abb.8). In der senkrechten Richtung wird der Reflexionswinkel durch die Morphologie der Kratzspur beeinflusst. Das optische Erscheinungsbild von Kratzern mit plastischer Verformung hängt somit vom Betrachtungswinkel ab. Plastische Deformationen sind oft bei thermischer Aktivierung reversibel.

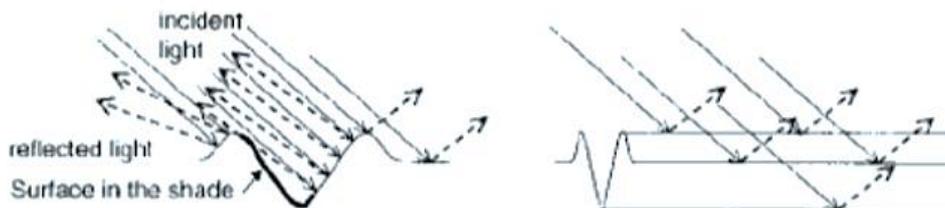


Abbildung 7: Lichtreflexion bei plastischer Deformation [8]

Sprödbbruch: Bei sprödem Materialversagen wird die Netzwerkstruktur im Polymer beschädigt. Kratzer verlieren ihre Kontinuität in Längsrichtung, da Rissbildung auftritt. Die Beugung von Licht ist jetzt unabhängig von der Einfallsrichtung (Abb.9). Es können Teile der Beschichtung verloren gehen, in schweren Fällen wird dieser Effekt als Abrieb bezeichnet. Sprödbbruch ist nicht umkehrbar. [8], [9]

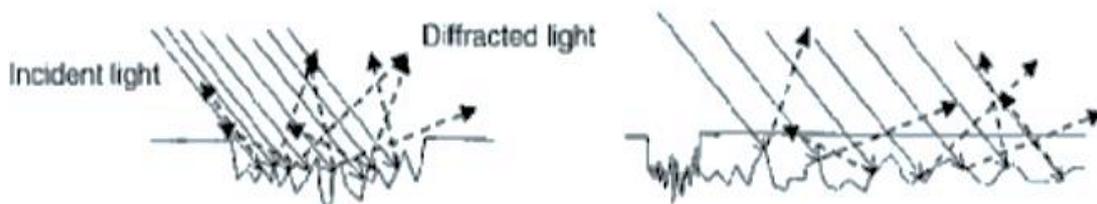


Abbildung 8: Lichtreflexion bei Sprödbbruch [8]

3.1.1 Untersuchungsmethoden

Die folgende Abbildung zeigt verschiedene Kratztests, welche das gesamte Spektrum an Schäden, welche auf der Polymeroberfläche auftreten können, abdecken.

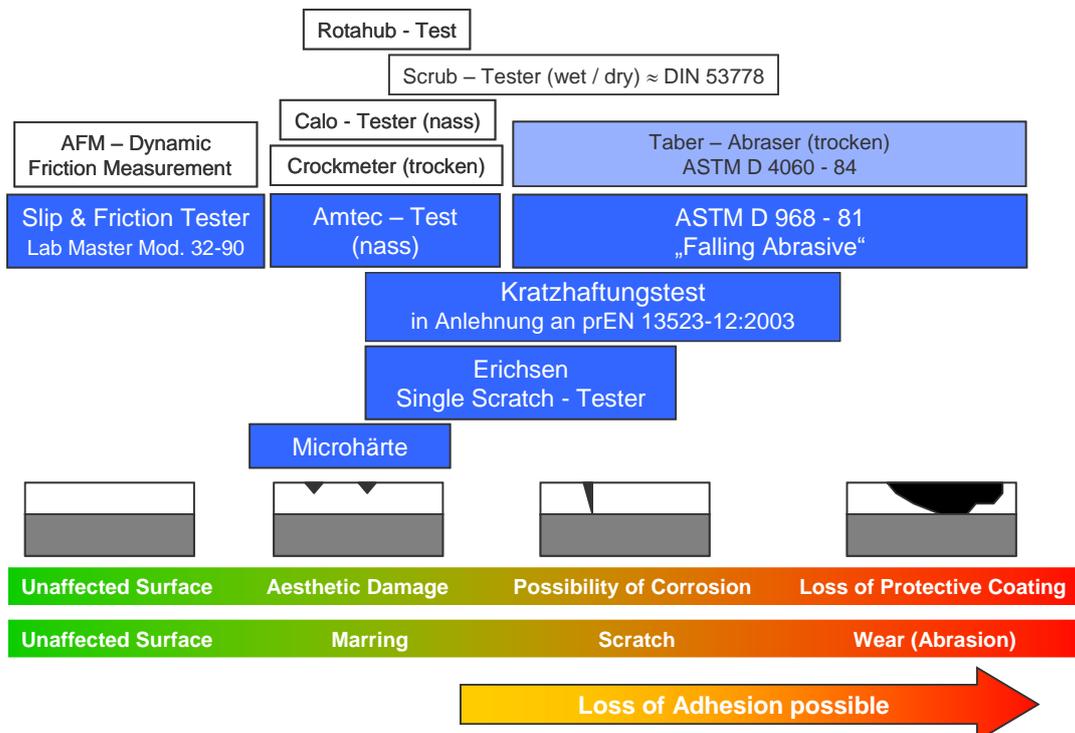


Abbildung 9: Übersicht Kratztests [2]

Bei den Untersuchungsmethoden wird grundsätzlich zwischen Einzel- und Vielfachkratztests unterschieden. Im Anschluss finden sich die gängigsten Methoden.

3.1.1.1 Vielfachkratztests

AMTEC - Test

Der AMTEC - Test ermöglicht eine realistische Simulation von Schadensbildern, welche bei einer automatischen Autowaschanlage verursacht werden. Dabei wird organisch beschichtetes Stahlband unter einer rotierenden Autowaschbürste zehnmal hin und her bewegt. Die Bürste wird während des Reinigungsvorganges mit

Waschwasser besprüht. Zusätzlich wird Quarzpulver als Ersatz für Straßenschmutz zum Waschwasser hinzugegeben.

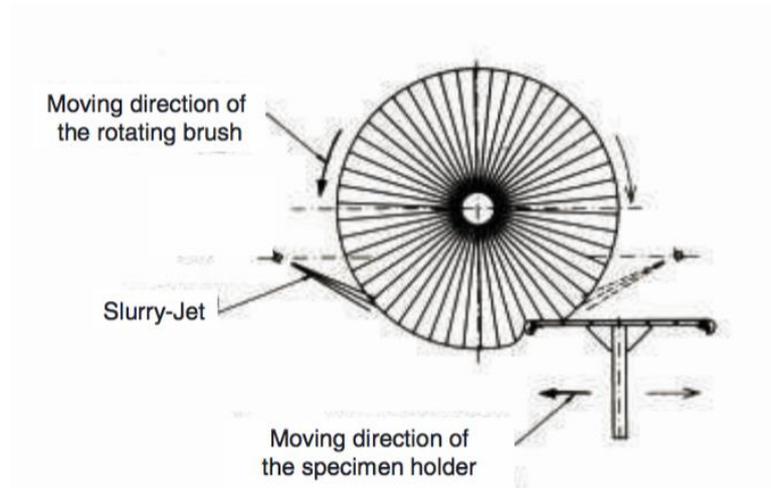


Abbildung 10: AMTEC – Test [10]

Hier erfolgt die Auswertung mit der Glanzmessung, wobei der Anfangsglanz und der Glanz nach dem Reinigungsverfahren gemessen werden. Der Restglanz, angegeben in Prozent, in Bezug auf den Anfangsglanz ist ein Maß für die Kratzfestigkeit. Hohe Werte weisen auf eine gute Kratzfestigkeit hin. [10]

Crockmeter

Das Crockmeter wird schon lange in der Textilindustrie eingesetzt, um die Scheuerbeständigkeit von Stoffen zu prüfen. Die Lackindustrie testet damit die Kratzfestigkeit von Beschichtungen. Bei der Prüfung wird ein Testbügel oszillierend über den Prüfkörper bewegt. Der Bügel übt einen bestimmten Druck auf die Oberfläche aus. Zusätzlich ist der Bügel abriebfördernd. Die Auswertung erfolgt über die Glanzmessung. [11]

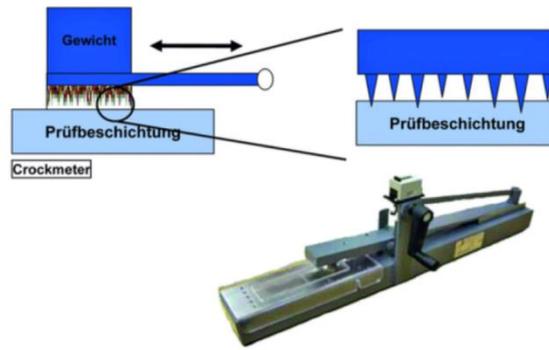


Abbildung 11: Crockmeter [11]

3.1.1.2 Einzelkratztests

Um auf Elastizität und Härte einer Beschichtung rückzuschließen, ist es notwendig Informationen über die Eindringtiefe zu generieren. Die Eindringtiefe hängt von der aufgebrachten Normalkraft ab. Vielfachkratz -Tests geben zum Beispiel keine detaillierten Informationen über die Kraft mit der ein einzelnes Teilchen einer Emulsion auf die Oberfläche gedrückt wird. Darüber hinaus können sich die Kratzer auch kreuzen – somit ist es nicht mehr möglich klare Aussagen zu treffen. Hier sind Einzelkratztests die Methoden der Wahl. [12]

Nano Scratch Test

Während des Kratztests wird ein Diamant-Eindringkörper nach vorne über die untersuchte Oberfläche mit einer konstanten Geschwindigkeit gezogen (Abb.12).

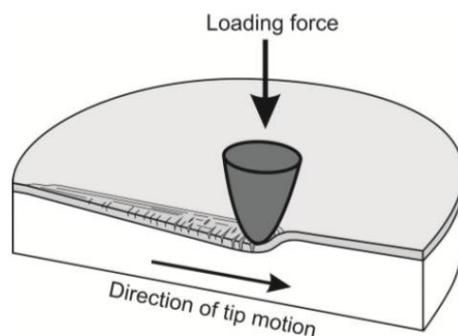


Abbildung 12: Nano Scratch Test [13]

Dabei wird die Normalkraft entweder stufenförmig oder öfter kontinuierlich (in der Regel linear) erhöht. Das Spannungsfeld, welches durch den sich bewegenden Indentor erzeugt wird, führt zum Auftreten verschiedener Fehlerarten wie zum Beispiel Beschichtungsablösung durch Sprödbruch, plastische Verformung in der Beschichtung und / oder Rissbildung in der Beschichtung. Der Beginn des Kratzers wird entweder akustisch oder mikroskopisch detektiert. Das Ziel des Tests ist es, so genannte kritische Last (L_c), bei der charakteristische Störungen auftreten, zu finden. Die Ergebnisse liefern Informationen über die Beschichtungsqualität, Adhäsions- und Kohäsionseigenschaften, Kratzbeständigkeit und den tribologischen Widerstand. [13]

Nano - Scratch Tests werden sehr häufig in der Automobilindustrie eingesetzt. An Kraftfahrzeugbeschichtungen werden sehr hohe Leistungsanforderungen gestellt. Der Schutz des Substrats und die optische Erscheinung sind dabei von entscheidender Bedeutung. Die optische Qualität von Klarlacken wird durch Schäden beeinträchtigt, welche nur wenige Mikrometer unterhalb der Oberfläche zu finden sind. Die Nano - Scratch Technik bietet eine wissenschaftliche Methode, um Mechanismen, die bei der Verkratzung auftreten, aufzuklären.

Mit der Nano – Scratch Technik kann einerseits auf die Kratzbeständigkeit rückgeschlossen werden, andererseits dient die Methode auch dazu, um auf Verkratzungsmechanismen rückzuschließen. Die Ergebnisse von Nano-Scratch Experimenten werden mit physikalischen Material - Eigenschaften und der chemischen Struktur in Beziehung gesetzt. [14] [15] [16] [17]

Erichsen Single Scratch Test

Bei diesem Test wird eine Diamantspitze mit zunehmender Normalkraft auf die Oberfläche gedrückt, während die Platte unterhalb der Spitze nach vorne bewegt wird. Das Testprinzip wird in Abbildung 13 gezeigt.

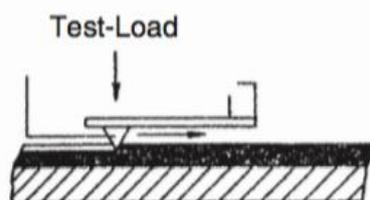


Abbildung 13: Erichsen Single Scratch Test

Während bei niedrigen Belastungen typischerweise eine plastische Verformung auftritt, führen steigende Belastungen zu spröder Verformung mit zunehmender Anzahl von Rissen. Optische Mikroskopie wird verwendet, um die Kratzbreite zu messen, das Rissverhalten der Proben und die "Critical Load" (Last bei der die erste Rissbildung erfolgt) zu bestimmen. Der Kratztest wurde laufend weiterentwickelt. Verbesserungen wurden vor allem bei den Bewertungstechniken vorgenommen. Mit Hilfe der Laserprofilometrie können sehr genau Angaben im Bezug auf Einkratztiefe gemacht werden. [18]

3.2 Antifingerprint

Vorweg ist anzumerken, dass es sehr schwierig war, Literatur zu diesem Thema zu finden. Der Bericht von *technical steel research* [18] lieferte sehr gute Anhaltspunkte für die Methodenentwicklung. Diese umfasste die Applikation von künstlichen Fingerabdrücken, ein Reinigungsprozedere und die Quantifizierung von Fingerabdrücken. Zudem wurden auch verschiedene Applikationsmedien vorgestellt. Die Charakterisierung erfolgte mit unterschiedlichen, teils sehr aufwendigen Methoden wie zum Beispiel Rasterelektronenmikroskopie.

Weitere Erkenntnisse [18] [19]

- Die Wahrnehmung eines Fingerabdruckes hängt von der Oberflächenbeschaffenheit (matte Oberfläche verbessern die Anti-Fingerprint Eigenschaften), dem Lichteinfall und der Art der Beschichtung ab.
- Die Dicke der Beschichtung scheint keine Auswirkung auf die Fingerabdruckbeständigkeit zu haben.

Der Kontaktwinkel und die Rauigkeit der Oberfläche spielen bei der Haftung von Fingerabdrücken eine wichtige Rolle.

- Es ist bewiesen, dass eine Oberfläche mit einem Kontaktwinkel oberhalb 87° fingerabdruckfrei ist.
- Anti-Fingerprint Eigenschaften können auf glatten und optisch klaren Oberflächen erreicht werden.
- Tief poröse Strukturen sind günstiger als holporige Strukturen für oleophobe Anti-Fingerprint Eigenschaften.

4 Methoden

4.1 Methodenübersicht

Tabelle 1: Untersuchungsmethoden

Abriebprüfgerät ABREX®-CE	Widerstand gegen mechanische Beanspruchungen
Thermomechanische Analyse - TMA	Glasübergangstemperatur
Mikroindringhärte	Härte
T - Bend Test	Flexibilität
Kratzfestigkeit	Widerstand gegen mechanische Beanspruchungen
Konfokalmikroskopie	Oberflächentopographie

4.2 Abriebprüfgerät ABREX®-CE

Mithilfe des Abriebprüfgeräts ABREX®-CE ist es möglich Handabrieb, Fingernagelkratztests und Fingerabdrucktest an beliebigen Oberflächen zu simulieren. Bei der Prüfung mittels ABREX®-CE soll die Oberfläche einer möglichst praxisgerecht nachempfundenen Belastung ausgesetzt werden. Mit dem Prüfgerät kann nicht nur eine mechanische Belastung, sondern auch das chemische Umfeld simuliert werden. Dabei können Prüfflüssigkeiten kontinuierlich oder aber auch vor der Prüfung zugeführt beziehungsweise aufgetragen werden. Des Weiteren ermöglicht das Gerät auch den Prüfbetrieb in einer Klimakammer (- 40 °C bis + 80 °C; 100 % rel. Luftfeuchte)



Abbildung 14: Abriebprüfgerät ABREX®-CE im „Scratch – Modus“

4.2.1 Einstellungen

Die mechanische Beanspruchung erfolgt mit einer auslenkbaren Belastungseinheit, an der verschiedene Prüfaufsätze (Abbildung 14) befestigt werden können. Ein Druckluftzylinder ist für die Auslenkung des Prüfstempels verantwortlich, wobei mindestens 4 bar Betriebsdruck notwendig sind. Die Probe wird mit einer Universalhalterung am Längsschlitten angebracht und kann mittels Handkurbel in Richtung Probe bewegt werden. Je nach Prüfverfahren wird der Prüfkörper im Winkel von 90 oder 45° befestigt.

Prüfkraft

Als Prüfkraft versteht man jene Kraft mit welcher der Stempel senkrecht gegen den Prüfkörper drückt. Die Einstellung der Prüfkraft erfolgt bei ABREX® durch das Anbringen von Zusatzgewichten. Das Gerät ist standardmäßig für die Prüfkraft 1N, 5N, 10N, 15N und 20N ausgelegt, wobei für diese Untersuchungen nur die Prüfkraften 1, 5 und 10N zur Verfügung standen.

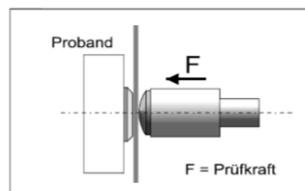


Abbildung 15: Prüfkraft [20]

Geschwindigkeit

Beim Fingernagelkratztest sind höhere Prüfgeschwindigkeiten erforderlich als beim Handabriebtest. Daher bietet das Gerät zwei unterschiedliche Basisfunktionen – „ABREX“ und „SCRATCH“. Wird das Gerät im Modus SCRATCH betrieben, können in weiterer Folge noch zwei unterschiedliche Geschwindigkeiten (20 cm/s; 70cm/s) ausgewählt werden.

4.2.2 Handabriebprüfung

Die Rahmenbedingungen für die Abriebprüfung sind in der Prüfnorm DIN EN 60068-2-70 festgelegt. Diese sind bewusst sehr weit gefasst um einen breiten Anwenderkreis zu erschließen und um Variationen der Bedingungen zuzulassen.

Bei der Abriebprüfung wird der Prüfstempel mit einer bestimmten Andruckkraft senkrecht gegen die Probe gedrückt und mit einer definierten Anzahl an Betätigungen (Zyklen) auf und ab bewegt. Die Strecke die der Stempel auf der Probe zurücklegt kann je nach Bedarf mit der Reibwegstellschraube eingestellt werden. Je nach Reibweg und Last ergibt sich eine bestimmte Prüffrequenz, welche an der Frequenzanzeige abgelesen werden kann. Die optimalen Prüffrequenzen sind für Tests an flachen Probenkörpern aus der Bedienungsanleitung zu entnehmen.

Prüfstempel

Laut Norm können Prüfstempel mit einem Außendurchmesser von 10 und 20 mm eingesetzt werden.



Abbildung 16: Prüfstempel [20]

- transparenter Stempel: 0 bis 30°C
- roter Stempel: über 30°C
- blauer Stempel: 0 bis – 40°C

Gewebe

			
Standardprüfgewebe: Simuliert den Abrieb durch die menschliche Hand nach DIN EN 60068-2-70 / IEC 68-2-70.	Abrieb-Pad S-1000: Simuliert hochabrasive, mechanische Beanspruchung.	Abrieb-Pad „Scheuer Test“: Simuliert die mechanische Beanspruchung durch Spülschwämme (M44).	Wollfilz H1: Abriebprüfungen gemäß diversen Prüfnormen, Härte H1

Abbildung 17: Gewebe

Flüssigkeit

Um ein chemisches Umfeld simulieren zu können, müssen bei Bedarf auch Prüfflüssigkeiten zugeführt werden.

- Kunstschweiß nach: DIN 53160-2:2001; BMW GS 97045-2; DBL 73084; VW TL 226
- Weitere Fluide: Reinigungspasten, Lotion, Polituren, Desinfektionsmittel

Die Zugabe von Flüssigkeiten erfolgt über eine Vorrichtung die eine automatische Zufuhr der Prüfflüssigkeit erlaubt (Abb. 18).

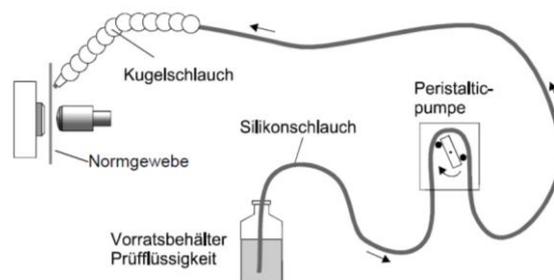


Abbildung 18: Flüssigkeitskreislauf [20]

Eine kontinuierliche Zufuhr der Prüfflüssigkeit ist nicht zwingend notwendig. Je nach Testbedingungen kann der Prüfstempel auch vor der Prüfung befeuchtet werden.

4.2.3 Fingernagelkratztest

ABREX[®]-CE bietet weiters die Möglichkeit eines Fingernagelkratztests. Dabei wird der Silikonstempel durch den Kratzeinsatzhalter Abb. 19/20 ausgetauscht. Der Kunststoffeinsatz simuliert den verursachten Abrieb eines menschlichen Fingernagels auf der Oberfläche einer Probe. Laut BMW GS 97034-2 ist der Test mit einer Geschwindigkeit von 20 cm/s durchzuführen.



Abbildung 19: Kratzeinsatzhalter mit Kunststoffeinsatz [20]



Abbildung 20: Kratzeinsatzhalter mit Kunststoffeinsatz

4.2.4 Fingerabdrucktest

Mit Hilfe des Fingerabdrucktests ist es möglich die Affinität gegenüber Fingerabdrücken sowie Reinigungseigenschaften nach BMW PR 506 zu prüfen. Bei der Prüfung wird der Stempelaufsatz (Abb. 21) senkrecht mit einer definierten Kraft auf die Probe aufgebracht. Verschiedene Prüfflüssigkeiten wie zum Beispiel Kunstschweiß können auf den Stempel aufgetragen werden.



Abbildung 21: Silikonstempel

4.3 Thermomechanische Analyse - TMA

4.3.1 Temperaturabhängigkeit des Polymerverhaltens

Erwärmt man ein amorphes Polymer von tiefen Temperaturen, so werden unterschiedliche Zustände und Eigenschaftsbereiche durchlaufen. Ursache für dieses Verhalten ist die zunehmende Molekularbewegung welche auf Temperaturerhöhung zurückzuführen ist.

In einem kalten Molekül existieren hauptsächlich Schwingungen von Atomen und Rotationen von kleinen Atomgruppen. Die Polymerketten liegen nahezu bewegungslos im Molekülgeflecht fest. Das Polymer ist hart und spröde und ist nur beding plastisch verformbar.

Wird das Material erwärmt, so erweicht es ab einer bestimmten Temperatur. Der Erweichungsprozess ist auf Segmentschwingungen zurückzuführen, welche das Entstehen von Entropieelastizität und Plastizität zur Folge haben. Das Polymer geht also vom Glaszustand in den viskoelastischen Zustand über. Diesem Temperaturbereich wird die Glasübergangstemperatur zugeordnet, welche allerdings physikalisch-chemisch nicht genau definiert ist. Bei der Schmelztemperatur erfährt ein Material einen Phasenübergang erster Ordnung, welcher durch die Schmelzwärme und einer stufenförmigen Änderung im spezifischen Volumen genau charakterisiert ist. Diese Phasenübergänge lassen sich durch eine Vielzahl von Methoden charakterisieren, welche alle die gleiche Antwort innerhalb der experimentellen Genauigkeit liefern.

Der Glasübergang ist jedoch ein fundamental unterschiedliches Phänomen, da dieser mit keiner exakten Temperatur verknüpft ist. Die Glasübergangstemperatur kann nicht durch eine stufenförmige Änderung der thermodynamischen Eigenschaften sondern vielmehr durch die Änderung des Volumens in Abhängigkeit von der Temperatur und der Änderung der Wärmekapazität beschrieben werden. Des Weiteren ist die Glasübergangstemperatur ratenabhängig was wiederum bedeutet, dass die Glasübergangstemperatur bei verschiedenen Heizraten aber auch unterschiedlichen Methoden variiert.

Der Glasübergangsbereich kann zum Beispiel physikalisch durch die Änderung im spezifische Volumen sehr gut erläutert werden. Wie in Abbildung 22 zu erkennen ist steigt das spezifische Volumen oberhalb der Glasübergangstemperatur stärker an als unterhalb.

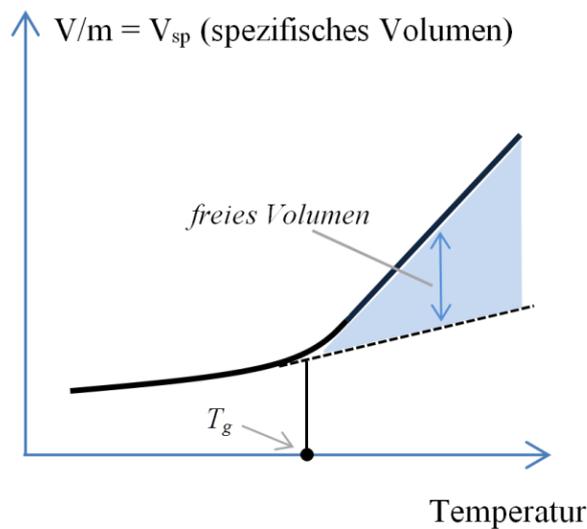


Abbildung 22: Änderung des spezifischen Volumens in Abhängigkeit von der Temperatur [23]

Dieser Anstieg hat seine Ursache in den erwachenden Segmentschwingungen, welche durch das Einbringen thermischer Energie hervorgerufen werden und dabei sozusagen Hohlräume in das Polymer schlagen. Das Gesamtvolumen der Hohlräume wird als freies Volumen bezeichnet und addiert sich zum eigentlichen Molekülvolumen. Der dafür formulierte Differentialquotient $\frac{dV_{sp}}{dT}$ steigt bei T_g .

Neben dem spezifischen Volumen ändern sich im Glasübergangsbereich auch eine Vielzahl anderer physikalischer Eigenschaften wie zum Beispiel Längenausdehnungskoeffizient, Wärmekapazität und Enthalpie. Die Glasübergangstemperatur wird maßgeblich durch die chemische Struktur, den Vernetzungsgrad und der Morphologie des Polymers beeinflusst. [21] [22] [23]

4.3.2 Messprinzip TMA – Dilatometrie

Mit Hilfe der thermomechanischen Analyse wird die thermische Ausdehnung eines Festkörpers in Abhängigkeit der Temperatur gemessen. Die thermomechanische Analyse unterscheidet sich im Vergleich zu anderen Messsystemen durch eine konstante meist geringe Auflast, welche auf den Probenkörper einwirkt. Aus der gemessenen Ausdehnung resultiert der thermische Längenausdehnungskoeffizient α .

Dieser kann als mittlerer $\alpha(\Delta T)$ oder differentieller Wert nach DIN 53752 berechnet werden.

Der mittlere thermische Längenausdehnungskoeffizient

$$\alpha(\Delta T) = \frac{1}{l_0} * \frac{l_2 - l_1}{T_2 - T_1} = \frac{1}{l_0} * \frac{\Delta l_{th}}{\Delta T} \quad \left[\frac{\mu m}{m^\circ C} \right]$$

ist als Messwert von dem individuellen Temperaturbereich abhängig und daher als Kennwert oder Berechnungswert nicht geeignet. Somit ist er nur für einen bestimmten Anwendungsfall vorgesehen.

Ändert sich die Länge bezogen auf die Ausgangslänge/Bezugslänge l_0 , so spricht man von der temperaturabhängigen Längenänderung. Diese stellt ein relatives Maß für die Längenausdehnung dar, das bei Versuchsbeginn bei der Bezugstemperatur T_0 immer den Wert 0 aufweist. Der differentielle thermische Längenausdehnungskoeffizient $\alpha(T)$ ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$\alpha(T) = \frac{1}{l_0} * \frac{dl_{th}}{dT} \quad \left[\frac{\mu m}{m^\circ C} \right]$$

Bei der Messung wird eine zylindrische oder quaderförmige Probe mit einem vertikal beweglichen Quarzstempel, welcher in einem induktiven Wegaufnehmer integriert ist, mit einer geringen Auflast von ca. 0,1 bis 5g belastet. Während des Aufheizvorgangs dehnt sich die Probe aus oder zieht sich zusammen und verschiebt somit den Quarzstempel. Die Temperatur wird mit Hilfe eines in unmittelbarer Nähe der Probe angebrachten Thermoelements gemessen.

Die Ausdehnungskurve, welche sich aus der Messung ergibt ist das Resultat verschiedener Verformungsanteile wie thermische Längenausdehnung und belastungsabhängige Verformung. Bei der Messung ist die Wahl des Messstempels von entscheidender Bedeutung. Die Auswahl wird von der Probengeometrie und von der Problemstellung beeinflusst.

Da Penetrationsstempel nur sehr geringe Auflageflächen haben eignen sich diese zur Bestimmung der Glasübergangstemperatur. Besonders bei amorphen Proben erhält man durch den Eindringvorgang ein gut auswertbares Signal. Durch die geringe Auflagefläche auf der Probe ergeben sich punktuell sehr hohe Druckspannungen welche keine konkrete Erfassung und Auswertung des Ausdehnungsverhaltens und damit keine genaue Bestimmung des Längenausdehnungskoeffizienten zulassen. Bei der Auswertung wird also die relative Eindringtiefe herangezogen. [24]

4.3.3 TMA Q400EM

Die Prüfung erfolgte in Anlehnung an die DIN Norm 53752. Dabei wurde das Gerät TMA Q400EM (Abb. 23) von TA Instruments verwendet.



Abbildung 23: TMA Q400 EM [25]

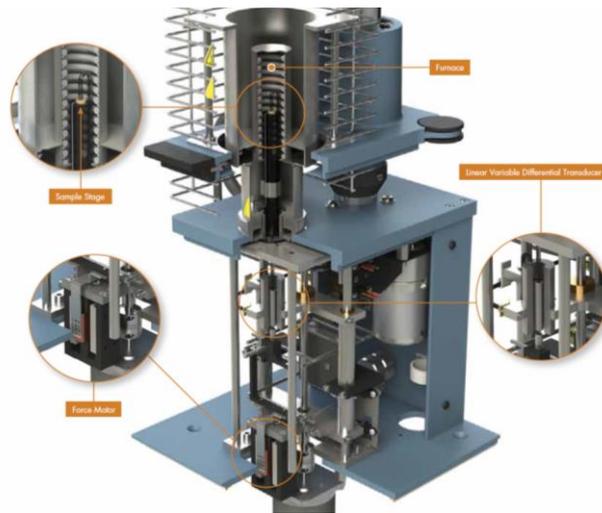


Abbildung 24: TMA Q400 EM [25]

Abb. 24 zeigt die wichtigsten Elemente des Geräts im Überblick.

- Probenhalterung
- Kraftmotor
- Ofen
- Linear variabler differentieller Signalwandler

Die Ermittlung der Glasübergangstemperaturen wurde mit Hilfe des Penetrationsstempels durchgeführt welcher in Abb. 25 zu sehen ist. [25]



Abbildung 25: Penetrationsstempel [25]

4.4 Mikroeindringhärte

Die Härte ist neben anderen Qualitätsmerkmalen wie zum Beispiel Elastizität oder Haftung eine wichtige Eigenschaft, die Coilcoating-Beschichtungen mitbringen müssen. Speziell im Hinblick auf mechanische Beanspruchungen die während des Verarbeitungsprozesses auftreten, ist die Härte der Oberfläche von besonderer Bedeutung. [26]

Ganz allgemein versteht man unter der technischen Härte den Widerstand eines Werkstoffes gegen das Eindringen eines Körpers aus einem härteren Werkstoff. Gerade bei Farben, Lacken und Kunststoffen kommen im Gegensatz zu Metallen viskoelastische Eigenschaften zu tragen. Hierbei erfolgt die Reaktion auf die Beanspruchung zeitlich verzögert, was bei Metallen im Allgemeinen nicht beobachtet wird.

4.4.1 Eindringtiefen Messverfahren

Bei allen Eindringtiefenmessverfahren wird ein Eindringkörper durch Aufbringen einer zeitlich konstanten oder zeitlich variablen Kraft, in die Beschichtung hineingedrückt und anschließend wieder abgehoben. Als Eindringkörper verwendet man üblicherweise Kugeln aus Hartmetallen oder Diamantpyramiden nach Vickers oder Berkovich, seltener nach Koop.

Bei der Messung wird die Eindringtiefe in Abhängigkeit von der Zeit oder der wirkenden Kraft registriert.

Die Härte definiert sich durch die Messgrößen Kraft und Eindringtiefe:

$$\text{Härte } H = \frac{\text{Kraft } F}{\text{Eindruckoberfläche } A}$$

Im Gegensatz zur Härtemessung bei Metallen wie zum Beispiel nach Vickers oder Brinell, wird die vom Eindringkörper erzeugte Fläche in der organischen Beschichtung unter wirkender Prüfkraft bestimmt. Die Berechnung erfolgt mit Hilfe der gemessenen Eindringtiefe und der bekannten Geometrie des Eindringkörpers.

Die Auswahl des Eindringkörpers erfolgt unter folgenden Parametern:

- gewünschte örtliche Auflösung
- Oberflächenbeschaffenheit der Beschichtung
- Homogenität des Schichtwerkstoffes
- Verletzungsgrad der Oberfläche durch den Eindringkörper
- zu untersuchende Schichteigenschaften
- Schichtdicke
- Geometrie des Messgegenstandes

In der Praxis hat sich die Verwendung einer Kugel oder der Vickerspyramide bewährt. Die Vickerspyramide eignet sich besonders gut zur Untersuchung plastischer und elastischer Eigenschaften, zur Erfassung örtlicher Änderungen von Schichteigenschaften. [27]

4.4.2 Martenshärte

Die Martenshärte widerspiegelt eine universelle Größe für den Vergleich unterschiedlicher Materialien und wird in der Einheit N/mm² angegeben.

$$HM = \frac{F}{A_s(h)} = \frac{F}{26,43 * h^2} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

F ... Kraft

h ... Eindringtiefe

Der Faktor 26,43 ergibt sich aus der Geometrie der Vickerspyramide. Der Vorteil des Vickers-Eindringkörpers ist, dass der durch den Eindringvorgang beeinflusste Schichtbereich kleiner ist als bei einer Kugel. [28] [29]

4.4.3 Relevante Kenngrößen

Eindringtiefe

Bei der Messung der Mikrohärtigkeit spielt die Eindringtiefe eine wichtige Rolle, da bei bekannter Schichtdicke, vor allem bei Mehrschichtsystemen, der Messdiamant nicht tiefer als 10 % der Schichtdicke eindringen darf, um die Eigenschaften der jeweiligen Schicht zu messen.

Elastischer Eindringmodul (YOUNG-MODUL)

Der elastische Eindringmodul berechnet sich aus den Daten der Entlastungskurve, sprich aus der Steigung der Kraft-Eindringtiefen-Kurve bei Maximalkraft im Bereich der Krafrücknahme. Der Young Modul kann bei einer Reihe von Werkstoffen zur Abschätzung des Elastizitätsmoduls herangezogen werden.

$$E_{IT} = \left[\frac{4 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) h_r \frac{\Delta h}{\Delta F}(h_{max})}{\sqrt{\pi}} - \frac{1 - v_{Dia}^2}{E_{Dia}} \right]^{-1} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

$\frac{\Delta h_{max}}{\Delta F}$... reziproke Steigung der Tangente an die Kraft – Eindringtiefen – Kurve

v_{Dia} ... Poissonzahl von Diamant ($v_{Dia}=0.25$)

E_{Dia} ... Elastizitätsmodul von Diamant ($E_{Dia} = 1,2 * 10^6 \text{ N mm}^{-2}$)

Kriechen

Unter dem Begriff Kriechen C_{IT} versteht man die Eindringtiefenänderung bei konstanter, maximaler Prüfkraft. Dieser Vorgang zeichnet sich durch eine Zunahme der Eindringtiefe h und durch viskoelastische Vorgänge im Material aus. [28] [29]

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} * 100 [\%]$$

h_1 ... Tiefe zu Beginn des Kriechens (Zeitpunkt t_1)

h_2 ... Tiefe am Ende des Kriechens (Zeitpunkt t_2)

4.4.4 Schematische Darstellung des Messzyklusses

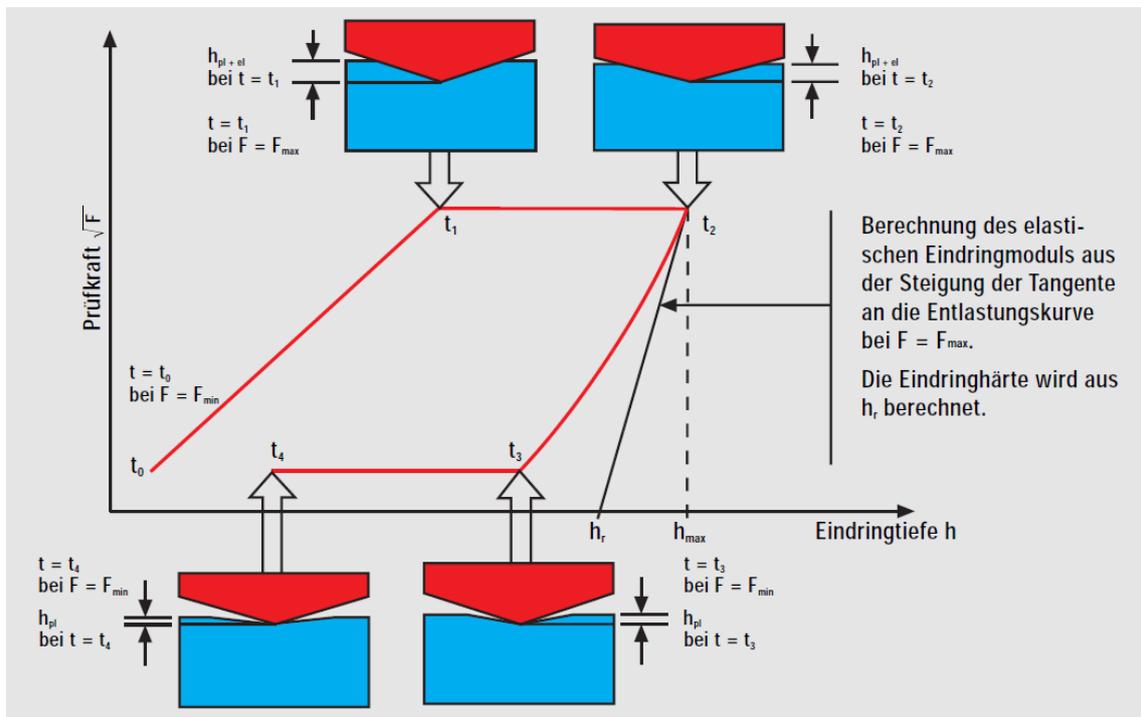


Abbildung 26: Messzyklus [30]

- t_0 bis t_1 : Prüfkraftsteigerung von minimaler bis maximaler Kraft. Der gesamte Härteeindruck ergibt sich durch plastische und elastische Verformung. Die Härteberechnung erfolgt zum Zeitpunkt t_1 .
- t_1 bis t_2 : In diesem Zeitintervall wird die maximale Prüfkraft während einer vorgewählten Zeitdauer konstant gehalten. Die Eindringtiefenänderung gibt Aufschluss über das Kriechverhalten des Materials.
- t_2 bis t_3 : Hierbei erfolgt die Rücknahme der Prüfkraft. Das elastische Eindringmodul lässt sich aus der Steigung der sich ergebenden Kurve bei F_{max} berechnen.
- t_3 bis t_4 : Bei der letzten Phase des Messzyklusses wird die minimale Prüfkraft konstant gehalten. Aus der Relaxation kann bei Lacken zum Beispiel auf das Verhalten nach einer Beschädigung geschlossen werden. [30]

4.4.5 Fischerscope H100-C

Die Härtemessung erfolgte mit dem Mikrohärtemesssystem Fischerscope H 100-C, angelehnt an die Normen DIN EN ISO 14577-1 und DIN EN ISO 14577-4. [31] [32]

Die verwendeten Proben werden unter Normklima ($23 \pm 1^\circ\text{C}$ / $50 \pm 10\%$ rel.LF) gelagert und sind während der Messung frei von Verunreinigungen. Außerdem muss das Gerät während der gesamten Messdauer frei von Stößen, Erschütterungen, Luftbewegungen und Temperaturschwankungen sein.

Die durch die Messung erhaltenen, für die Arbeit relevanten Messgrößen sind die Martenshärte HM_k und das Kriechen C_{IT} .



Abbildung 27: Fischerscope H 100-C

4.5 T – Bend

Ein wichtiger Aspekt bei bandbeschichtetem Material ist, ob die Beschichtung für den Grad der Umformung, welche durch den Formgebungsprozess festgelegt wird, geeignet ist. Unterschiedliche Beschichtungen definieren sich durch spezifische Eigenschaften wie zum Beispiel Haftung, Biegsamkeit, Elastizität und Härte. Manche Beschichtungen halten einer sehr starken Umformung stand, wie sie beispielsweise beim Flachfalz auftritt, andere dagegen nicht. Leider können nicht immer in jeder Hinsicht optimale Merkmale kombiniert werden. Es ist jedoch immer möglich eine Alternative zu finden welche den Anforderungen genügt. [33]

4.5.1 T-Bend Test

Diese Prüfung dient dazu, die Flexibilität des Lacksystems unter Biegebeanspruchung zu ermitteln. [33]

Der Test wird in Anlehnung an die DIN EN 13523-7 durchgeführt. Bei dem Verfahren wird die Probe zwischen den Backen eines Schraubstockes eingespannt. Dabei ist die beschichtete Fläche dem Prüfer zugewandt, sodass sich diese an der Außenseite der Biegekante befindet. Die 180° Biegung geschieht dann innerhalb von 1 bis 2 Sekunden. Anschließend erfolgt die Auswertung beziehungsweise Begutachtung auf Risse unter dem Mikroskop mit 10-facher Vergrößerung. Des Weiteren kann mit diesem Test auch die Widerstandsfähigkeit gegen Verlust der Lackhaftung geprüft werden. Dabei wird auf der Biegekante TESA Klebeband angedrückt und anschließend durch ruckartiges Abziehen wieder entfernt. Wenn bei der Begutachtung festgestellt wird, dass sich Lackpartikel auf dem Klebeband befinden oder Risse auf der Biegekante zu sehen sind, so ist eine weitere Biegung notwendig. Als Ergebnis wird der kleinste Radius in T angegeben bei dem der Probenkörper ohne Rissbildung gebogen werden kann. Bei der Haftungsprüfung wird ebenfalls der kleinste Radius in T angegeben bei dem der Probenkörper ohne Enthftung gebogen werden kann.

Probenvorbereitung

Bei Anlagenmaterial erfolgt die Probenahme quer zur Bandlaufrichtung, so, dass die Biegekante in Bandlaufrichtung liegt. Das bandbeschichtete Material wird vor dem Test mindestens 24 h bei Labortemperatur und Laborraumluftfeuchte gelagert (23°C und 47 % Luftfeuchtigkeit). Ferner müssen die Beschichtungen frei von Öl oder anderen Fremdstoffen, welche die Dehnbarkeit der Beschichtung oder die Haftfestigkeit beeinflussen, sein. [34]

Bei der Angabe der T-Werte gibt es jedoch Unterschiede, so haben die European Coil Coating Association (ECCA) und die National Coil Coating Association (NCCA) die Biegsamkeit und Haftung in 2 unterschiedlichen Skalen definiert. [35]

ECCA Index (DIN EN 13523 Teil 7)	NCCA Index	Biegeversuch	ϵ (%) nach (1)
0 T	0 T		> 100
0,5 T	1 T		≈ 50
1 T	2 T		≈ 33
1,5 T	3 T		≈ 25
2 T	4 T		≈ 20
2,5 T	5 T		≈ 17

Abbildung 28: T-Bend Zuordnung nach ECCA und NCCA Skalen [35]

4.5.2 Randfaserdehnung

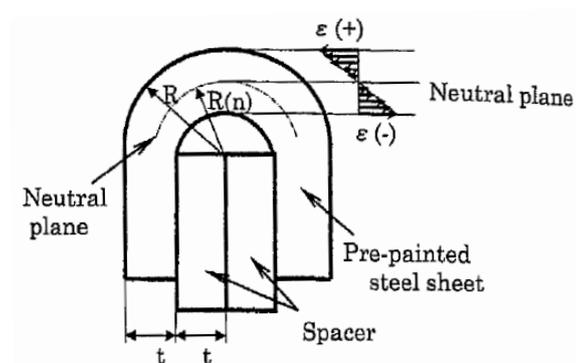


Abbildung 29: Randfaserquerschnitt [36]

Abbildung 29 zeigt den Querschnitt einer 180° Biegung mit den wichtigsten Kenngrößen.

Radius der neutralen Faser - R(n)

$$R(n) = \frac{1}{2} * (1 + T)t$$

T ... Anzahl der Spacer

t ... Dicke des bandbeschichteten Materials

Radius der Randfaser - R

$$R = \frac{1}{2} * (2 + T)t$$

T ... Anzahl der Spacer

t ... Dicke des bandbeschichteten Materials

Dehnung der Randfaser - ε

$$\varepsilon = \frac{2\pi R - 2\pi R(n)}{2\pi R(n)}$$

Geht man davon aus, dass der Querschnitt halbkreisförmig ist und das Substrat in der Mitte nicht gedehnt wird, so kann die Dehnung in der Randfaser durch Substitution der oben genannten Gleichungen wie folgt berechnet werden.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{2\pi R - 2\pi R(n)}{2\pi R(n)} = \frac{R - R(n)}{R(n)} = \frac{(t + 0,5Tt) - (0,5t + 0,5Tt)}{(0,5t + 0,5Tt)} = \frac{1}{T + 1}$$

Nun kann für beliebige T-Werte die Dehnung in der Randfaser berechnet werden:

Tabelle 2: Berechnete Werte für die Dehnung als Funktion des T-Wertes

T [EN]	Dehnung [%]
0,0	100
0,5	50
1,0	33
1,5	25
2,0	20
2,5	17
3,0	14
3,5	13
4,0	11

4.5.3 Abbildung des Biegeversuchs bis zur 2-T Biegung

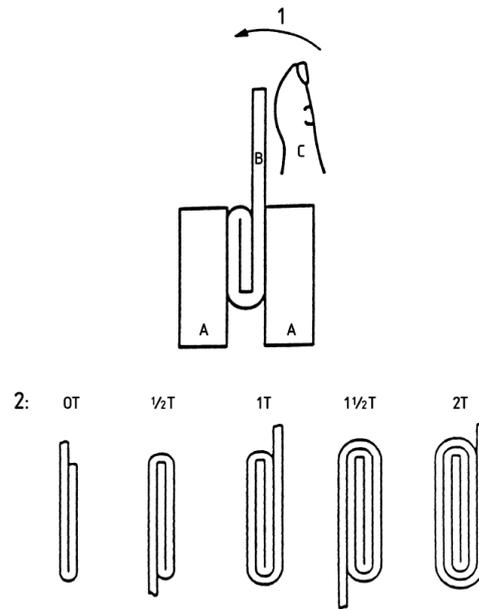


Abbildung 30: Biegeversuch bis zur 2-T Biegung [37]

A ... Klemmbacken

B ... Probenkörper

C ... Daumen

1 ... Bewegungsrichtung

2 ... T – Biegung

4.6 Kratzfestigkeit

Die Kratzfestigkeit wird laut DIN EN ISO 12137-2 als Widerstandsfähigkeit der Oberfläche einer Beschichtung gegen Markierungen oder andere Schäden als Ergebnis der Einwirkung eines festgelegten Stichels, der über die Oberfläche geschoben wird, definiert.

Folgende Schäden wurden in der Norm festgelegt:

- plastische Verformung
- Schädigung der Oberfläche
- Oberflächenkratzer
- Kohäsionsbruch
- Kombinationen der vorstehenden Schäden

Die Prüfung der Kratzfestigkeit erfolgt nach den Normen DIN EN ISO 1518 und DIN ISO 12137-2 und wird bei einer Temperatur von 23 ± 2 °C und einer relativen Luftfeuchte von 50 ± 5 % durchgeführt. Die Prüfung erfolgte mit einem Gerät (Abbildung 31) welches von der voestalpine Stahl GmbH konstruiert wurde. Die Apparatur ist mit einem Van Laar Ritzstichel (Kugeldurchmesser 1 mm) ausgestattet.



Abbildung 31: Kratzfestigkeitsprüfung voestalpine Stahl GmbH

Bei der Prüfung werden Proben mit einer Abmessung von 100 x 150 mm, welche mit einem Magnettisch auf dem Gerät fixiert werden, verwendet. Zu Beginn sollte das Prüfgewicht so gewählt werden, dass ein Durchritzen bis auf das Substrat erfolgt. Anschließend senkt man die Last so weit, dass die Beschichtung nicht mehr durchgeritzt wird. Das Prüfgewicht wird dann in 1 N Schritten erneut gesteigert, bis

60% der Ritzlänge auf das Substrat durchgeritzt sind. Die geringste Last bei der der Stichel die Beschichtung noch nicht durchdringt wird dokumentiert. Der Stichel ist nach jedem Ritzvorgang zu reinigen und die Prüfung muss mindestens 3-mal durchgeführt werden. [38] [39]

4.7 Konfokalmikroskopie

Im Gegensatz zu herkömmlichen Lichtmikroskopen werden bei einem Konfokalmikroskop unscharfe Bildinformationen aus dem Konfokalbild ausgefiltert. Somit gelangt nur Licht aus der Fokusebene auf die Kamera und trägt zum Signal der Konfokalkurve bei. Durch diese Technik erreicht man Höhenauflösungen von wenigen Nanometern. [40]

4.7.1 Messprinzip

Da alle Messungen mit dem Konfokalmikroskop der Firma NanoFocus AG gemacht wurden, wird im speziellen der Aufbau von den Nanofocus Konfokalmikroskopen näher erläutert. Abbildung 32 zeigt den schematischen Aufbau der NanoFocus μ surf Technologie. Der Aufbau beinhaltet ein LED-Licht welches durch die Multi-Pinhole-Disc (MPD) und das Objektiv auf die Probenoberfläche fokussiert wird. Das reflektierte Licht wird an der Punktöffnung der MPD auf den Fokusanteil reduziert. In weiterer Folge fällt das Licht auf die CCD-Kamera und wird dort detektiert. In der Darstellung sieht man die Abbildung eines Oberflächenpunktes durch eine Lochblende (Pinhole) der MPD. Die von der Nanofocus AG patentierte Multi-Pinhole-Disc zeichnet sich durch eine spezielle Anordnung von Lochblenden aus. Durch die Rotation der Scheibe wird die gesamte Probenoberfläche gescannt.

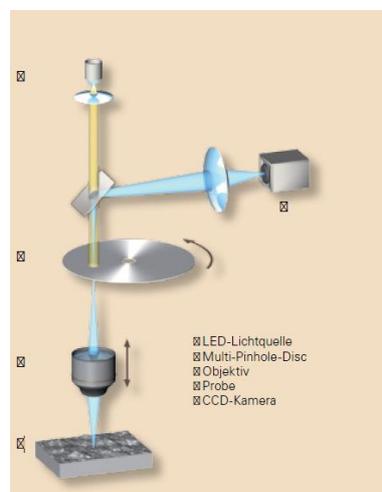


Abbildung 32: Messaufbau NanoFocus [41]

4.7.2 Konfokalkurve

Wie bereits erwähnt enthält ein normales Mikroskopbild scharfe und unscharfe Bildanteile. Beim Konfokalsystem werden unscharfe Bildanteile (Streulicht) durch die Blendenwirkung der MPD ausgefiltert (Defokus). Somit gelangt nur Licht aus der Fokusebene auf die CCD Kamera und trägt zum Signal der Konfokalkurve bei. Die Höhenwerte berechnen sich aus dem Fokusbereich der Konfokalkurve.

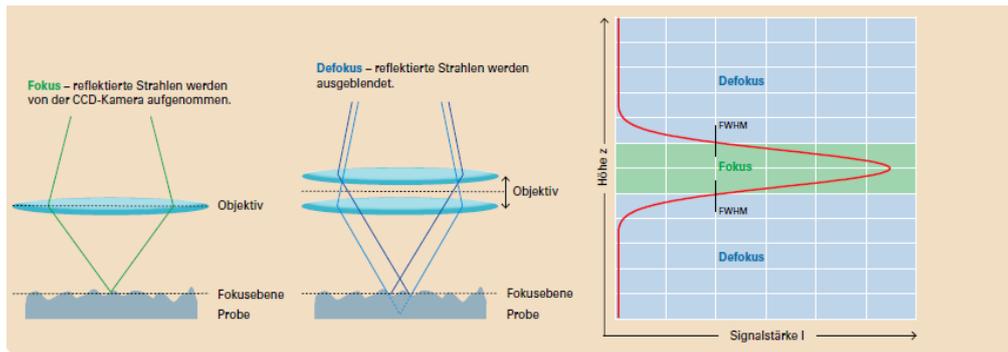


Abbildung 33: Signalstärke [41]

4.7.3 Konfokaler Bildstapel

Jedes Konfokalbild stellt einen horizontalen Schnitt durch die Topografie der Probe dar. Durch die Aufnahme von Bildern in unterschiedlichen Höhenlagen ergibt sich ein sogenannter Bildstapel. Dieser Vorgang wird durch eine präzise vertikale Verschiebung des Objektivs mittels eines Piezoverstellers ermöglicht. Im Mittel werden 200 bis 400 Konfokalbilder pro Sekunde aufgenommen.

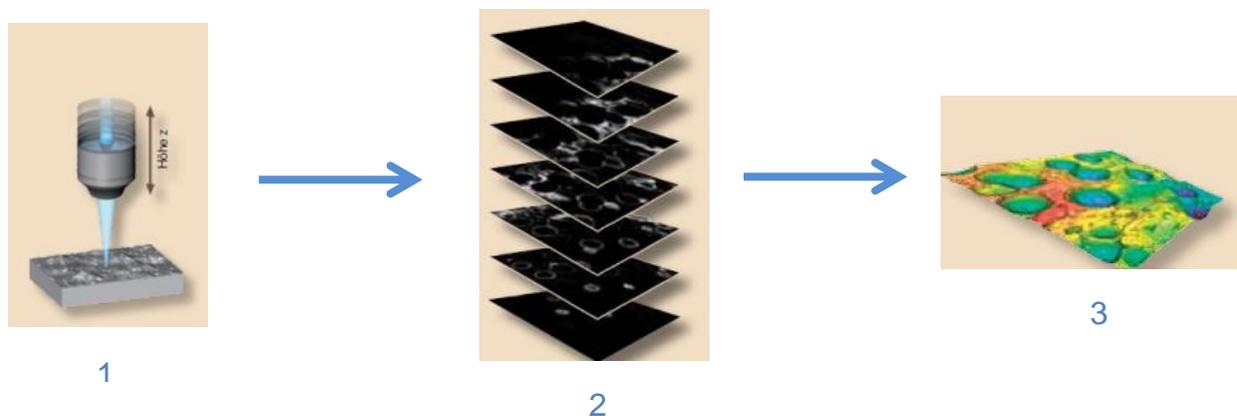


Abbildung 34: Bilderstellung [41]

1. Messvorgang: Das Objektiv wird mittels Piezoversteller in der Höhe verschoben.
2. Bildstapel: Bis zu 1000 konfokale Einzelbilder werden aufgenommen.
3. Messergebnis: Aus dem Bildstapel wird die Oberflächentopografie rekonstruiert.

4.7.4 Quantitative Analyse mit MountainsMap[®] von DigitalSurf

Im Zuge der Datenanalyse werden die Messwerte in das Programm MountainsMap übertragen und anschließend als *Studienobjekt* mit verschiedenen *Operatoren* und *Studien* bearbeitet. Unter *Studienobjekt* werden alle Daten bezeichnet, die analysiert werden können und in einer Datei gespeichert werden können.

Operatoren

Unter Operator versteht man eine mathematische Transformation die auf ein Studienobjekt angewandt wird, um daraus ein anders Studienobjekt abzuleiten, wobei das anfängliche Objekt beibehalten wird. Das einfachste Beispiel hierfür ist der Zoom. Dieser ermöglicht es, einen Teil eines Studienobjekts vom Typ der Oberfläche hervorzuheben. Wird der Operator auf einer Oberfläche angewandt, so erstellt man eine neue Oberfläche.

- Operator – Ausfüllen nicht-gemessener Punkte: Der Operator kommt dann zum Einsatz wenn die Oberfläche nicht-gemessene Punkte enthält, welche in weiterer Folge rekonstruiert werden sollen. Diese fehlenden Datenpunkte können entweder bei der Messung oder durch die Anwendung eines anderen Operators entstehen. Nicht-gemessene Punkte können durch eine den Nachbarpunkten angepasste geglättete Form oder einen konstanten benutzerdefinierten Wert ersetzt werden. Bei der ersten Methode werden die nicht-gemessenen Punkt durch den Vergleich mit den gültigen Nachbarpunkten bestimmt. Diese Methode ist praktisch nicht sichtbar und daher sehr effizient. Bei der zweiten Methode werden die Punkte durch einen konstanten Wert ersetzt, der entweder dem höchsten Punkt, der gemittelten Höhe der Datenpunkte oder dem niedrigsten Punkt der Umgebung entspricht. Sollen die nicht gemessenen Punkt weiterhin sichtbar sein so benutzt man diese Methode.

- Operator – Form filtern: Durch diesen Operator kann die allgemeine Form einer Oberfläche mathematisch entfernt werden. Der gefilterte Teil, bestehend aus Welligkeit und Rauigkeit, kann in weiterer Folge noch separat bearbeitet werden. Bei diesem Prozess wird versucht mit einer langsam variierenden mathematischen Funktion wie zum Beispiel einem Polynom kleinen Grades oder einem Kreis oder einer Kugel der Form der Oberfläche so nahe wie möglich zu kommen. Die Annäherung wird dann als Form bezeichnet und wird von der gemessenen Oberfläche subtrahiert. Prinzipiell kann die Form mit folgenden drei Methoden entfernt werden:
 - Unterdrückung einer Kugelform
 - Unterdrückung einer Zylinderform
 - Unterdrückung einer beliebigen Form durch polynomische Näherung

Für diese Arbeit ist jedoch nur die zum Schluss genannte Methode von Bedeutung. Bei der Unterdrückung einer beliebigen Form durch polynomische Näherung wird das Polynom mit dem vom Anwender definierten Grad gesucht, welches die beste Annäherung an die Oberfläche darstellt. Wichtig ist dabei, dass man sich auf kleine Polynomgrade beschränken sollte. Bei Polynomen höheren Grades steigt die Berechnungszeit und je höher die Gradzahl ist desto mehr wird von Welligkeit und somit von der Form entfernt. In der Praxis wird eine Gradzahl von 2 in den meisten Fällen als ausreichend erachtet. Eine Gradzahl über 5 wird so gut wie nie verwendet. Das Polynom n-ten Grades wird für eine Oberfläche $z = f(x,y)$ folgendermaßen berechnet:

$$Z_n(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_{ij} x^i y^j$$

mit $i + j < n$

MountainsMap[®] berechnet die Koeffizienten $a_{i,j}$ automatisch mit der Methode der kleinsten Quadrate, somit braucht der Anwender nur den besten passenden Grad n

des Polynoms angeben, der die Komplexität der zu entfernenden Form bestimmt. Durch die Subtraktion eines Polynoms 1. Grades wird die Neigung herausgefiltert. Ein Polynom 2. Grades kann die Bogenform einer Oberfläche entfernen. Generell gilt, je höher die Gradzahl, desto komplexer die Form, und desto mehr wird von der Welligkeit und somit von der Form entfernt.

Studien

Studien dienen dazu um die gemessenen Studienobjekte graphisch darzustellen oder zu analysieren.

- Studie – 3D Ansicht Oberfläche: Diese Studie ermöglicht eine 3-D Ansicht der Oberfläche. Man kann zwischen verschiedenen Farbpaletten, Darstellungstypen und Materialien wählen.
- Studie – Stufenhöhenmessung Oberfläche: Mit diesem Tool können Höhen- und Neigungsunterschiede zwischen zwei definierten Ebenen auf einer Oberfläche ermittelt werden.

4.7.5 NanoFocus μ surf mobile



Abbildung 35: Konfokalmikroskop μ surf mobile [43]

Alle Messungen wurden mit dem Konfokalmikroskop μ surf mobile durchgeführt. Das Mikroskop wurde vor jeder Messung mit einem Einkristall als Geometriereferenz kalibriert.

5 Experimenteller Teil und Diskussion

5.1 Widerstand gegen mechanische Beschädigungen (Kratzfestigkeit)

5.1.1 Proben

Für Beschichtungen im Hausgerätebereich ist der Widerstand gegen mechanische Einwirkungen von besonderer Bedeutung, da das Erscheinungsbild über Jahre hinweg gewahrt unversehrt bleiben soll.

Die entsprechenden Untersuchungen wurden überwiegend an Serienmaterial durchgeführt. Ziel war es, die mechanischen Eigenschaften mit Hilfe von Schnelltests zu charakterisieren und in weiterer Folge mit dem Normprüfgerät ABREX[®]-CE reproduzierbare Ergebnisse zu erarbeiten und diese miteinander zu vergleichen.

Tabelle 3: Kenndaten der Proben

Pr – Nr.	Bd – Nr.	SKZ	BKZ A1	BKZ A2	Lacktyp BKZ A2	Farbe	Oberfläche
27	751211	291026	10050	910126	SP	Weiß	glatt
28	722027	290075	06001	950196	SP	Grau	glatt
29	761582	290867	50027	950234	SP	Weiß	glatt
30	757228	291090	50006	935006	PUR	Weiß	strukturiert
31	767596	290763	50006	950223	PUR	Weiß	strukturiert
32	733450	270695	50006	750043	SP	Dunkelgrau	strukturiert
33	751849	290847	50006	950234	SP	Weiß	strukturiert
34	747831	210285	10050	110064	SP	Perlweiß	glatt
35	747831	210285	50027	150041	SP	Perlweiß	glatt
67	739505	290908	950266	050039	SP	Feinsilber	glatt
68	767485	290827	950256	050042	PUR	Edelstahlsilber	glatt
69	775450	291109	950316	050047	SP	SS Steel 7959	glatt

5.1.2 Probencharakterisierung durch ausgewählte Schnelltests

Die ausgewählten Proben wurden mit folgenden Tests untersucht:

Kratzfestigkeit (siehe 4.6)

- Probenformat: 100 x 150 mm
- Anzahl der Prüfungen: 3

Mikro Eindringhärte (siehe 4.4)

- Probenformat: 100 x 150 mm
- Anzahl der Prüfungen: 5
- Nach jeder Prüfung wurde die Probe um ca. 10 mm verschoben
- Messprogramm: siehe Tabelle 4

Tabelle 4: Messprogramm Fischerscope H100-C

Krafterhöhung	10 mN / 20 s	Krafterhöhung	10 mN / 20 s
Kriechen	30 s	Relaxation	30 s

Flexibilitätsprüfung mittels T-Bend Test (siehe 4.5)

- Probenformat: 50 x 400 mm
- Anzahl der Prüfungen: 3

Thermo-Mechanische Analyse (siehe 4.3)

- Probenformat: 5 x 5 mm
- Anzahl der Prüfungen: 2
- Messprogramm: siehe Tabelle 5

Tabelle 5: Messprogramm TMA Q400 EM

Heizrampe	10 K/min bis 100°C
Kühlrampe	10 K/min bis 0°C
Isotherm	1 min
Länge messen	Modulierkraft: $\pm 0,0100$ N bei 0,10 Hz
Heizrampe	5 K/min bis 120°C

Die Ergebnisse der Schnelltests finden sich in Tabelle 6 wieder. Einzelmessergebnisse und Standardabweichungen sind im Anhang (Anlage 1) hinterlegt.

Tabelle 6: Ergebnisse der Schnelltests

Pr – Nr.	Kratzfestigkeit KF	Mikroeindringhärte		T-Bend	TMA	
		HMk [N/mm ²]	Kriechen [%]		Tg _{on} [°C]	Tg [°C]
27-16	15	195	9	2,5 T	37,6	44,2
28-16	24	124	19	0 T	32,0	36,8
29-16	26	58	40	0 T	25,7	31,0
30-16	27	138	18	0 T	36,0	42,3
31-16	17	170	17	0 T	37,2	41,4
32-16	21	74	32	0 T	29,8	33,8
33-16	25	70	38	1 T	27,8	32,0
34-16	19	129	20	1,5 T	38,2	45,8
35-16	24	56	36	0,5 T	31,3	35,7
67-16	21	34	28	0 T	27,1	31,9
68-16	23	140	22	0 T	39,6	44,6
69-16	27	167	16	0 T	39,4	45,2

Aus der Tabelle geht hervor, dass sich die Systeme in Härte, Kratzfestigkeit und Flexibilität deutlich unterscheiden. Die erhaltenen Daten wurden mit den Ergebnissen aus Routineuntersuchungen (Anlage 2) der voestalpine in den folgenden Diagrammen kombiniert. Rot markierte Datenpunkte beziehen sich auf die ausgewählten 12 Proben.

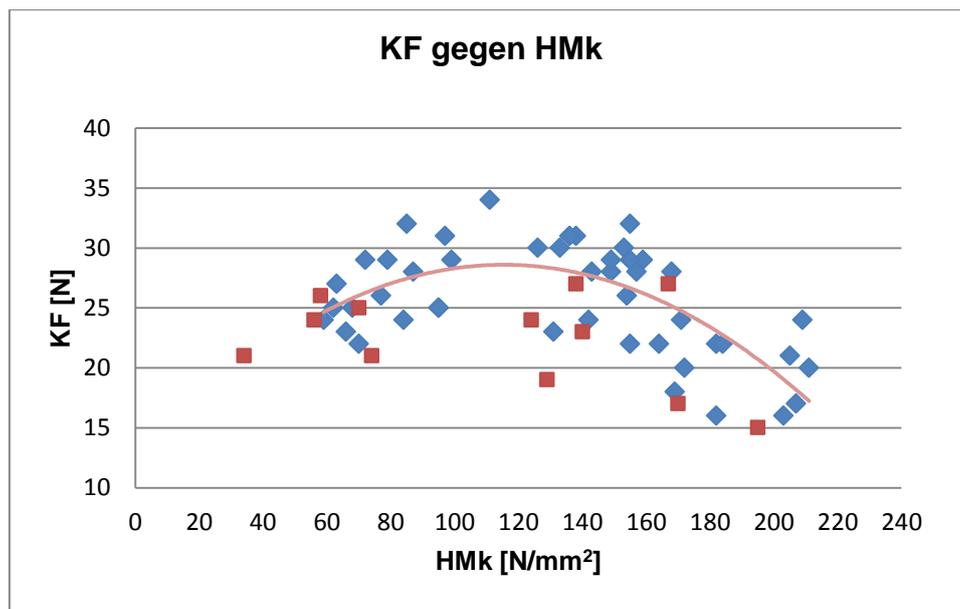


Abbildung 36: Kratzfestigkeit gegen Mikrohärtigkeit

Abb.36 beschreibt den Zusammenhang von Kratzfestigkeit und Mikrohärté. Aus dem Diagramm geht hervor, dass keine direkte Korrelation zwischen Kratzfestigkeit und Mikrohärté besteht. Es können jedoch folgende Aussagen getroffen werden:

- Sehr weiche Systeme ($HM_k = 20 - 70 \text{ N/mm}^2$) haben eine geringere Kratzfestigkeit.
- Steigt die Härte, so erreicht man ein Maximum der Kratzfestigkeit ($90 - 140 \text{ N/mm}^2$).
- Bei sehr harten Systemen (ab 160 N/mm^2) nimmt die Kratzfestigkeit wieder ab.
- Systeme mit hoher Härte neigen zu Sprödebruch.
- Bei Systemen mit niedriger Härte ist der Widerstand der Beschichtung so gering, dass diese leicht durchdrungen werden kann.

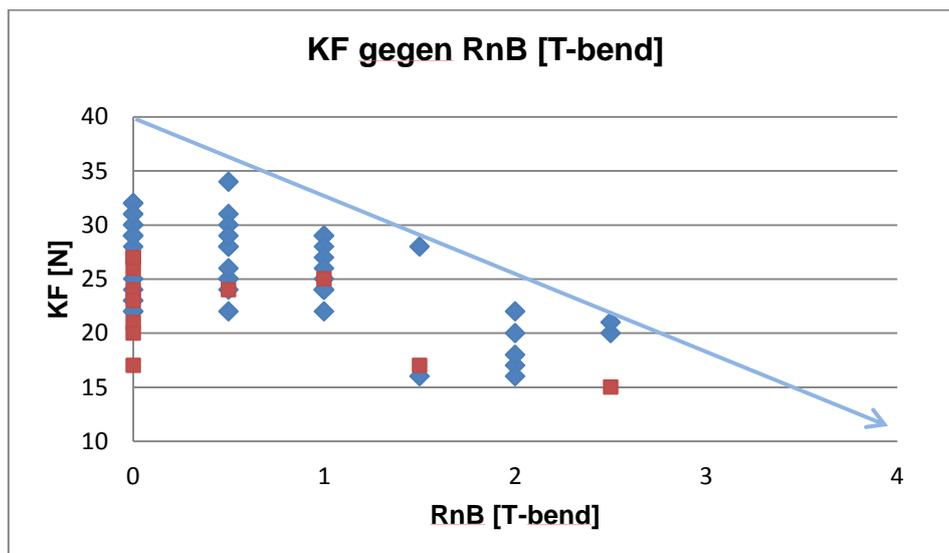


Abbildung 37: Kratzfestigkeit gegen Rissbildung

Abb. 37 soll den Zusammenhang zwischen Kratzfestigkeit und Rissbildung beziehungsweise Flexibilität aufzeigen.

- Die Rissbildung steigt mit sinkender Kratzfestigkeit.
- Sehr spröde Systeme mit hohen T-Bend-Werten, entsprechend einer hohen Rissbildung, zeigen eine geringere Kratzfestigkeit.

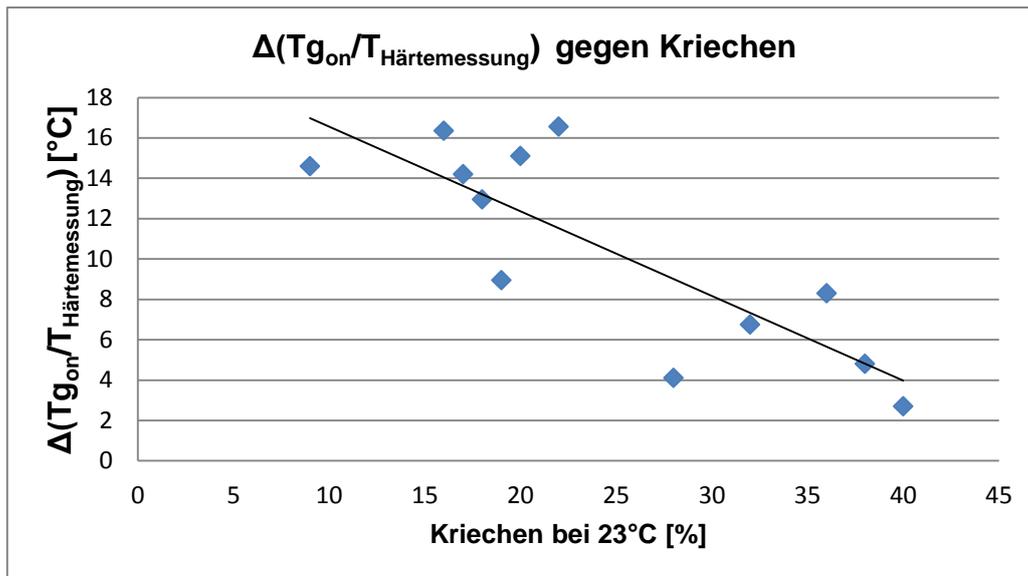


Abbildung 38: Tg_{on} gegen Kriechen

Abb. 38 zeigt den Zusammenhang zwischen Tg_{on} und dem Kriechen bei 23°C. Folgender Trend konnte aus dem Diagramm abgeleitet werden:

- Die Abnahme des Tg 's wird von einer Erhöhung des Kriechens begleitet.

Bei Systemen mit niedrigem Glasübergangsbereich erweicht ein Material schon bei geringen Temperaturen, da Kettensegmente gegeneinander verschoben werden können. Das Polymer geht beim Tg vom harten spröden Zustand in den viskoelastischen Zustand über. Der plastisch verformbare Anteil steigt, was eine Erhöhung des Kriechens zufolge hat.

5.1.3 Methodenentwicklung ABREX[®]-CE

Ziel war es mit diesem Gerät definierte Kratz- oder Abriebspuren auf Lackoberflächen aufzubringen und diese mit einer geeigneten Methode zu charakterisieren. Die Charakterisierungsmethode sollte nicht nur eine vergrößerte Aufnahme der Kratzspur wiedergeben, sondern auch Informationen über die Oberflächentopographie liefern um in weiterer Folge Dimensionen der Kratzspur, wie zum Beispiel Eindringtiefe und Breite zu erfassen.

Wie in Kapitel 4.2 erwähnt bietet ABREX[®]-CE die Möglichkeit eines Fingernagelkratztests mit dem definierte Kratzspuren appliziert werden können. Zu Beginn des Versuchs wurde der mitgelieferte Probenhalter (2) in die Universalhalterung (1) eingespannt. Um die Proben im Format 50 x 200 mm auf dem Probenhalter (2) zu befestigen, wurde dieser mit einem Magnetklebeband versehen. In weiterer Folge wurde der Kratzeinsatzhalter (3) inklusive Kunststoffkratzhülse (4) am ausfahrbaren Prüfarm befestigt.

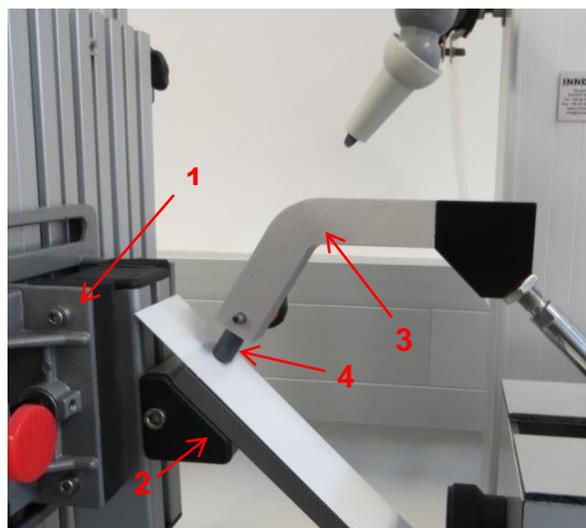


Abbildung 39: Universalhalterung, Probenhalter, Kratzeinsatzhalter, Kunststoffhülse

Die Kenndaten des für die Vorversuche verwendeten Materials sind aus Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Probenkenndaten

Bd – Nr.	SKZ	BKZ A1	BKZ A2	Lacktyp BKZ A2	Farbe	Oberfläche
966615	290522	50006	950148	PUR	Schwarz	strukturiert
956883	290430	50006	950016	SP	Weiß	strukturiert

Um die optimale Prüfposition einzustellen, wurde der Längsschlitten mittels Stellschraube in Richtung des Prüfarms bewegt, sodass das volle Prüfungsgewicht auf der Probe lastete und eine Kratzspur von 10 cm aufgetragen werden konnte.

Beim Kratztest wurde das Gerät im „SCRATCH“-Modus betrieben. Die Prüfung erfolgte mit unterschiedlichen Gewichten (1, 5 und 10N) und Geschwindigkeiten (20 cm/s bzw. 70 cm/s).

Auswertung der Kratzspuren



Abbildung 40: Kratzspur mittels Kunststoffhülse

Wie in Abb. 40 zu erkennen ist, können mit diesem Test nur sehr breite Abriebsbeziehungsweise Kratzspuren (ca. 4 mm) generiert werden, die einen Kratzer durch Fingernägel nicht ähnelt. Somit ist diese Methode unbrauchbar um auf die Kratzfestigkeit von Materialien Rückschlüsse ziehen zu können.

Betrachtet man die von der Kunststoffhülse entstandenen Kratzer beziehungsweise Abriebspuren so ist mit freiem Auge erkennbar, dass dem Material weder eine definierte Kratzspur im Sinne von plastischer Deformation oder Sprödbruch widerfahren ist. Um die Lackoberfläche zu schädigen und dementsprechend zu deformieren wurde der Kratzeinsatzhalter gedreht damit nur ein kleiner Teil der Kunststoffhülse auf der Lackoberfläche aufliegt.



Abbildung 41: Modifikation Kratzeinsatzhalter

Nun sollte es möglich sein die Kratzbreite zu reduzieren und das Material zu deformieren. Bei einer wesentlich dünneren Kratzspur macht es in weiterer Folge auch Sinn eine optische Auswertung mit dem Mikroskop in Betracht zu ziehen.

Die Spuren wurden auch hier mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Prüfgewichten aufgetragen. In Abb. 42 ist nun zu erkennen, dass sich die Breite der Kratzspur deutlich reduziert hat. Bei genauerer Betrachtung sieht man jedoch, dass es sich eher um einen Materialabrieb der Kunststoffhülse handelt als um eine definierte plastische Verformung.



Abbildung 42: Kratzspur mittels Kunststoffhülse – modifiziert

Um die Kratzspur näher zu untersuchen wurde eine optische Auswertung mit dem Mikroskop Olympus BX 61 durchgeführt. Die Bilder in Abb.43 und Abb.44 zeigen die Abriebspur (Prüfbedingungen: 10N, 20 cm/s) unter 50-facher Vergrößerung.

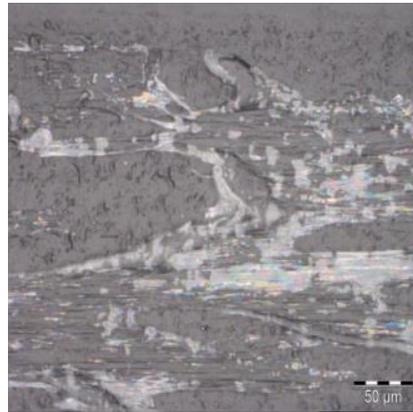


Abbildung 43: Kratzspur unter 50-facher Vergrößerung

Um beurteilen zu können ob tatsächlich Material auf die Lackoberfläche aufgetragen wurde, war eine Betrachtung des Randbereichs (Abb.44) notwendig. Dem Erscheinungsbild zufolge wird das Material etwas gestaucht beziehungsweise komprimiert.

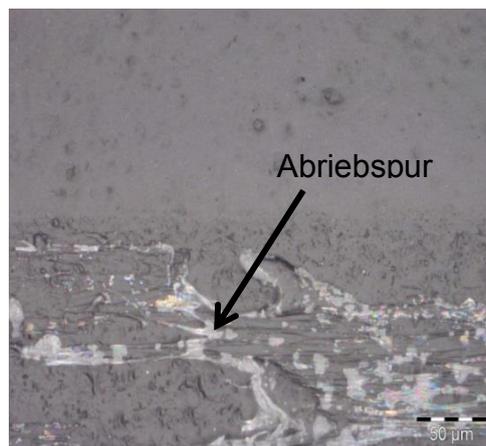


Abbildung 44: Aufnahme vom Randbereich der Abriebspur (50-fache Vergrößerung)

Aus der Tiefenprofilaufnahme (Abb. 45) geht hervor, dass Polymer in der Höhe von etwa 9 µm auf das Material appliziert wurde. Zudem sind keine ausgeprägten Höhenunterschiede im Randbereich zu erkennen. Somit kann man davon ausgehen,

dass die Lackoberfläche nicht ausreichend deformiert wurde um eine definierte Kratzspur zu erzeugen.

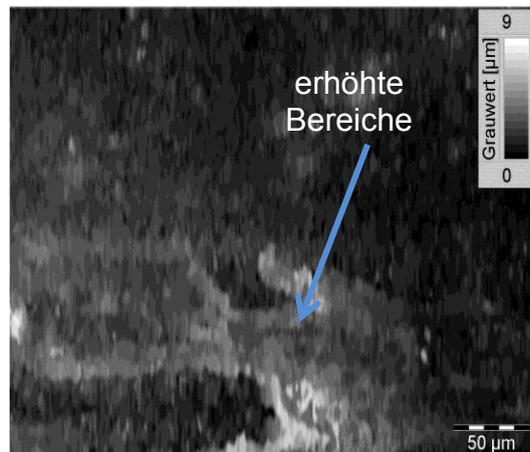


Abbildung 45: Tiefenprofilaufnahme im Randbereich (50-fache Vergrößerung)

Zusätzlich wurde noch ein IR-Spektrum vom Abrieb der Kunststoffhülse aufgenommen. Dabei konnte die Referenz (Kunststoffkratzhülse) als PVC identifiziert werden (Anlage 3, violettes Spektrum), welches mit einer dünnen Schicht Polyamid überzogen ist (Anlage 3, grünes Spektrum). An den Abriebstellen der beiden Lackproben wurden eindeutig Banden der Referenz (PVC) nachgewiesen (Anlagen 4 und 5, rote Spektren).

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Methode mittels Fingernagelkratzaufsatz nicht zum gewünschten Ergebnis geführt hat. Die Verfahrensweise mit der Fingernagelkratzhülse könnte jedoch herangezogen werden um Lackoberflächen bezüglich Materialabrieb zu testen.

Um die Kratzfestigkeit von Materialien beurteilen zu können, ist es notwendig eine definierte Kratzspur zu generieren. Voraussetzung dafür ist eine Prüfspitze mit definierter Geometrie. Wie schon in Kapitel 4.6 erwähnt erfolgt die Prüfung der Kratzfestigkeit in Anlehnung an die Normen DIN EN ISO 1518 und DIN EN ISO 12137-2. Das dabei verwendete Prüfgerät ist eine Eigenkonstruktion der voestalpine Stahl GmbH. Bei der Prüfung wird die Oberfläche mit einem Van Laar Ritzstichel (Kugeldurchmesser: 1mm) gezielt geschädigt.

Ausgehend von diesem Kratztest wurde nun der Kratzsatzhalter des ABREX[®]-CE so modifiziert werden, damit eine Normprüfspitze eingesetzt werden konnte. Um dies zu erreichen wurde mittels 3D - Druck eine Hülse für den Van Laar Ritzstichel angefertigt. (Abb.46).



Abbildung 46: Kratzsatzhalter - modifiziert

Durch den Umbau war es nun möglich Kratzspuren zu erzeugen, welche eine definierte Geometrie aufweisen. Diese sollte in weiterer Folge mit einer Methode im Bezug auf Breite, Tiefe und Länge untersucht werden.

In Abb.47 wurde eine Lackoberfläche (Probe 32-16) mit einer Prüfkraft von 1, 5 und 10N bei einer Geschwindigkeit von 20 cm/s zerkratzt.



Abbildung 47: Kratzspuren (Prüfbedingungen: 1, 5 und 10N; 20 cm/s)

Betrachtet man die Spuren so kann man deutliche Unterschiede zwischen den verwendeten Prüfkräften erkennen. Während bei einer Prüfkraft von 1 N die Kratzspur kaum wahrnehmbar ist, sind die Spuren mit 5 und 10 N deutlich zu erkennen.

Die Kratzspuren wurden wieder mit dem Mikroskop Olympus BX 61 charakterisiert. Abb.48 zeigt eine Aufnahme der Kratzspur unter 20-facher Vergrößerung.

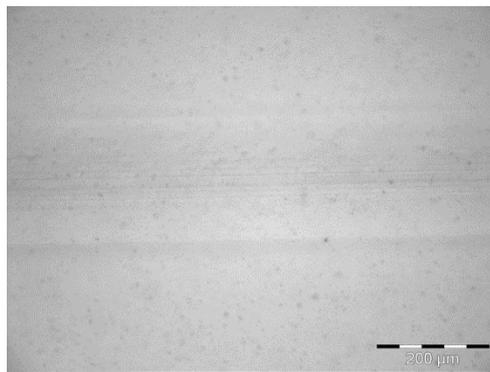


Abbildung 48: Kratzspur unter 20-facher Vergrößerung

Es ist zwar möglich ein ungefähres Höhenprofil (Abb.49) der Kratzspur zu erstellen, für eine genaue Charakterisierung ist dieses Mikroskop jedoch ungeeignet. Um die Dimension der Kratzspuren zu erfassen wurde die Probe mit dem Konfokalmikroskop µsurf mobile von nanofocus untersucht.



Abbildung 49: Höhenprofil / Mikroskop Olympus BX 61 / Sprödbbruch

Tabelle 8: Kenndaten des Mikroskops

Lichtquelle	Hochleistungs-LED $\lambda = 505 \text{ nm}$
Vergrößerung	20x
Messfeld	800 x 800 μm
Numerische Apertur	0,6
Arbeitsabstand	0,9 mm
Auflösung in z-Richtung	4 nm
Auflösung in x,y - Richtung	1,6 μm

Dafür wurde eine Kratzspur mit einer Kraft von 5 N und einer Geschwindigkeit von 20 cm/s auf Probe 29-16 appliziert. Die Kratzspur wurde in Längsrichtung gescannt (Messfeld 0,8 x 30 mm).

Im Zuge der Auswertung wurden folgende Operatoren angewandt:

- Operator – Ausfüllen nicht-gemessener Punkte
- Operator – Form filtern; Unterdrückung einer beliebigen Form durch polynomische Näherung (Polynomgrad: 5)
- Operator – Bereich extrahieren

Um die Daten nun graphisch darstellen zu können wurden folgende Studien angewandt:

- Studie – 3D Ansicht Oberfläche (Überhöhung 6%, Bildausschnitt 0,8 x 3mm)

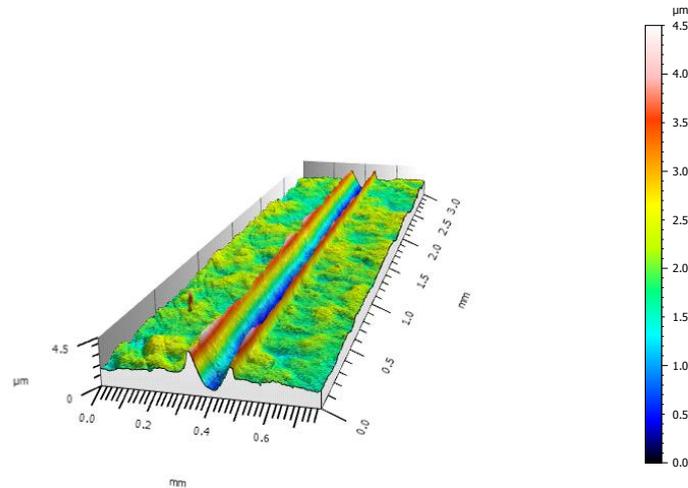


Abbildung 50: Kratzspur 5 N; 20 cm/s

- Studie – Stufenhöhenmessung Oberfläche

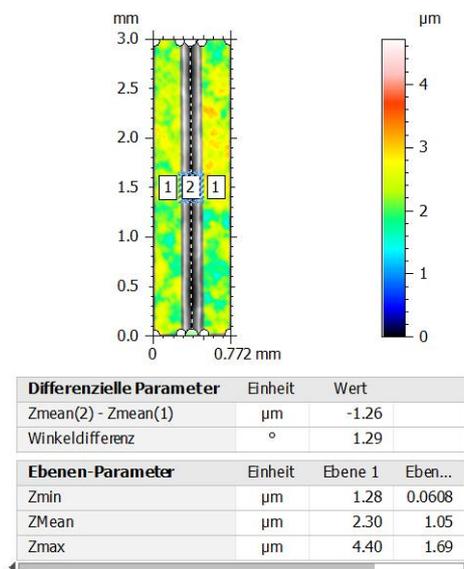


Abbildung 51: Ermittlung der Eindringtiefe

Die erhaltenen Grafiken ermöglichen es nun, Kratzspuren in Bezug auf Oberflächentopographie und Eindringtiefe genau zu charakterisieren.

5.1.4 Kratzfestigkeitsprüfung mit ABREX®-CE

5.1.4.1 Einzelkratztests – visuelle Beurteilung

Um einen Eindruck über die Schädigung der Oberflächen zu bekommen wurden alle Proben mit Hilfe von ABREX®-CE geprüft und anschließend visuell beurteilt. Die Parameter mit denen die Tests durchgeführt wurden, sind der Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9: Prüfparameter ABREX®-CE

Prüfkraft	1N, 5N, 10N
Geschwindigkeit	20 cm/s, 70 cm/s
Modus	SCRATCH

Tabelle 10: Optische Beurteilung der Einzelkratzer

Pr- Nr.	Optische Beurteilung					
	20 cm/s			70 cm/s		
	1N	5 N	10 N	1N	5 N	10 N
27-16	Kratzspur erkennbar	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N	1)	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N
28-16	nicht erkennbar	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N	1)	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N
29-16	Kratzspur erkennbar	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N	1)	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N
30-16	nicht erkennbar	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N	1)	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N
31-16	schwer zu erkennen	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N	1)	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N
32-16	nicht erkennbar	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N	1)	Kratzspur erkennbar	Sprödbbruch

33-16	nicht erkennbar	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N	1)	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N
34-16	Kratzspur erkennbar	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N	1)	Kratzspur erkennbar	Sprödbruch
35-16	Kratzspur erkennbar	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N	1)	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N
67-16	Kratzspur erkennbar	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N	1)	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N
68-16	Kratzspur erkennbar	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N	1)	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N
69-16	Kratzspur erkennbar	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N	1)	Kratzspur erkennbar	Kratzspur deutlicher als bei 5 N

1) visuelle Beurteilung nicht möglich - inhomogene Kratzspur

Erkenntnisse

- Deutliche Kratzer sind bei allen Proben erst ab einer Prüfkraft von 5 N erkennbar.
- Die Beurteilung der Kratzfestigkeit ist daher mit einem Gewicht von 5N und einer Geschwindigkeit von 20 cm/s sinnvoll.
- Strukturierte Oberflächen wirken deutlich unempfindlicher gegenüber Kratzspuren.
- Bei einer Prüfkraft von 1N und einer Geschwindigkeit von 70 cm/s war eine visuelle Beurteilung nicht möglich, da die Kratzspuren in sich nicht homogen waren. Durch die höhere Geschwindigkeit und dem geringem Gewicht von 1N hat die Prüfspitze keinen durchgehenden Kontakt zur Probe. Der Indentor gleitet nicht konstant über die Oberfläche und erzeugt somit keine durchgehenden Kratzspur (Abb. 52).

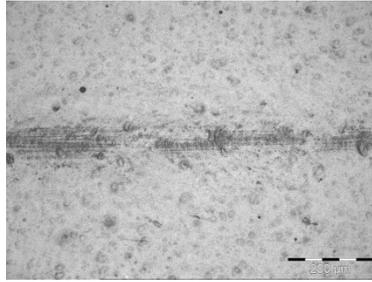


Abbildung 52: Kratzspur, 1N, 70 cm/s, 20-fache Vergrößerung

- Wird die Geschwindigkeit auf 70 cm/s erhöht, so neigen manche Systeme zu Sprödbruch.

5.1.4.2 Einzelkratztests – Eindringtiefe

Um verschiedene Lacksysteme bezüglich Kratztiefe miteinander vergleichen zu können, wurden jeweils 10 Kratzspuren mit einer Geschwindigkeit von 20 cm/s und einer Prüfkraft von 5N auf zwei unterschiedlichen Substraten (Probe 27-16 / Probe 29-16) aufgebracht. Der Scan mit Hilfe des Konfokalmikroskops erfolgte quer zur Kratzrichtung. Auf die Rohdaten wurden die in Kapitel 4.1.4 beschriebenen Operatoren angewandt. Die Auswertung der Einkratztiefe erfolgte mit der Studie Stufenhöhenmessung.

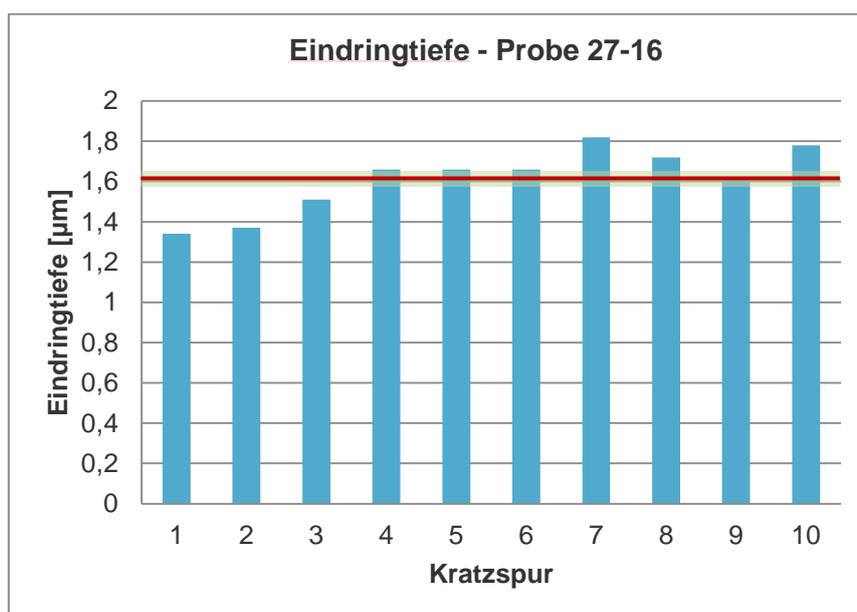


Abbildung 53: Eindringtiefe Probe 27-16

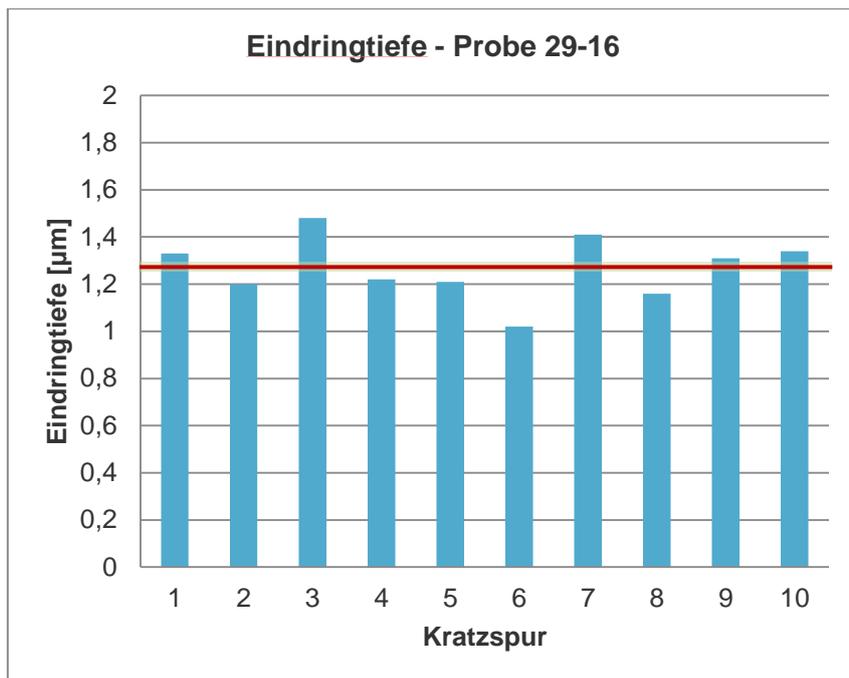


Abbildung 54: Eindringtiefe Probe 29-16

Tabelle 11: Mittelwert der Eindringtiefe und Standardabweichung

	MW Eindringtiefe [μm]	Standardabweichung [μm]	KF [N]
Probe 27-16	1,61	0,16	15
Probe 29-16	1,27	0,13	26

Erkenntnisse

- Die Eindringtiefe innerhalb eines Lacksystems streut um ca. 10%.
- Der Unterschied zwischen den Lacksystemen ist signifikant.
- Vergleicht man die Eindringtiefen mit den Ergebnissen der Kratzfestigkeitsprüfung (Eigenkonstruktion voestalpine Stahl GmbH) so zeigt sich, dass Probe 27-16 eine deutlich geringere Kratzfestigkeit (15 N) hat. Dies korreliert mit der erhöhten Eindringtiefe von 1,61 μm .

5.1.4.3 Einzelkratzttests – glatte / strukturierte Oberflächen

Bei der optischen Beurteilung der Kratzspuren zeigte sich, dass die Sichtbarkeit der Kratzspuren von der Oberflächenstruktur abhängig ist. Um ein besseres Verständnis für diesen Effekt zu bekommen wurden Topographiediagramme von den Kratzspuren erstellt. Im Zuge der Auswertung wurden wieder die Standard Operatoren angewandt. Die Bilderstellung erfolgte mit der Studie 3D Ansicht Oberfläche (Überhöhung 6%, Bildausschnitt 0,8 x 3mm).

Tabelle 12: Prüfparameter ABREX®-CE

Prüfkraft	1N, 5N, 10N
Geschwindigkeit	20 cm/s
Modus	SCRATCH

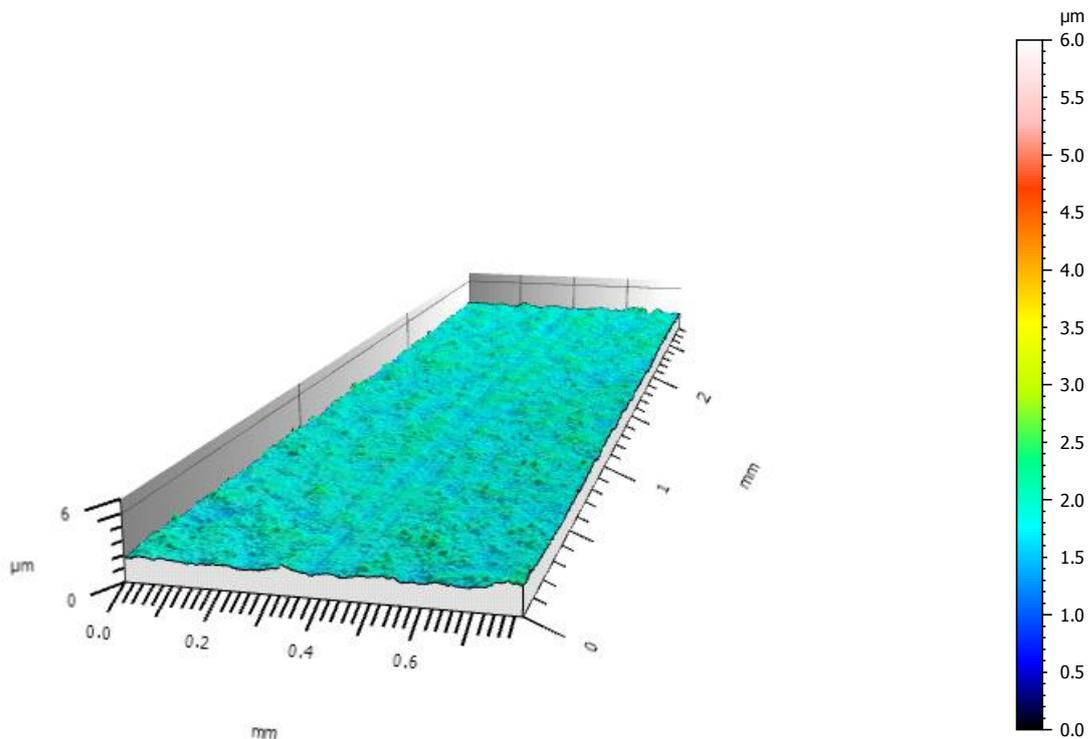


Abbildung 55: Probe 29-16; Prüfkraft 1N

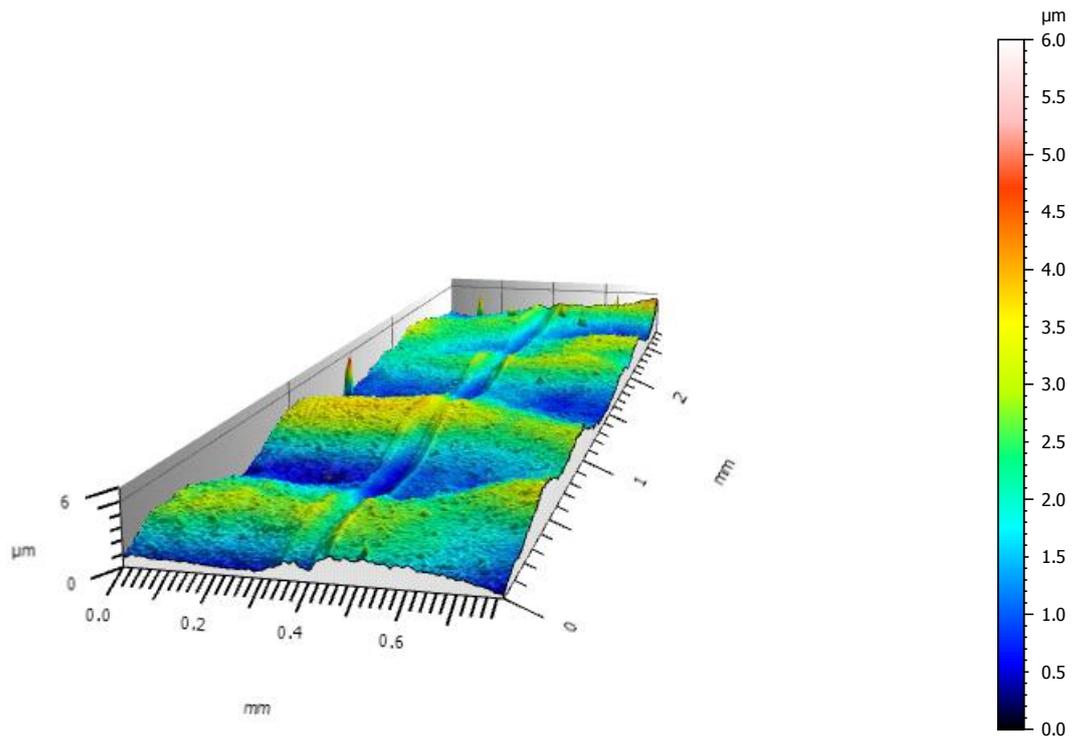


Abbildung 56: Probe 31-16; Prüfkraft 1N

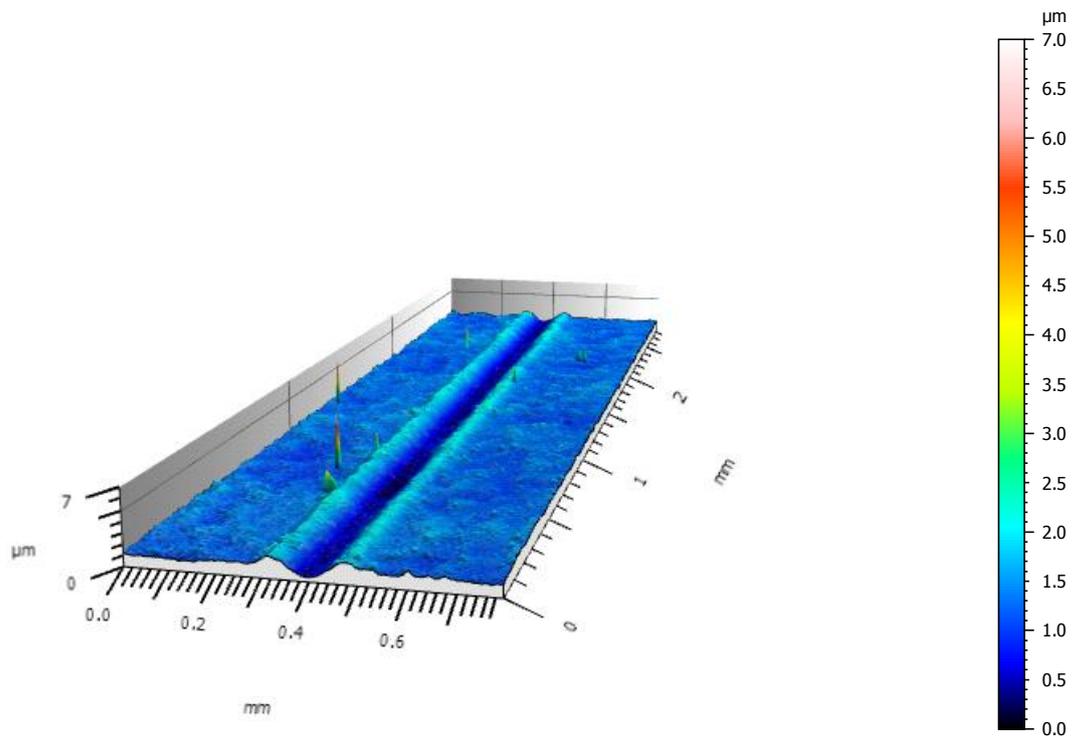


Abbildung 57: Probe 29-16; Prüfkraft 5N

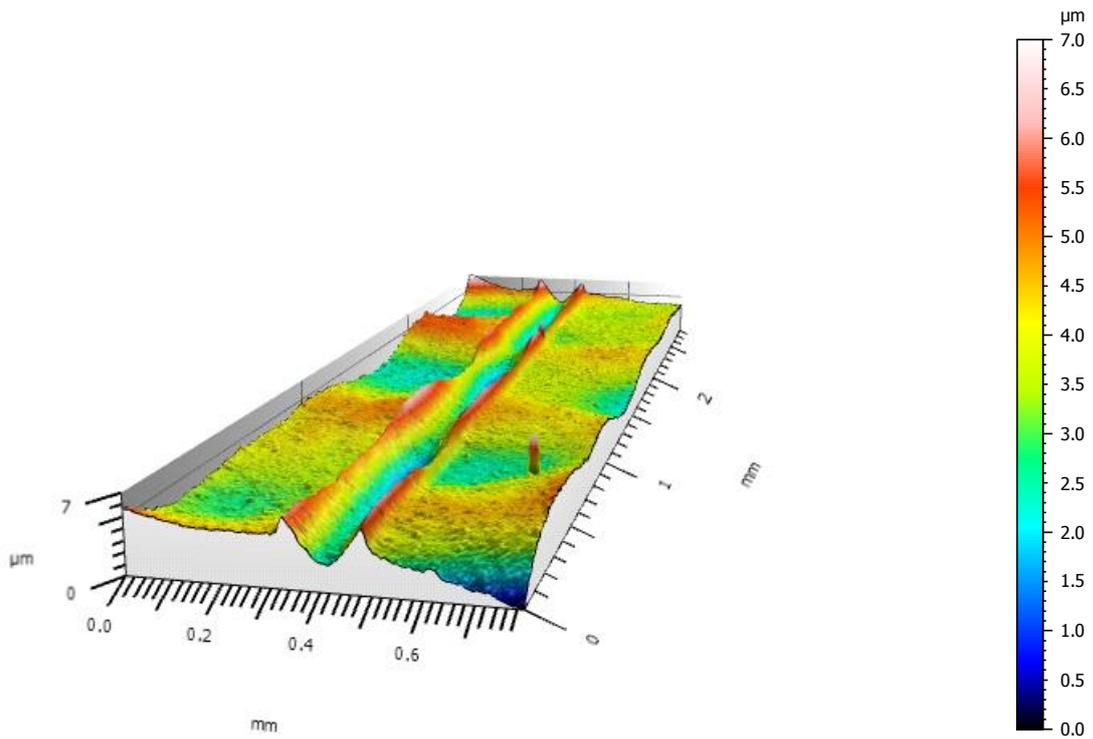


Abbildung 58: Probe 31-16; Prüfkraft 5N

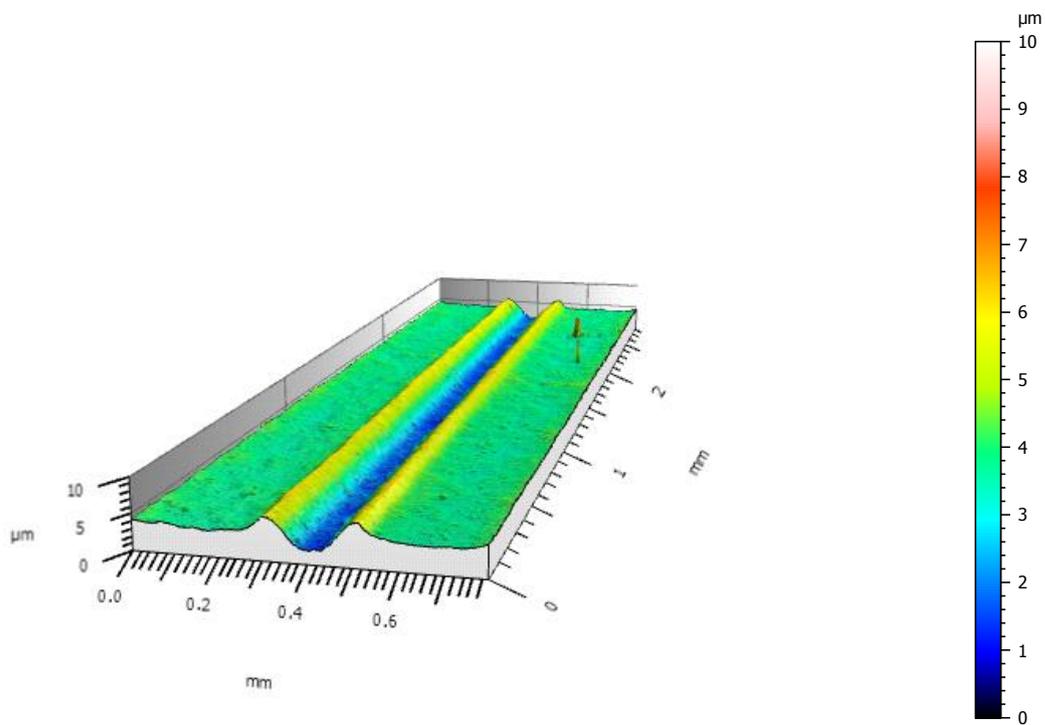


Abbildung 59: Probe 29-16; Prüfkraft 10N

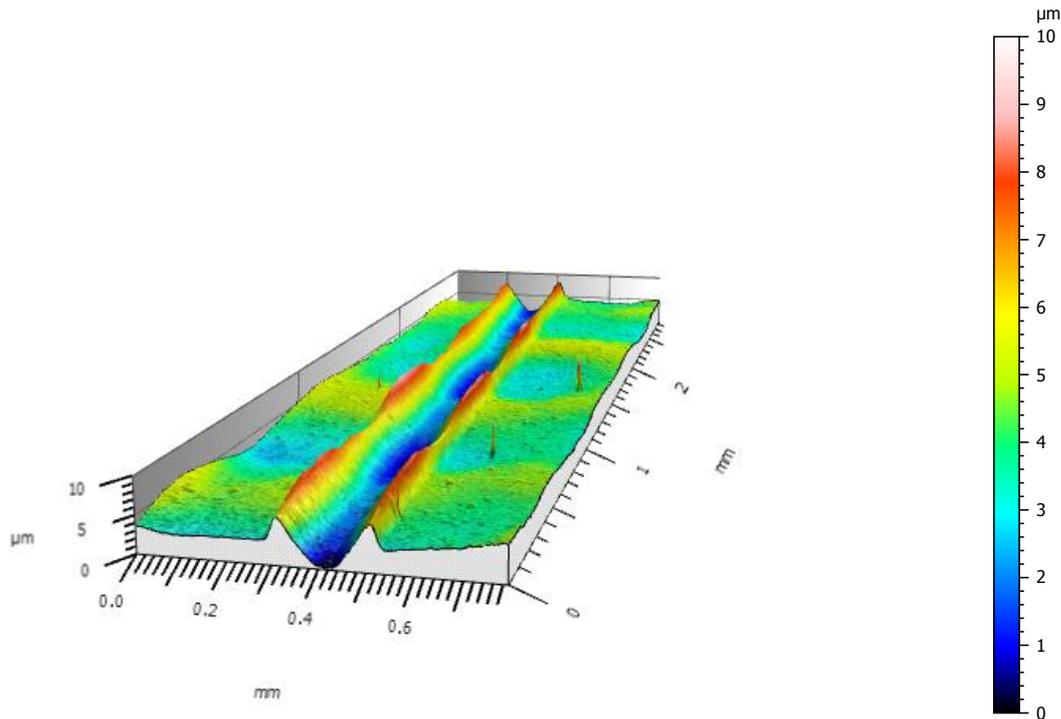


Abbildung 60: Probe 31-16; Prüfkraft 10N

Erkenntnisse

- Obwohl die Kratzspur bei einer Prüfkraft von 1N bei Probe 31-16 wesentlich intensiver wirkt, war diese bei der optischen Beurteilung kaum zu sehen. Die Kratzspur wird durch die strukturierte Oberfläche kaschiert.
- Die Profile der Kratzspuren unterscheiden sich deutlich. Bei Probe 29-16 wirken die entstandenen Wülste eher abgerundet beziehungsweise flach. Probe 31 zeigt eine scharfkantige Geometrie der erhabenen Bereiche.

5.1.5 Kratzfestigkeit bei variablen Feuchtebedingungen

5.1.5.1 Einzelkratztests nach Wasserlagerung

Um den Einfluss von Feuchtigkeit auf die Kratzfestigkeit zu untersuchen wurden die Proben 27-16 und 35-16, für 24 h lang in Wasser bei 23°C gelagert und anschließend mit ABREX®-CE geprüft. Es wurden jeweils 3 Kratzspuren auf das Material appliziert.

Die Analyse mit Hilfe der Konfokalmikroskopie wurde direkt im Anschluss durchgeführt. Dabei wurden die Kratzspuren in Längsrichtung gescannt (Scanbereich 0,8 x 30mm). Die Auswertung erfolgte analog der Vorgehensweise in Kapitel 4.1.4.3.

Tabelle 13: Prüfparameter ABREX®-CE

Prüfkraft	5N
Geschwindigkeit	20 cm/s
Modus	SCRATCH

Zusätzlich wurden auch trockene beziehungsweise bei Normklima gelagerte Proben untersucht. Mit Hilfe der Auswerte Software MountainsMap® wurden alle Kratzspuren in Bezug auf Oberflächentopografie und Eindringtiefe untersucht. Dabei konnte kein Unterschied zwischen den in Wasser und den bei Normklima gelagerten Proben festgestellt werden. Da die Darstellung der 3 cm langen Kratzspuren zu unübersichtlich ist, sind in den folgen Abbildungen jeweils nur repräsentative 3-mm Ausschnitte zu sehen.

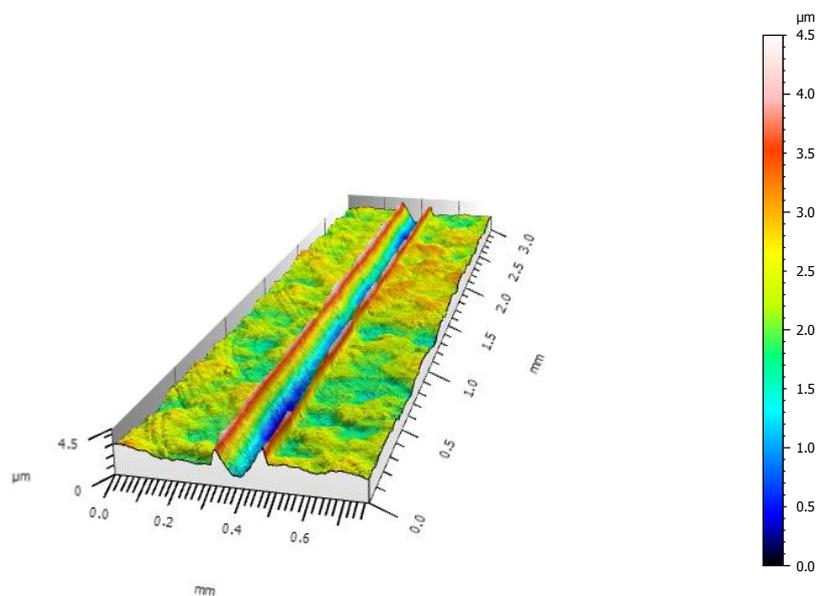


Abbildung 61: Probe 27-16, Normklima

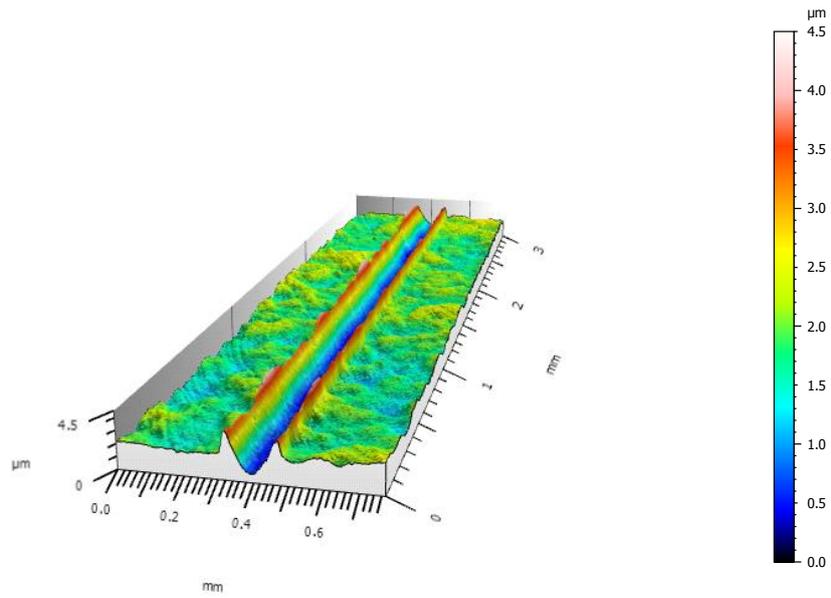


Abbildung 62: Probe 27-16, Wasserlagerung

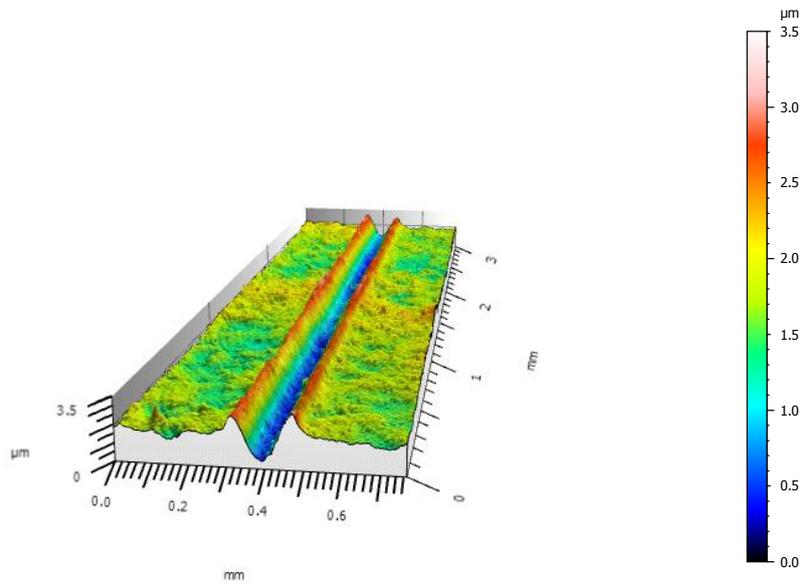


Abbildung 63: Probe 35-16, Normklima

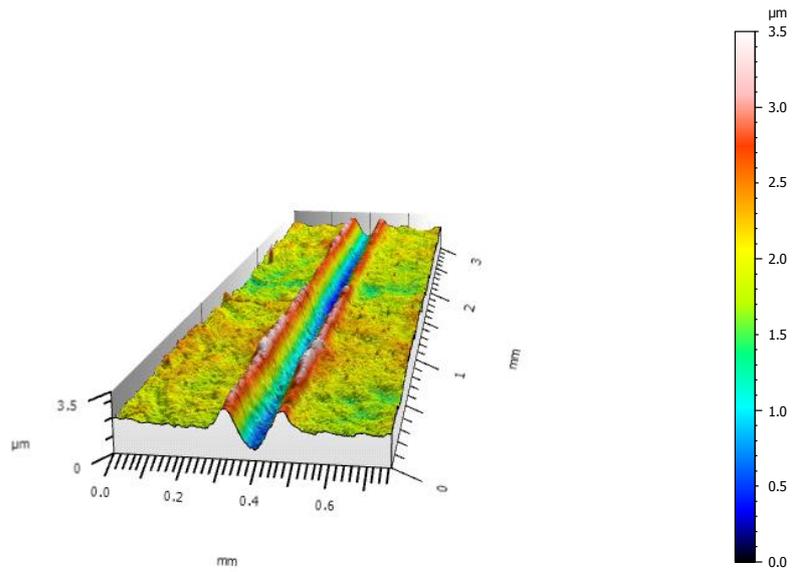


Abbildung 64: Probe 35-16, Wasserlagerung

Weitere Topografiediagramme finden sich im Anhang (Anlage 6) wieder.

Erkenntnisse

- Die Wasserlagerung bei 23°C hat keinen Einfluss auf die Kratzfestigkeit.
- Das Erscheinungsbild der Kratzspur verändert sich nicht wesentlich.

5.2 Antifingerprinteigenschaften

5.2.1 Methodenentwicklung Fingerabdruck

Ziel war es, eine Methode zu entwickeln mit der ein reproduzierbarer künstlicher Fingerabdruck auf Lackoberflächen aufgebracht werden kann. Die Methodenentwicklung geschah in Anlehnung an die BMW Norm PR 506. Diese Norm wird dazu verwendet um Fingerabdrücke auf die Oberflächen von Kfz-Innenausstattungssteilen aufzubringen, die Intensität der Abdrücke zu beurteilen und in weiterer Folge die Reinigungseigenschaften zu prüfen.

Die Applikation der Fingerabdrücke erfolgt mit einer Universalprüfmaschine bei der Geschwindigkeit und Anpressdruck eingestellt werden können. Als Prüfmedium wird ein Mix aus alkalischem Kunstschweiß, Paraffinöl, Lecithin und Gelbildner verwendet.

Versuchsdurchführung laut Norm

- Im ersten Teil der Versuches wird mit Hilfe einer Pipette das Prüfmedium (0,7 mL) auf die markierte Stempelkissenfläche aufgebracht.
- Das Prüfmedium wird mit einer Rakel oder einer Kunststoffspachtel gleichmäßig innerhalb der markierten Stempelkissenfläche verteilt. Die Einwirkzeit auf das Stempelkissen beträgt 2 bis 4 min.
- Die Stempelkissenfläche ist nur einmal pro Fingerabdruck zu verwenden.
- Der in eine Universalprüfmaschine eingespannt Silikonstempel wird mit einer Verfahrensgeschwindigkeit von 40 mm/min bis zu einer Anpresskraft von $30\text{ N} \pm 3\text{N}$ auf den mit der Prüfflüssigkeit getränkten Filz gedrückt und 5 Sekunden gehalten.
- Anschließend wird der Stempel zurückgefahren.
- Dadurch erfolgt ein gleichmäßiger Auftrag der Prüfflüssigkeit auf den Silikonstempel.
- Der mit der Prüfflüssigkeit benetzte Silikonstempel wird mit einer Verfahrensgeschwindigkeit von 40 mm/min bis zu einer Anpresskraft von $30\text{N} \pm 3\text{N}$ auf die Bauteiloberfläche aufgedrückt und 5 Sekunden gehalten.
- Anschließend wird der Stempel zurückgefahren.
- Der Prüfmedienfilm ergibt einen reproduzierbaren Abdruck der Struktur des Silikonstempels auf der Prüffläche

- Der Zeitraum zwischen dem Aufbringen der Prüflüssigkeit auf den Silikonstempel und dem Erzeugen des Abdrucks darf nicht länger als 2 Minuten betragen.
- Nach jedem Aufbringen des Fingerabdruckes auf den Bauteil ist der Silikonstempel mit Isopropanol zu reinigen.
- Pro Prüfteil sind 5 Fingerabdrücke zu applizieren [44]

Die Methodenentwicklung orientierte sich an dieser Norm, wobei diese nur eine Basis für das folgende Versuchsprogramm darstellte.

5.2.1.1 Fingerabdruckapplikation mittels ABREX

Bei der Fingerabdruckapplikation mittels ABREX sollten mit dem ausfahrbaren Prüfarm und dem Silikonstempel reproduzierbare Fingerabdrücke aufgetragen werden. Diese Methode führte jedoch nicht zum gewünschten Ergebnis, da durch die Geometrie des Prüfarmes und durch den Ausfahrmechanismus immer eine vertikale Bewegungskomponente (roter Pfeil) auf die Probe einwirkt. Somit wäre der Fingerabdruck immer in vertikaler Richtung ungleichmäßig.

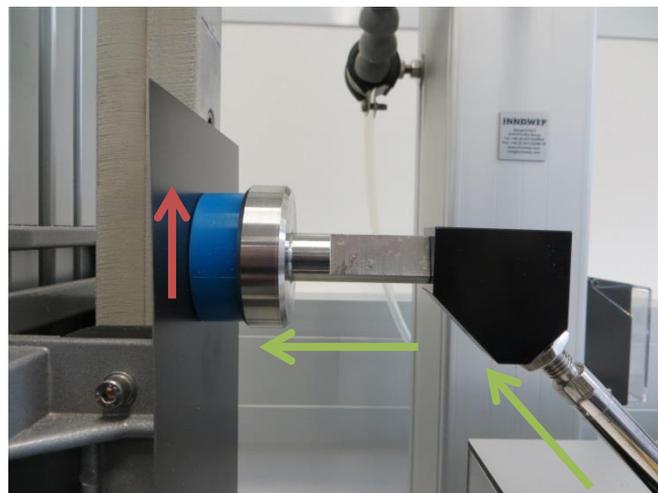


Abbildung 65: Prüfarm mit Silikonstempel

5.2.1.2 Fingerabdruckapplikationsgerät

Da sämtliche Versuche mit ABREX scheiterten wurde ein Gerät konstruiert mit dem es möglich war reproduzierbare Fingerabdrücke zu applizieren. Bei der Konstruktion wurden folgende Überlegungen berücksichtigt:

- Ein gleichmäßiger reproduzierbarer künstlicher Fingerabdruck setzt voraus, dass die jeweilige Stempeloberfläche mit konstanter Kraft auf die Probe gedrückt wird. Die Kraftverteilung auf der jeweiligen Stempeloberfläche sollte ebenfalls homogen sein.
- Die Applikationsgeschwindigkeit ist gleichermaßen von Bedeutung. Wird der Stempel mit erhöhter Geschwindigkeit auf die Oberfläche gedrückt, kann es sein, dass nicht das gesamte Medium auf die Oberfläche aufgetragen wird (Beobachtung Vorversuch).
- Damit die Abdruckintensität an jeder Stelle gleich ist, sollte die Probenauflagefläche ausnivelliert sein beziehungsweise sollte der Stempel plan aufliegen.
- Um verschiedene Stempel beziehungsweise Überträgermaterialien zu testen sollte das Gerät mit einer Universalhalterung ausgestattet sein.

Basierend auf diesen Überlegungen wurde ein Fingerabdruckapplikationsgerät konstruiert, welches in Abb.66 zu sehen ist.

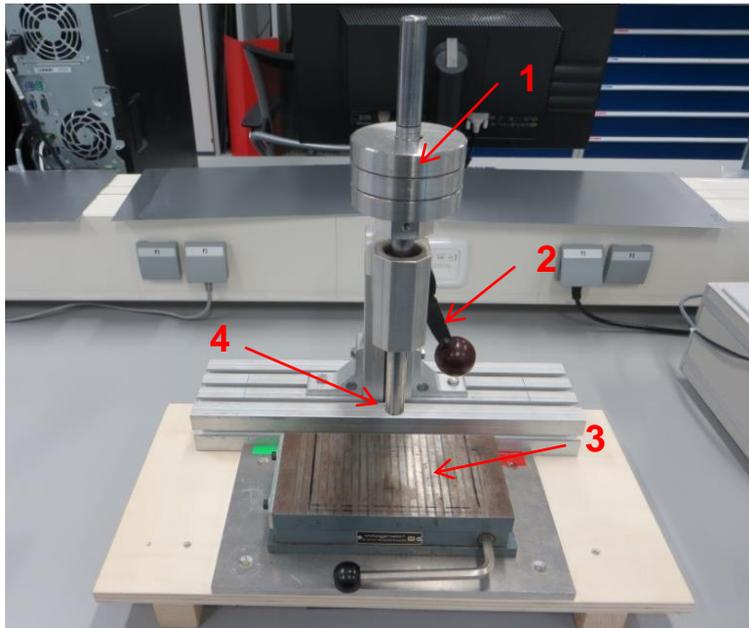


Abbildung 66: Fingerabdruckapplikationsgerät

In Abb.66 sind die wichtigsten Bestandteile gekennzeichnet:

- (1) variable Kraftauflage: Die Konstruktion ermöglicht es den Anpressdruck durch Metallscheiben, welche einer Prüfkraft von jeweils 5N entsprechen, zu variieren.
- (2) Applikationshebel: Durch den Hebel kann die Geschwindigkeit gesteuert werden, mit welcher der Stempel auf die Oberfläche geführt wird.
- (3) Probenauflagefläche: Als Probenauflagefläche wurde ein Magnettisch verwendet um die Proben plan zu fixieren.
- (4) Universalhalterung: In die Kraftaufnahmestange wurde ein Gewinde hineingeschnitten, um die Verwendung von mehreren Stempeln beziehungsweise Applikationsmaterialien zu gewährleisten.

Da bei den folgenden Versuchen verschiedene Medien verwendet wurden, galt es zusätzlich eine Alternative zum Normsilikonstempel (Abb. 67) zu finden, um diesen vor Schädigung, zum Beispiel durch diverse Öle, zu bewahren. Der Silikonstempel

kommt laut Norm nur mit einem Mix aus alkalischem Kunstschweiß, Paraffinöl, Lecithin und Gelbildner in Kontakt.

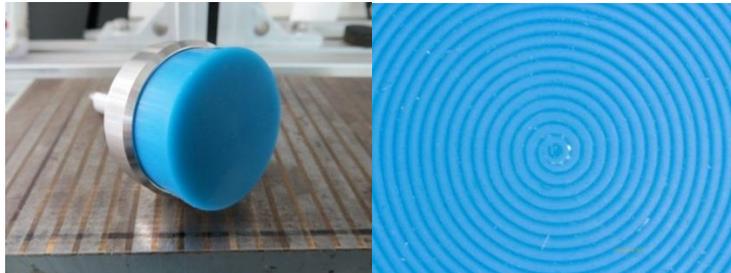


Abbildung 67: Normsilikonstempel

Abhilfe sollte dabei ein Abziehschaumstoff der Firma Stabilit[®] schaffen, welcher normalerweise als Unterlage für Haushaltsgeräte dient.

Aus den 100 x 100 mm großen Quadraten wurden Kreise mit einem Durchmesser von 2 cm ausgestanzt, welche in weiterer Folge auf eine Stempelkissenauflage geklebt wurden (Abb.68).



Abbildung 68: Stempel mit Stabilit[®] Auflage

5.2.1.3 Methode 1: Silikonstempel / Kunstschweiß

Tabelle 14: Applikationsbedingungen Methode 1

Stempel	Silikonstempel
Medium	ABREX [®] Kunstschweiß
Überträgermaterial	Stempelkissen

In der zitierten Norm wird mit Hilfe einer Pipette das Prüfmedium auf ein Stempelkissen aufgebracht. Das Stempelkissen dient als Überträgermaterial und soll gewährleisten, dass immer die gleiche Menge an Medium auf den Silikonstempel übertragen wird. Ausgehend von dieser Arbeitsvorschrift wurde ein Stempelkissen (Abb. 69) gefertigt, welches mit verschiedenen Überträgergeweben bestückt werden konnte.

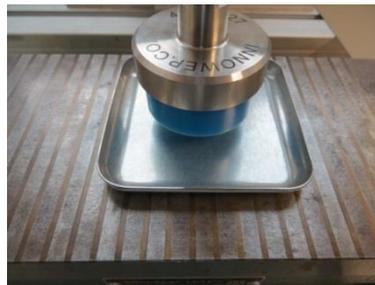


Abbildung 69: Stempelkissen

Als Medium wurde Kunstschweiß der Firma Innowep verwendet, welcher laut DIN 53160-2 [] aus folgenden Reagenzien besteht. [45]

Tabelle 15: Zusammensetzung Schweißsimulanz

Reagenzien	Massenanteil
Natriumchlorid	5,0 g/L
Harnstoff	1,0 g/L
Milchsäure (> 88% Massenanteil)	1,0 g/L
Amoniumhydroxidlösung (1 % Massenanteil)	Zugabe bis pH = 6,5 ± 0,1

Im nächsten Schritt wurden für das Stempelkissen verschiedene Materialien in Betracht gezogen. Da kein Normmaterial beziehungsweise kein Normfilz zur

Verfügung stand wurden verschiedene Haushaltsmaterialien (Schwämme, Geschirrtücher usw) verwendet.



Abbildung 70: Stempelkissenmaterialien

Auf diese Materialien wurde bei den ersten Vorversuchen jeweils mittig 1 mL Kunstschweiß aufgetragen. Der Silikonstempel wurde dann mit einer Anpresskraft von 20 N, genau 10 Sekunden lang auf das Medium gedrückt und in weiterer Folge wieder für 10 Sekunden auf die Lackoberfläche gepresst.

Schon nach den ersten Versuchen zeigte sich, dass Kunstschweiß die Lackoberflächen nicht ausreichend benetzt. Auf die Lackoberfläche wurden lediglich Tröpfchen aufgetragen, jedoch keine fingerabdruckähnliche Struktur welche durch den Stempel vorgegeben wäre.



Abbildung 71: Kunstschweiß auf Lackoberfläche

5.2.1.4 Methode 2: Stempel mit Stabilit[®] Auflage / Rapsöl

Tabelle 16: Applikationsbedingungen Methode 2

Stempel	Stempel mit Stabilit [®] Auflage
Medium	Rapsöl
Überträgermaterial	Stahlband verzinkt

Bei dieser Methode wurde erstmals die Stabilit[®] Auflage benutzt, da als Medium Rapsöl verwendet wurde. Zudem wurde auf das Stempelkissen verzichtet, da bei nicht normgerechten Stempelkissenmaterialien, wie zum Beispiel Geschirrtüchern, nicht immer eine konstante Menge an Medium übertragen wurde. Die Applikation von einer reproduzierbaren Menge an Medium auf eine Lackoberfläche, setzt eine gleichmäßige Mikrostruktur im Überträgermaterial, wie man sie zum Beispiel bei Normgeweben findet, voraus. Daher wurde eine andere Transfermethode in Betracht gezogen. Der wichtigste Faktor bei der Transfermethode ist, dass eine gleichmäßige homogene Schicht an Medium auf ein Überträgermaterial aufgetragen wird. Ist die Schichtdicke konstant, so kann man davon ausgehen, dass am gesamten Stempel eine gleichmäßige Schicht appliziert wird, sofern das Medium den Stempel ausreichend benetzt.

Um dies zu realisieren wurde auf verzinktem Stahlblech (40 x 22 cm) Rapsöl mit Hilfe einer Spiral-Rakel aufgebracht. Durch verschiedene Rakelgrößen war es nun möglich unterschiedliche Mengen an Öl aufzutragen. Der Stempel mit Stabilit[®] Auflage wurde dann ebenfalls wieder mit einer Anpresskraft von 20 N genau 10 Sekunden lang auf das Medium gedrückt und in weiterer Folge wieder für 10 Sekunden auf die Lackoberfläche gepresst. Die dabei entstandenen Abdrücke sind in Abb.72 zu sehen.

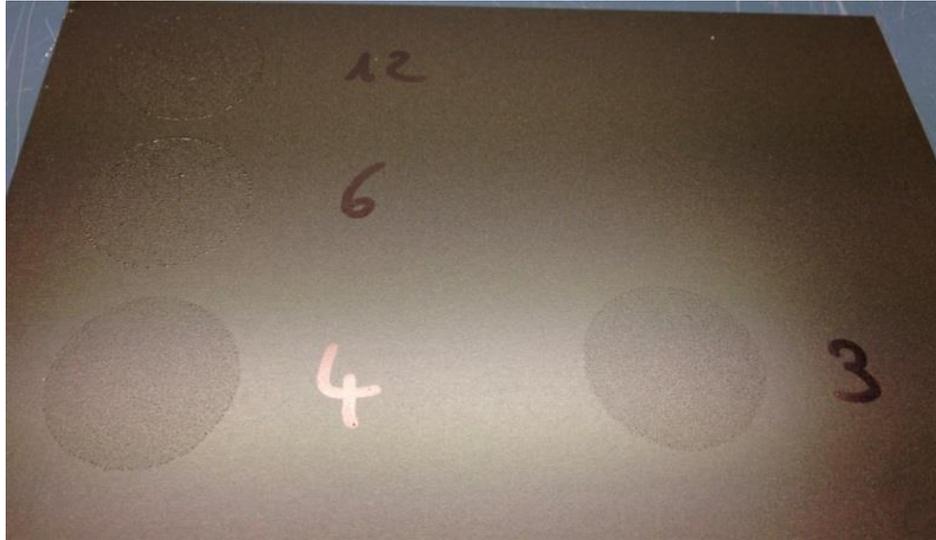


Abbildung 72: Künstliche Fingerabdrücke mit Rapsöl

Man kann deutlich erkennen, dass bei dieser Methode die Form des Stempels auf der Lackoberfläche zu erkennen ist. Auch die Menge an übertragenem Medium variiert zwischen den Rakeln 12, 6, 4 und 3. Dies zeigt sich durch die Intensität der Abdrücke.

Betrachtet man die künstlichen Fingerabdrücke jedoch genauer, so zeigt sich, dass sich auch hier durch eine schlechte Benetzung der Lackoberfläche nur sehr fein verteilte Tröpfchen bilden.



Abbildung 73: Fein verteilte Öltröpfchen auf Lackoberfläche

Damit konnte gezeigt werden, dass auch Rapsöl nicht das optimale Medium zur Simulation von Fingerabdrücken ist. Ferner gibt es Probleme mit der Beständigkeit des Abdruckes, da das Öl nach einem gewissen Zeitraum in die Oberfläche diffundiert und dort einen irreversiblen Fleck auf der Lackoberfläche hinterlässt.

5.2.1.5 Methode 3 Stempel mit Stabilit[®] Auflage / Vaseline

Tabelle 17: Applikationsbedingungen Methode 3

Stempel	Stempel mit Stabilit [®] Auflage
Medium	Vaseline
Überträgermaterial	Kaltband

Bei der dritten Methode wurde anstelle von Kunstschweiß, Vaseline verwendet. Es zeigte sich, dass Rapsöl durch seine geringere Polarität die Lackoberflächen etwas besser benetzt als Kunstschweiß. Jedoch sind die Rückstellkräfte in der Flüssigkeit ebenfalls noch zu groß, was eine erneute Tröpfchenbildung zur Folge hatte. Als alternatives Medium wurde Vaseline in Erwägung gezogen. Der flüssige Anteil bei Vaseline besteht zu 70 bis 90% aus stark verzweigten iso-Paraffinen und Olefinen. Langkettige Komponenten wie zum Beispiel n-Paraffine und gering verzweigte iso-Paraffine finden sich im festen Anteil wieder. In das netzartige Gerüst aus festen Paraffinen sind die flüssigen Anteile interkaliert. [46]

Da Vaseline bei Raumtemperatur fest beziehungsweise gelartig vorliegt wurde auch hier eine Vorgangsweise entwickelt, mit der konstante homogene Schichtdicken erzeugt werden konnten. Zusätzlich wurde als Überträgermedium Kaltband verwendet, da die Zinkauflage die Homogenität der Schicht beeinflussen kann.

Das Aufbringen erfolgte folgendermaßen:

- Vaseline wurde mittels Heizplatte auf 100° C erwärmt.
- Kaltband (40 x 22 cm, Blechdicke = 0,50 mm) wurde im Beschichtungssofen bei einer Temperatur von 200°C 8 sec lang erwärmt.
- Nachdem das Substrat aus dem Laborofen genommen wurde, erfolgte sofort das Aufbringen von flüssiger Vaseline.
- Die Vaseline wurde im Anschluss mit gleichmäßiger Bewegung abgerakelt.
- Anschließend muss so lange gewartet werden, bis die Vaseline erstarrt ist.

Um eine perfekte homogene Vaselineschicht auf dem Überträgerblech zu erzeugen sind folgende Punkte zu beachten:

- Die Temperatur der Vaseline und des Bleches sind von entscheidender Bedeutung. Die Temperatur beeinflusst die Viskosität der Vaseline und hat somit noch größeren Einfluss auf den Rakelvorgang. Beginnt diese während des Rakelns zu stocken beziehungsweise zu erstarren, so liegen die feinen Rillen der Rakel nicht mehr auf dem Substrat auf. Dies hat zur Folge, dass sich inhomogene Schichtdicken ergeben.
- Die Rakelgeschwindigkeit und der Anpressdruck der Rakel wirken sich ebenso auf die Schichtdicke aus. Beim Aufbringen der Vaseline sollte die Rakel langsam, mit konstanter Geschwindigkeit nach unten gezogen werden. Presst man die Rakel zu stark gegen das Substrat, so biegt sich diese leicht durch und es wird mehr Vaseline aufgetragen. Die Rakel sollte also langsam mit moderatem Anpressdruck nach unten gezogen werden.

Nachdem die ersten Substratbleche mit Vaseline beschichtet wurden, war es notwendig zu überprüfen, ob die aufgetragene Menge an Vaseline auf dem Stahlsubstrat konstant ist. Für diesen Zweck wurden aus mehreren Substratblechen mittig 100 x 100 mm große Quadrate herausgeschnitten (Abb.74). Der ovale Bereich kennzeichnet den Bereich homogener Schichtdicken.

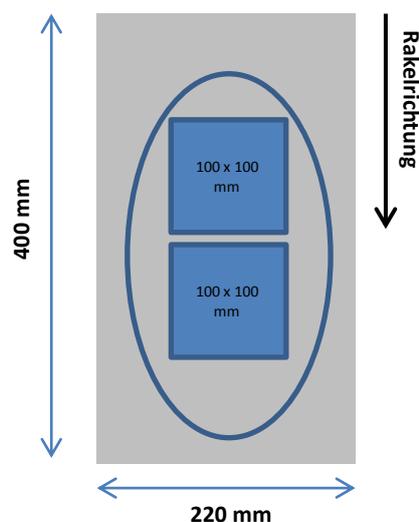


Abbildung 74: Substratblech

Das Herausschneiden der 100 x 100 mm großen Quadrate erfolgte mit einer Blehschere bei der der Niederhalter deaktiviert wurde um sicherzustellen, dass keine Vaseline verschleppt wird. Im Anschluss wurden die Proben auf der Analysenwaage abgewogen, entfettet und wieder abgewogen. Es wurden Vaselineschichten untersucht, welche mit Rakelgröße 2 generiert wurden.

Tabelle 18: Masse an Vaseline pro 100 cm²

Masse an Vaseline pro 100 cm ²	
27,5 mg	MW = 28,5 mg s = 0,6 mg
28,5 mg	
29,5 mg	
28,5 mg	
29,0 mg	
28,3 mg	
28,1 mg	

Im Durchschnitt werden also 28,5 mg pro 100 cm² aufgetragen. Obwohl es beim Blehschneiden trotzdem immer wieder zu Massenverlusten kommen kann, zeigt das Ergebnis, dass die Menge an aufgetragener Vaseline relativ gut reproduzierbar ist.

Die Applikationsbedingungen wurden von Methode 1 und 2 übernommen (20N, 10 sec). In Abb.75 sieht man einen künstlichen Fingerabdruck, welcher mit Methode 3 generiert wurde. Es ist auf Anhieb zu erkennen, dass Vaseline als Medium einige Vorteile mit sich bringt. Die Benetzung der Lackoberfläche ist ausreichend und der künstliche Abdruck wirkt in sich homogen. Zusätzlich kann mit den verschiedenen Schichtdicken die Intensität der Abdrücke gesteuert werden.

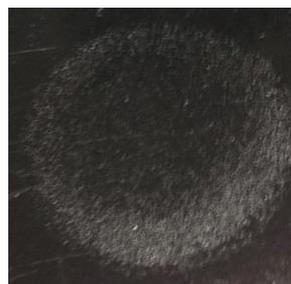


Abbildung 75: Künstlicher Fingerabdruck mit Vaseline

5.2.1.6 Methode 4 - Silikonstempel Vaseline

Tabelle 19: Applikationsbedingungen Methode 4

Stempel	Silikonstempel
Medium	Vaseline
Überträgermaterial	Kaltband

Laut Norm kommt der Silikonstempel auch mit apolaren Substanzen wie zum Beispiel Paraffinöl in Kontakt. Daher wurde dieser auch für die Methode mit Vaseline eingesetzt. Der Stempel wurde nach jeder Fingerabdruckapplikation mit Isopropanol gesäubert. Die Abdruckapplikation erfolge wie bei Methode 3.

Abb.76 zeigt einen künstlichen, perfekt homogenen Fingerabdruck, welcher mit dem Silikonstempel erzeugt wurde. Die Abbildung zeigt die Vorteile des Silikonstempels deutlich, da bei diesem Stempel die feine Rillenstruktur, welche einen Fingerabdruck erst charakteristisch macht, abgebildet werden konnte.



Abbildung 76: Künstlicher Fingerabdruck mit Vaseline / Silikonstempel

Auch bei dieser Methode wurden auf den Überträgerblechen verschiedene Mengen an Vaseline aufgetragen um die Intensität des Abdruckes zu steuern. Es zeigte sich jedoch schnell, dass bei diesem Verfahren nur geringe Schichtdicken von Vorteil sind, da durch die erhöhte Menge an Vaseline die Feinstruktur des Silikonstempels nicht mehr übertragen werden konnte. Die optimale Vaseline menge beträgt 28,5 mg pro 100 cm² (Rakel 2). Verwendet man eine Rakel 3 oder höher so erkennt man

schon am Überträgermaterial, dass die Rillenstruktur verschwindet (Abb. 77 und Abb. 78).

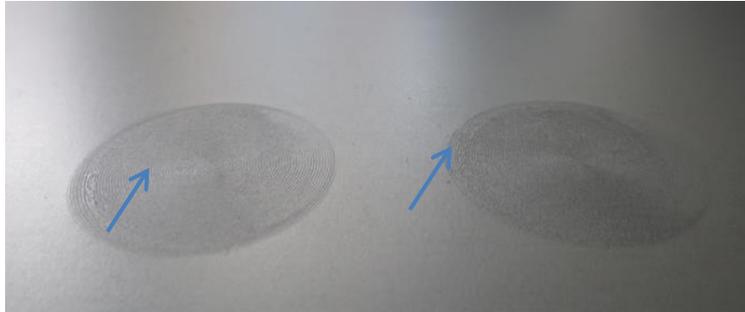


Abbildung 77: Stempelstruktur am Überträgerblech Rakel 4



Abbildung 78: Stempelstruktur am Überträgerblech Rakel 10

5.2.1.7 Methodenvergleich

Zusammenfassend kann man sagen, dass nur Methode drei und vier zum gewünschten Ergebnis geführt haben.

Die größte Herausforderung war ein geeignetes Medium zu finden. Die Oberflächenenergie des Lackes und die Oberflächenspannung des Mediums spielen dabei eine wichtige Rolle. Die Oberflächenenergie von den verschiedenen Lacksystemen bewegt sich im Bereich von ca. 34 mN/m. Ein Medium benetzt dann, wenn die Oberflächenspannung vom Substrat größer ist als die vom Medium. Vaseline erfüllt als einziges Medium dieses Kriterium und ist daher am besten für diese Versuche geeignet.

Vergleicht man Methode 3 mit Methode 4, so kann die Steuerung der Abdruckintensität mittels Methode 2 als klarer Vorteil genannt werden. Der künstliche Fingerabdruck wirkt jedoch bei Methode 4 optisch homogener. Dies kann auf die normierte Geometrie des Silikonstempels zurückgeführt werden.

5.2.2 Visualisierung von Fingerabdrücken

5.2.2.1 Visualisierung mittels Digitalkamera unter definierten Beleuchtungswinkeln

Im Zuge der Visualisierung sollten Fingerabdrücke mit Hilfe einer Digitalkamera unter definierten Belichtungswinkeln sichtbar gemacht werden. Diese Methode führte jedoch nicht zum Erfolg, da auf jedem Bild Reflexionen zu sehen waren, welche die Intensität des Abdruckes verfälschten. Daher war es auch nicht möglich den Abdruck quantitativ zu beurteilen.

5.2.2.2 Visualisierung mittels Hellfeldbeleuchtung

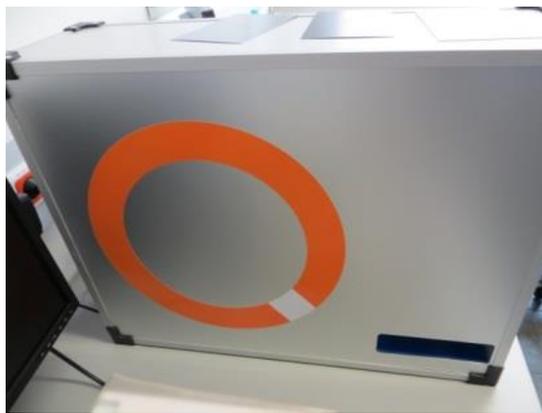


Abbildung 79: Quantiz Hellfeldbeleuchtung

Das Gerät verfügt über zwei Belichtungsmodi, bei denen die Probe nicht frontal sondern seitlich belichtet wird. Die Detektion erfolgt mit einer Spezialkamera. Bei den ersten Versuchen wurden drei verschiedene Grundfarben ausgewählt, auf denen Fingerabdrücke mit Methode 4 appliziert wurden. Dabei wurde darauf geachtet, dass sowohl dunkle als auch helle Farbtöne in der Farbpalette vorhanden waren, um die Erkennbarkeit in Abhängigkeit vom Farbton zu überprüfen.

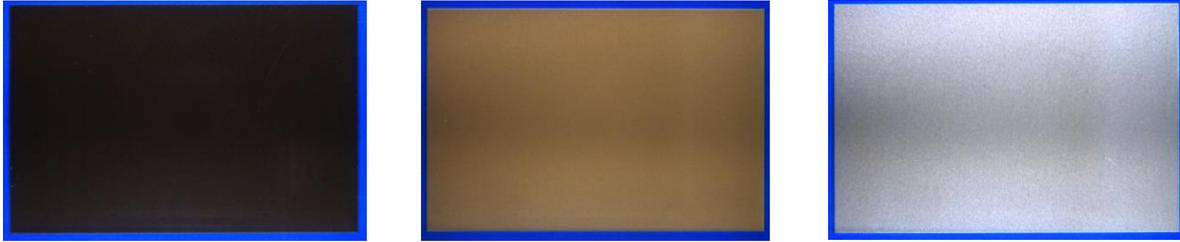


Abbildung 80: Belichtung im „White-Soft-Modus“

Die Farben dunkelbraun, hellbraun und silber wurden zunächst mit dem „White-Soft-Modus“ belichtet.

Da auf keiner Probe ein Abdruck sichtbar gemacht werden konnte, wurden die Proben anschließend im „Bright-Field-Modus“ belichtet.

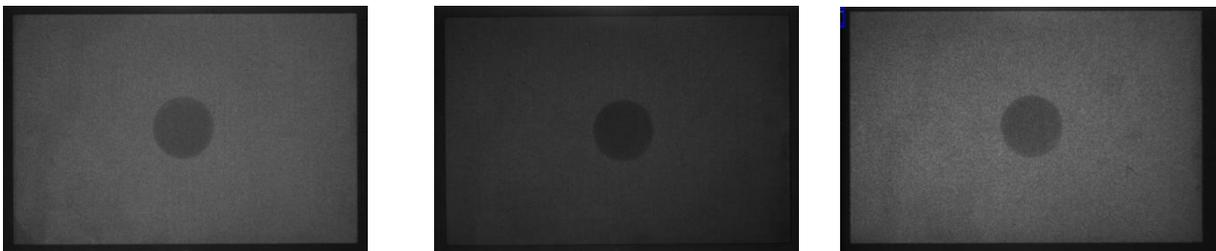


Abbildung 81: Belichtung im „Bright-Field-Modus“

Im „Bright-Field-Modus“ war es nun möglich, künstliche Fingerabdrücke unabhängig vom Farbton sichtbar zu machen und in Bezug auf Homogenität zu beurteilen. Aus den Bildern geht aber auch hervor, dass die Grundfarbe nach der Aufnahme nicht mehr ersichtlich ist. Folglich kann die Abdruckintensität zwischen verschiedenen Farben nicht verglichen werden. Innerhalb eines Farbtones ist eine Differenzierung möglich. Um zu überprüfen, ob die Intensität künstlicher Fingerabdrücke, der von menschlichen Fingerabdrücken entspricht, wurden sowohl künstliche (Applikation erfolgte mit Methode 3) als auch menschliche Abdrücke unterschiedlicher Intensität, auf hellbraunem Grundmaterial aufgetragen.

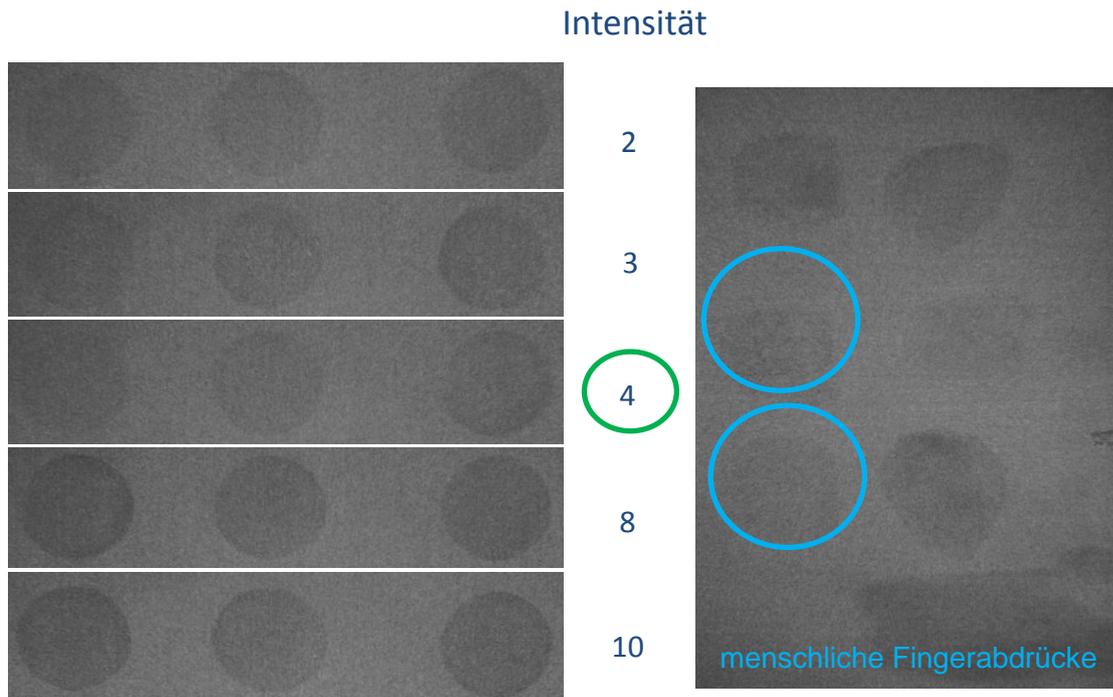


Abbildung 82: Künstliche und menschliche Fingerabdrücke im Vergleich

Die Intensitätsskala in Abb. 82 bezieht sich auf die verwendeten Rakeln. Aus den Aufnahmen ist ersichtlich, dass sich künstliche Fingerabdrücke der Intensität 4, ungefähr im gleichen Intensitätsniveau bewegen wie menschliche Fingerabdrücke.

Dieser Vergleich wurde auch mit Abdrücken der Methode 4 durchgeführt. Hier zeigte sich, dass Fingerabdrücke der Intensität 2 am besten geeignet sind um menschliche Fingerabdrücke zu simulieren.

5.2.3 Bewertung der Fingerabdrücke

5.2.3.1 Methodenentwicklung „Quantiz[®] – Origin[®]“

Da es nun möglich war künstliche Fingerabdrücke unter definierten Bedingungen sichtbar zu machen, galt es nun eine Methode zu entwickeln mit der die Abdrücke auch quantifiziert werden können. Für diesen Zweck wurden die Bilddaten mit der Software Origin analysiert. Dieses Programm bietet die Möglichkeit Bilder in Matrizen zu konvertieren und diese im Anschluss durch geeignete Methoden der Statistik zu analysieren. Bei der Auswertung wurde folgendes Prozedere angewandt:

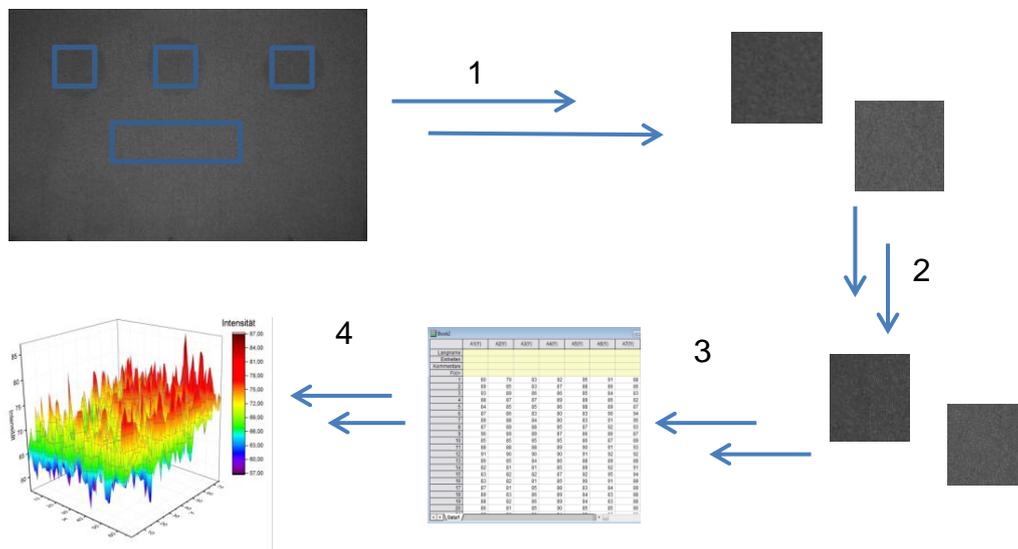


Abbildung 83: Analysenprozedere Origin

In Abb.83 findet sich im ersten Bildabschnitt ein Foto wieder, welches mit Quantiz aufgenommen wurde. Auf dem Foto sind 3 künstliche Fingerabdrücke zu sehen. Im ersten Schritt wurde ein Teil der Bildinformation extrahiert. Das Quadrat kennzeichnet den von den Fingerabdrücken ausgewählten Bereich. Weiters wurde auch der Bildhintergrund extrahiert. Da in den extrahierten Bereichen noch Farbanteile vorhanden sind, wurden die Ausschnitte im Zuge von Schritt 2 in Grauwerte transformiert. Somit ergibt sich eine Abstufung von 256 Grauwerten, wobei der Wert 0, der Farbe schwarz und der Wert 255 der Farbe Weiß entspricht. Das resultierende Grauwertbild wurde dann in Origin direkt in eine Datenmatrix konvertiert. Aus dieser Matrix wurde nun die Häufigkeitsverteilung der einzelnen

Grauwerte analysiert. Mittelwert und Standardabweichung wurden berechnet. Ferner war es auch möglich, direkt aus den Grauwerten ein Intensitätsprofil des extrahierten Bereiches (Abb. 84) zu erstellen.

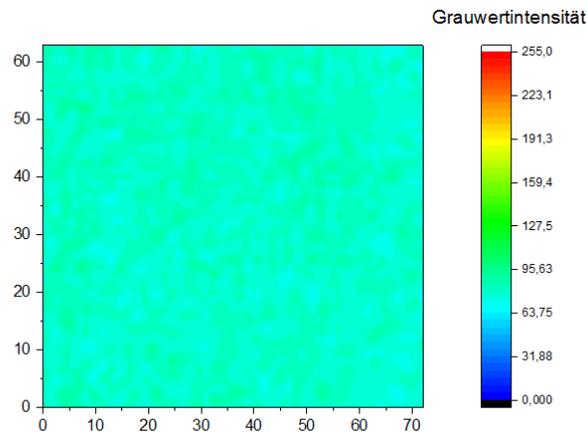


Abbildung 84: Grauwertintensitäten des extrahierten Bereiches – Fingerabdruck ist homogen

5.2.3.2 Auswertung der Abdrücke von Methode 3

Um die Reproduzierbarkeit der Methode zu überprüfen, wurden 15 künstliche Fingerabdrücke auf hellbraunem Grundmaterial appliziert und mittels in Kapitel 5.2.3.1 beschriebener Methode ausgewertet. Bei der Applikation wurde Vaseline mit einer Zweier-Rakel auf das Überträgerblech aufgetragen. In Tabelle. 20 sind die jeweiligen Grauwertintensitäten der künstlichen Fingerabdrücke angegeben. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Werte sehr stark streuen, obwohl die Fingerabdrücke visuell homogen wirken. Die Standardabweichung ist dabei ein Maß für die Homogenität des Fingerabdruckes. Auffällig ist jedoch auch, dass die mittleren Werte beziehungsweise die Grauwerte von den Abdrücken, welche in der Mitte der Probe aufgetragen wurde, deutlich erhöht sind.

Stempelabdruck Rakel 2	Grauwertintensität MW	Standardabweichung
1	69,5	4,0
2	77,2	4,1
3	72,4	3,6
4	73,7	3,8
5	79,6	3,4
6	69,5	3,8
7	68,4	3,7
8	77,3	4,2
9	70,1	3,8
10	71,2	4,0
11	78,1	4,0
12	67,0	3,4
13	62,2	3,2
14	77,5	3,6
15	68,7	3,4

Tabelle 20: Grauwertintensitäten der künstlichen Fingerabdrücke

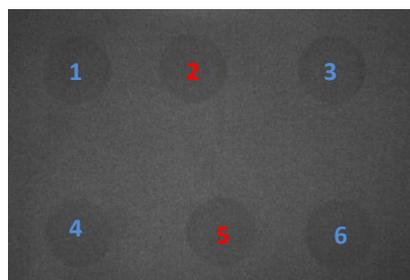


Abbildung 85: Applikationsreihenfolge

Ein erhöhter Grauwert würde bedeuten, dass die Fingerabdrücke nicht so intensiv beziehungsweise heller wirken. Bei der Beurteilung mit freiem Auge wurden jedoch keine Auffälligkeiten festgestellt. Auch die Quantizbilder deuteten nicht auf einen unregelmäßigen Abdruck hin. Aufgrund dieser Tatsachen wurde die Belichtung des Gerätes näher untersucht. Für diesen Zweck wurden keine Bildbereiche extrahiert sondern das Intensitätsprofil der ganzen Probe ausgewertet (Abb. 86).

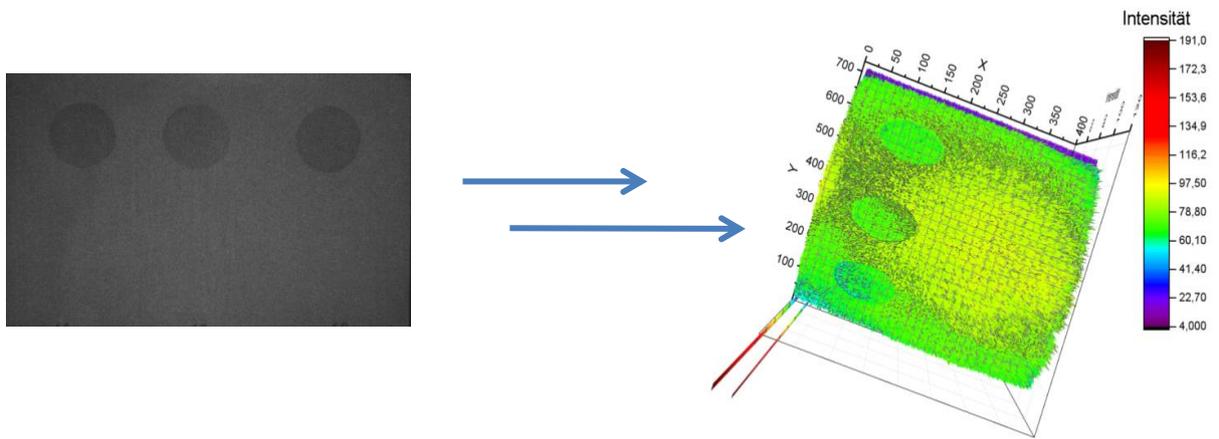


Abbildung 86: Intensitätsprofil der ganzen Probe

Das Intensitätsprofil zeigt, dass die Belichtung der Probe nicht homogen ist, daher wurden in weiterer Folge Fingerabdrücke nur noch mittig appliziert.

Die nachfolgende Grafik zeigt die Intensität von künstlichen Stempelabdrücken (SA 1 - 8), menschlichen Fingerabdrücken (M1 - 2) sowie von der sauberen Lackoberfläche (HG). Die Abdrücke wurden auf hellbraunem Grundmaterial appliziert. Sowohl die künstlichen Fingerabdrücke als auch die menschlichen Fingerabdrücke bewegen sich im Intensitätsbereich von 77 bis 79. Die Standardabweichungen der Einzelmessungen sind in der selben Größenordnung wie beim ersten Versuch.

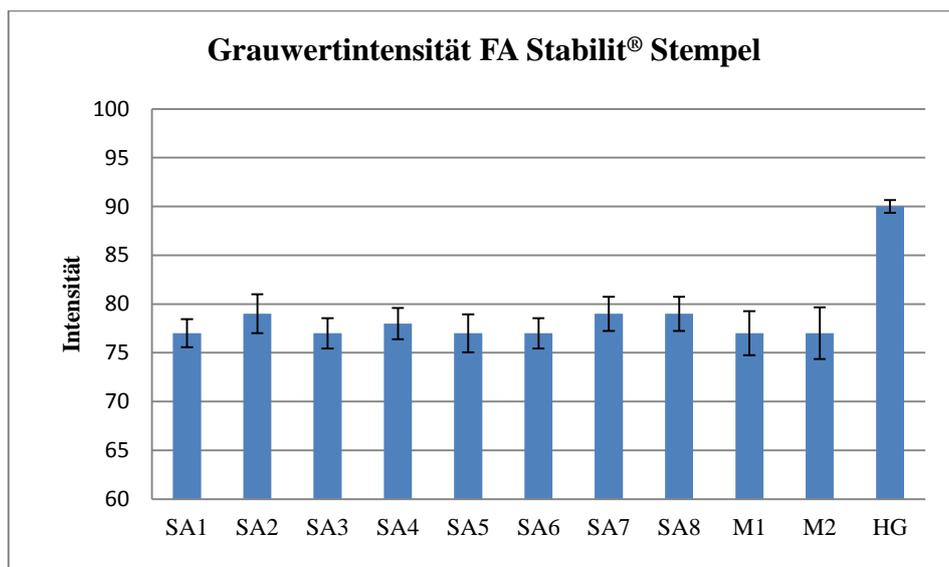


Abbildung 87: Grauwertintensität FA Stabil® Stempel

5.2.3.3 Auswertung der Abdrücke von Methode 4

Die Applikation der Abdrücke erfolgte hier auf dunkelbraunem Grundmaterial. Wie bereits geschildert wirkt sich der Farbton auf die Gesamtintensität aus. Somit können die Grauwertintensitäten aus Abb. 87 nicht direkt mit diesen verglichen werden. Das hellbraune Grundmaterial hat eine Intensität von 90. Das für diesen Versuch verwendete dunkelbraune Substrat hat eine deutlich niedrigere Intensität (HG = 56,4). Addiert man die Intensitätsdifferenz vom Grundmaterial mit der Intensität der Einzelabdrücke dieses Versuchs bewegt man sich ebenfalls wieder im Bereich von 77. Bei den Abdruckintensitäten kann man jedoch keinen Vergleich anstellen, da die Abdrücke durch unterschiedliche Methoden aufgebracht wurden. Es kann also nur innerhalb einer Methode auf Reproduzierbarkeit und Homogenität geprüft werden. Aus Abb. 88 geht deutlich hervor, dass die Fingerabdrücke von Methode 4 deutlich homogener sind. Dies kann man aufgrund der geringeren Standardabweichung erkennen. Die Fingerabdrücke sind reproduzierbar und die Intensität der künstlichen Abdrücke gleicht der eines menschlichen Fingerabdruckes.

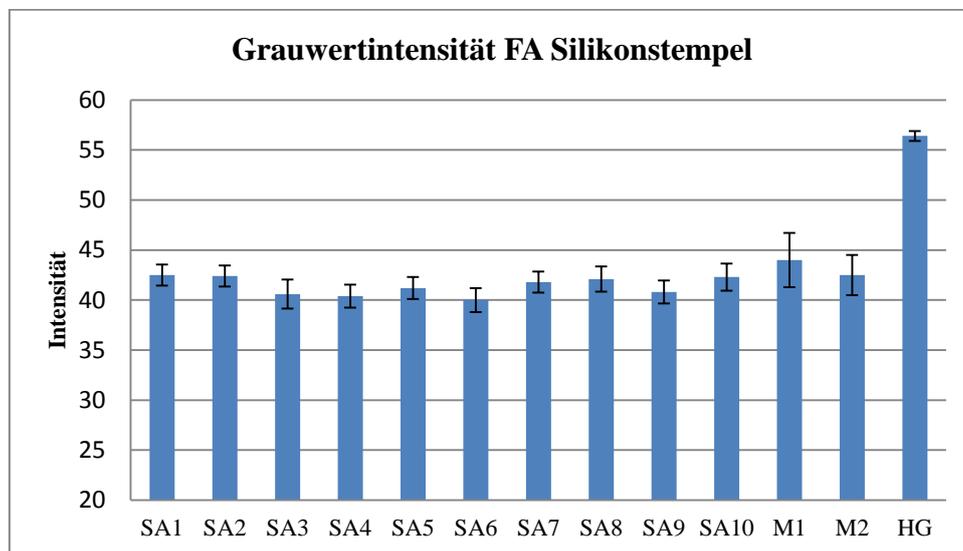


Abbildung 88: Grauwertintensität FA Silikonstempel

5.2.4 Vergleich Methode 3 vs. Methode 4

Verwendet man künstliche Fingerabdrücke um verschiedene Oberflächen bezüglich Anit-Fingerprint Eigenschaften zu testen, so muss der Fingerabdruck immer gleich beziehungsweise reproduzierbar sein. Gerade bei visuellen Beurteilungen ist dies

von großer Bedeutung, da durch inhomogene Fingerabdrücke das Empfinden des Beobachters beeinträchtigt werden könnte.

Methode 3 lieferte visuell homogene Fingerabdrücke, jedoch zeigte sich bei manchen Abdrücken Inhomogenität im Randbereich (Abb. 89). Dies konnte durch die hohen Standardabweichungen bei der Analysenmethode nochmal verdeutlicht werden.

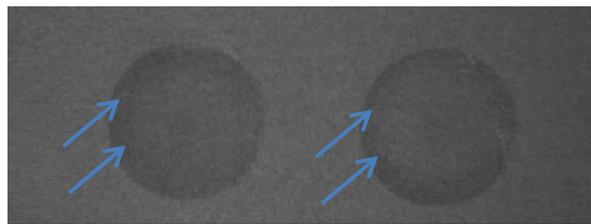


Abbildung 89: Inhomogener Fingerabdruck

Die Störung im Randbereich konnte bei ca. 20 % der Abdrücke beobachtet werden. Daher wurde das Überträgermaterial hinsichtlich konstanter Oberflächenmorphologie untersucht. Die künstlichen Abdrücke zeigten eine starke Abhängigkeit vom Überträgermaterial. Ist dieses vor dem Stanzen leicht gewölbt, so berührt der Stempelrand zuerst die Lackoberfläche. Es wird mehr Vaseline übertragen, der Abdruck wirkt im Randbereich intensiver.

Methode 4 lieferte einen perfekten künstlichen Fingerabdruck. Aus der „Quantiz[®] - Origin[®]“ Analyse ging hervor, dass die Abdrücke reproduzierbar sind und vom Intensitätsniveau mit einem menschlichen Fingerabdruck zu vergleichen sind. Die Rillenstruktur welche übertragen werden konnte, machte die Abdrücke noch realistischer.

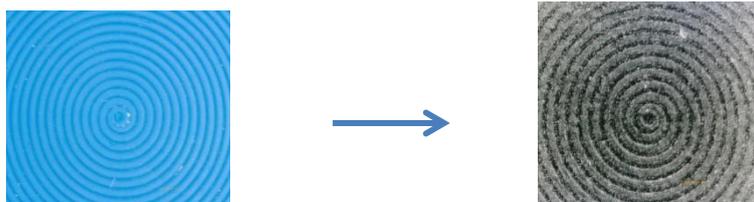


Abbildung 90: Silikonstempeloberfläche - künstlicher Abdruck auf Lackoberfläche

5.2.5 Erkennbarkeit in Abhängigkeit von Farbe, Glanzgrad und Oberflächenstruktur

5.2.5.1 AFP-Test Methodenentwicklung

Um die Erkennbarkeit von Fingerabdrücken zu quantifizieren, war es notwendig einen Test zu entwickeln, bei dem Fingerabdrücke unter definierten Bedingungen beurteilt werden können. Dabei wurden folgende Überlegungen berücksichtigt:

- Betrachtungswinkel
- Lichtintensität
- Probenabstand

All diese Faktoren wirken sich auf die Erkennbarkeit der Fingerabdrücke aus und wurden daher bei der Entwicklung des Tests miteinbezogen.

Um die Abdruckintensität in Abhängigkeit vom Betrachtungswinkel zu untersuchen wurden verschiedene Probenhalterungen mit definiertem Winkel angefertigt.

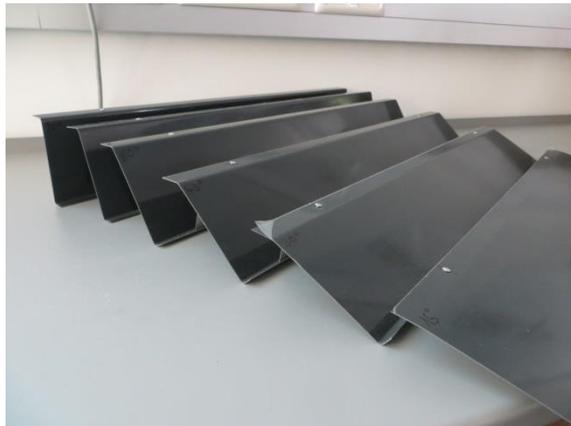


Abbildung 91: Probenhalterungen mit definiertem Betrachtungswinkel

Die Probenhalterung wurde in Augenhöhe platziert, allerdings sollte jede Prüfperson zusätzlich die Möglichkeit haben Feinjustierungen vorzunehmen. Um dies zu realisieren war ein höhenverstellbarer Rollstuhl Teil des Tests. Dadurch wurde eine gleichmäßige Betrachtung von allen Prüfern sichergestellt. Der wohl wichtigste Faktor ist die Beleuchtung. Werden die Proben ungleichmäßig beleuchtet verändert sich ebenfalls die Abdruckintensität. Daher wurde der Aufbau unter einer Lichtquelle, mit konstanter Intensität, platziert.

5.2.5.2 Probenherstellung

Im Zuge der Probenherstellung wurden 5 verschiedene Grundfarbtöne ausgewählt, welche mit PUR-Klarlack (Glanzgrad 20, 40, 60, 80 und 100) beschichtet wurden. Zusätzlich wurden glatte und strukturierte Oberflächen verwendet.

Tabelle 21: Daten zu den verwendeten Grund- (BKZA1) und Decklacksystemen (BKZA2)

Grundfarbton	Oberfläche	BKZ A1	BKZ A2
Schwarz	glatt	950148	-
Weiß	glatt	950234	-
Perlweiß	glatt	150041	-
Braun	glatt	850047	-
Silber	glatt	910132	-
Schwarz	strukturiert	050006	950148
Weiß	strukturiert	050006	950234

Tabelle 22: Daten zu dem verwendeten Klarlacksystem

Klarlack	Glanzgrad	CQ Nummer
PUR Klarlack	20	CQ35 - 601B - 0001
PUR Klarlack	40	CQ35 - 602B - 0001
PUR Klarlack	60	CQ35 - 603B - 0001
PUR Klarlack	80	CQ35 - 604B - 0001
PUR Klarlack	100	CQ35 - 605B - 0001

Die Kenndaten für das verwendete Stahlsubstrat sind in Tabelle 23 angegeben.

Tabelle 23: Daten des Werkstoffes

Stahlsubstrat	
Güte	DX 52 D
Dicke [mm]	0,50
Abmessung [mm]	400 x 220
Zinkauflage [g m ⁻²]	100
Oberfläche	MC

Da das Stahlsubstrat nach dem Walzprozess geölt wird, um Korrosion zu vermeiden, war es notwendig die Bleche vor dem Lackieren alkalisch zu entfetten.

Tabelle 24: Daten der Entfettung

Entfettung	
Reinigungsmittel	Bonderite C-AKC C72
Badtemperatur 1 [°C]	40
Badtemperatur 2 [°C]	40
Bandgeschwindigkeit [m/min]	2,5

Nach der Entfettung erfolgte die Vorbehandlung. Die im Tauchverfahren applizierte Schicht wirkt korrosionshemmend und gleichzeitig als Haftvermittler.

Tabelle 25: Daten der Vorbehandlung

Vorbehandlung	
Reinigungsmittel	Granodine 1455
Temperatur [°C]	35
pH-Wert	3 - 3,5
Tauchzeit [sec]	5

Im Zuge der Beschichtung wurde der gut homogenisierte Nasslack mit einer Spiral-Rakel auf das Substrat aufgetragen und anschließend im Laborofen eingebrannt. Die Berechnung der Verweilzeit, welche für das Erreichen der Peak Metal Temperature (PMT) notwendig ist, wurde mit dem empirischen Ofenmodell durchgeführt.

Der Einbrand im Ofen erfolgte durch das Einlegen der Probe in die ausziehbare Ofenlade. Um eine optimale Temperaturverteilung zu gewährleisten wurde die Probe mittig bis zum Anschlag in die Probenlade eingeschoben.

Tabelle 26: PMT, Verweilzeit und Ofentemperatur

BKZ / CQ-Nummer	PMT [°C]	Verweilzeit [sec]	Ofentemperatur [°C]
950148	241	24,5	300
950234	241	24,5	300
150041	240	24,2	300
850047	240	24,2	300
910132	240	24,2	300
CQ35 - 601B - 0001	240	23,9	300
CQ35 - 602B - 0001	240	23,9	300
CQ35 - 603B - 0001	240	23,9	300
CQ35 - 604B - 0001	240	23,9	300
CQ35 - 605B - 0001	240	23,9	300

Nach dem Einbrennvorgang wurden die beschichteten Substrate im Wasserbecken abgeschreckt und anschließend mit einem Anpressdruck von 2 bar abgequetscht.

Die Ermittlung der Trockenschichtdicke geschah mit Hilfe der magnetinduktiven Schichtdickenmessung. Basierend auf den Messergebnissen wurde die für die jeweilige Schichtdicke notwendige Rakelgröße, ermittelt.

Tabelle 27: Trockenschichtdicke und Rakelgröße

BKZ / CQ-Nummer	Trockenschichtdicke [µm]	Rakelgröße
950148	15	28
950234	15	28
150041	15	28
850047	15	28
910132	15	28
CQ35 - 601B - 0001	10	22
CQ35 - 602B - 0001	10	22
CQ35 - 603B - 0001	10	22
CQ35 - 604B - 0001	10	22
CQ35 - 605B - 0001	10	22

Die durch den Beschichtungsprozess generierte Probenmatrix umfasste 5 Basisfarbtöne, wobei von den Farbtönen Schwarz und Weiß auch strukturierte Varianten Teil der Probenmatrix waren. Die einzelnen Proben unterscheiden sich zusätzlich in ihrem Glanzgrad.

Tabelle 28: Probenmatrix

Farbton	BKZ A1	BKZ A2	Klarlack Beschichtung - Glanzgrad				
			20	40	60	80	100
Schwarz	950148	-	20	40	60	80	100
Weiß	950234	-	20	40	60	80	100
Perlweiß	150041	-	20	40	60	80	100
Braun	850047	-	20	40	60	80	100
Edelstahlsilber	910132	-	20	40	60	80	100
Schwarz	50006	950148	20	40	60	80	100
Weiß	50006	950234	20	40	60	80	100

Nach dem Beschichtungsprozess wurden die Proben (400 x 220 mm) auf das Format 100 x 150 mm zugeschnitten. Abb. 92 zeigt die Temperaturverteilung im Ofen. Der blau umrandete Bereich kennzeichnet die verwendbare Probenfläche.

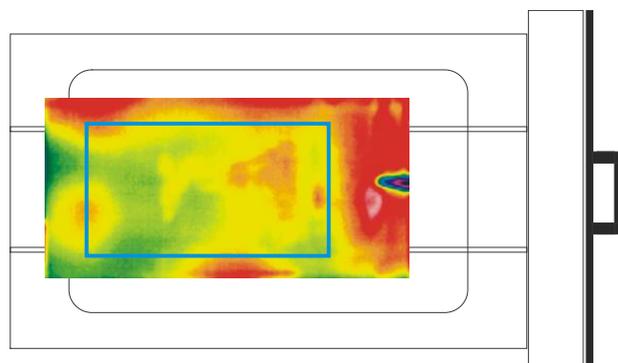


Abbildung 92: Temperaturverteilung der Oberfläche [47]

Abschließend wurde auf jeder Probe ein künstlicher Fingerabdruck mit Hilfe von Methode 4 appliziert.

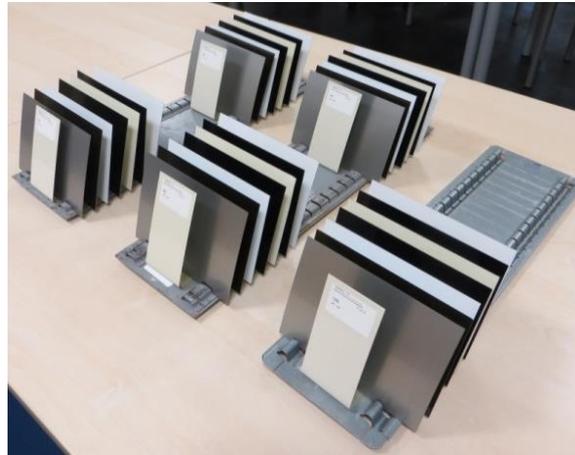


Abbildung 93: Proben mit künstlichen Fingerabdrücken

5.2.5.3 Beurteilung

Die Beurteilung der Fingerabdrücke erfolgte nach folgendem Schema:

Tabelle 29: Beurteilungsschema

Kennzahl	Zustand	Beispiele
1	i.O	keine Veränderung
2	i.O	minimaler Fingerabdruck
3	Die Qualitätswahrnehmung des Kunden ist nicht Nennenswert beeinflusst.	leichter Fingerabdruck
4	Optische Merkmalsausprägung, die vom Kunden erkennbar ist.	deutliche Abzeichnung des Fingerabdruckes
5	Nicht zumutbare optische Merkmalsausprägung, die vom Kunden deutlich erkennbar ist und Unzufriedenheit erzeugt.	starke Abzeichnung des Fingerabdruckes

18 Testpersonen beurteilten die Fingerabdrücke anhand des erstellten Bewertungssystems unter definierten Bedingungen. Die Bewertung der Prüfpersonen gibt Auskunft über die Intensität der Abdrücke.

5.2.5.4 Auswertung

3780 Einzelbewertungen wurden Farb- und Glanzgrad abhängig aufsummiert, und anschließend normiert. Aus den Bewertungen ergibt sich folgender Zusammenhang:

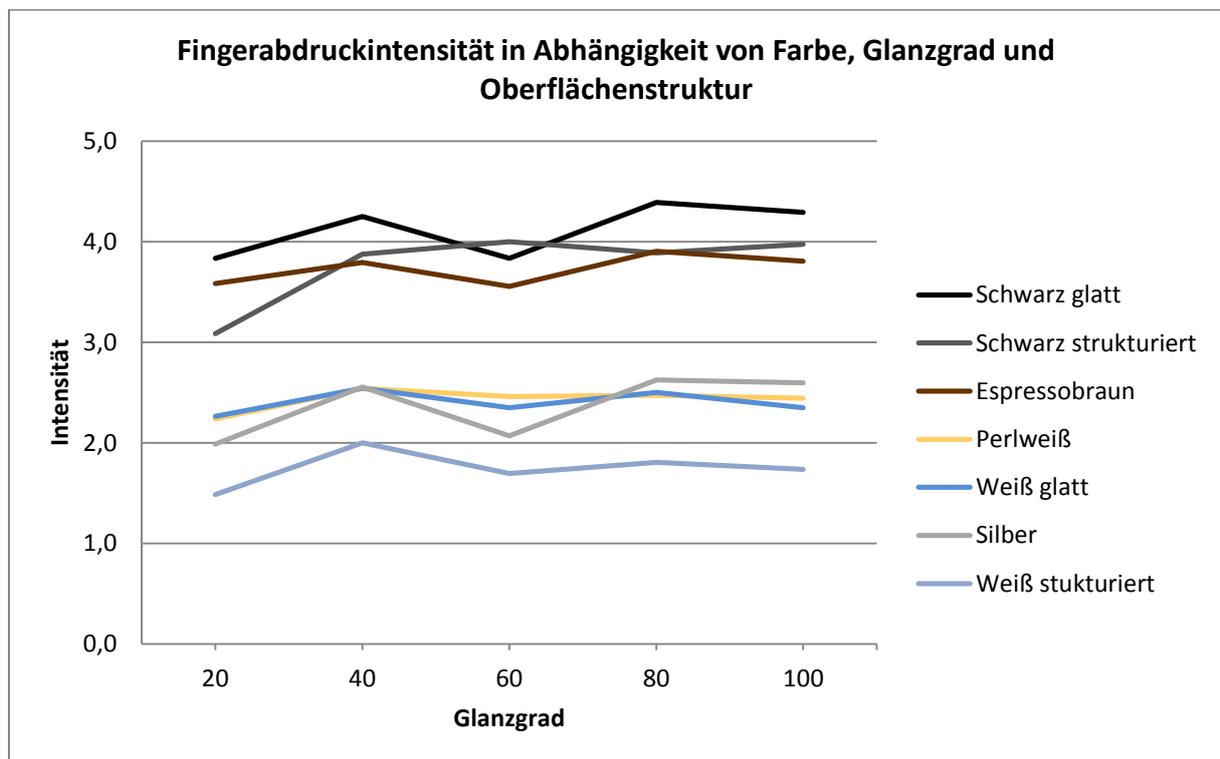


Abbildung 94: Fingerabdruckintensität in Abhängigkeit von Farbe, Glanzgrad und Oberflächenstruktur

Erkenntnisse:

- Bei dunkleren Systemen sind Fingerabdrücke deutlicher sichtbar.
- Das System Schwarz glatt hat bei Glanzgrad 80 die größte Intensität.
- Alle Systeme zeigen eine Abhängigkeit vom Glanzgrad, wobei diese bei Perlweiß und Weiß stukturiert nicht sehr ausgeprägt ist.
- Bei den Systemen Schwarz glatt, braun und Silber sind die Fingerabdrücke bei Glanzgrad 40 und 80 am deutlichsten zu erkennen.

- Schwarz strukturiert, Perlweiß und Weiß glatt zeigen ab Glanzgrad 20, nur mehr eine geringe Abhängigkeit vom Glanzgrad.
- Das System weiß strukturiert besitzt die besten Antifingerprint - Eigenschaften.
- Strukturierte Oberflächen sind tendenziell unempfindlicher

Im Rahmen der Beurteilung wurde zusätzlich noch die Winkelabhängigkeit ausgewertet.

Erkenntnisse:

- Bei glatten Systemen wirken die Fingerabdrücke unter den Betrachtungswinkeln 45° und 60° am intensivsten.
- Strukturierte Systeme zeigen nur einen geringen Einfluss des Betrachtungswinkels.

Zusammenfassend kann man sagen, dass mit den entwickelten Methoden die Antifingerprint Eigenschaften von verschiedenen Lacksystemen beurteilt werden konnten. Farbe, Glanzgrad und Oberflächenstruktur haben einen deutlichen Einfluss auf die Erkennbarkeit der Abdrücke.

5.2.6 Reinigungsprozedere für einen „Standardfingerabdruck“

Um verschiedene Oberflächen bezüglich Reinigungseigenschaften zu quantifizieren war es notwendig einen definierten Reinigungstest für künstliche Standardfingerabdrücke zu entwickeln.

Da ABREX-CE[®] die Möglichkeit bietet, Scheuertests an Oberflächen durchzuführen, wurde das Gerät für die Methodenentwicklung herangezogen. Bei dieser Prüfung wird ein Prüfstempel mit einer bestimmten Andruckkraft senkrecht gegen die Probe gedrückt und mit einer definierten Anzahl an Hüben (Zyklen) auf und ab bewegt.

Tabelle 30: Prüfparameter ABREX-CE[®]

Prüfkraft	1N, 5N, 10N
Reibweg	4 – 40mm
Gewebe	Normgewebe, diverse Reinigungstücher
Stempel	Prüfstempel - transparent

Im Zuge der Reinigungsprüfung wurden die Geräteeinstellungen dahingehend modifiziert, dass es möglich war, mittig, durch einen künstlichen Fingerabdruck zu wischen. Im Vorfeld wurden folgende Überlegungen getätigt:

- Prüfkraft sowie die Wischzyklen spielen bei diesem Versuch eine wesentliche Rolle. Diese sollten so gewählt werden, dass noch Unterschiede zwischen den verschiedenen Oberflächen detektiert werden können.
- Verschiedene Reinigungsgewebe beziehungsweise Reinigungstücher weisen unterschiedliche Reinigungseigenschaften auf. Schwämme und andere grobporige Materialien wirken teilweise abrasiv und können die Lackoberflächen irreversibel schädigen. Die Mikrostruktur des Reinigungsgewebes sollte definiert sein um Schwankungen in den Reinigungseigenschaften ausschließen zu können.

Im Vorfeld wurde daher das Abrasionsverhalten von 5 verschiedenen Reinigungstüchern getestet. Die Prüfkraft wurde von 1 bis 10N variiert. Jede Lackoberfläche wurde mit 100 Zyklen beansprucht. Als Substrat wurde gezielt ein dunkler Farbton mit Glanzgrad 100 ausgewählt, da auf diesem Abrasionsspuren sehr gut zu erkennen sind.

Tabelle 31: Probenkenndaten

Farbton	BKZ A1	BKZ A2	Glanzgrad	Oberfläche
Schwarz	950148	CQ35 - 605B - 0001	100	glatt

Aus den Versuchen ging hervor, dass das Microfibre Tuch von Vileda bei 100 Zyklen nur sehr geringe, kaum sichtbare Abriebspuren erzeugt (Bewertung visuell). Außerdem zeichnete sich das Tuch durch ein homogenes Maschennetzwerk aus.

In weiterer Folge wurden auf folgenden Lacksystemen künstliche Fingerabdrücke mit Hilfe von Methode 4 appliziert.

Tabelle 32: Probenkenndaten

Farbton	BKZ A1	BKZ A2	Oberfläche	Klarlack Beschichtung - Glanzgrad				
				20	40	60	80	100
Schwarz	950148	-	glatt	20	40	60	80	100
Schwarz	50006	950148	strukturiert	20	40	60	80	100
Braun	850047	-	glatt	20	40	60	80	100

Beim ersten Versuch wurde der Prüfstempel mit einer Andruckkraft von 5N senkrecht gegen die Proben gedrückt. Es erfolgte nur eine Aufwärtsbewegung des Stempels. Der Versuch wurde drei Mal wiederholt um die Methode auf Reproduzierbarkeit zu prüfen.

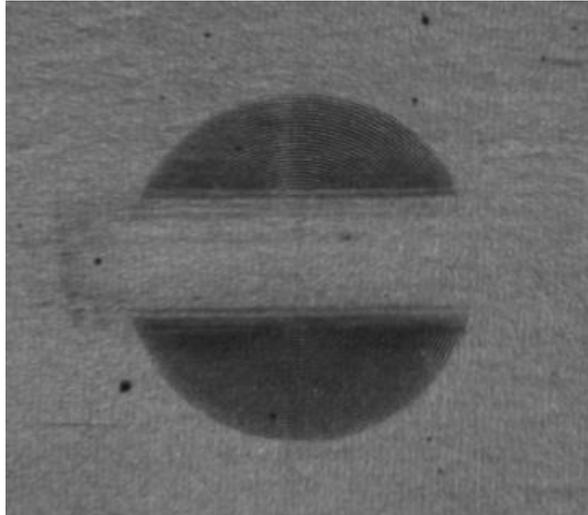


Abbildung 95: Reinigungsversuch, System schwarz glatt, Glanzgrad 60, Aufnahme: Quantiz® Hellfeldbeleuchtung

Abbildung 95 zeigt das Reinigungsprofil eines Fingerabdruckes, aufgenommen mit Quantiz®. Die Reinigungsprofile der einzelnen Proben waren ident, jedoch konnten bei den Quantiz® Aufnahmen keine Unterschiede zwischen den Farbsystemen festgestellt werden. Aus diesem Grund wurden die Abdrücke mit Natriumcarbonat (im Überschuss) bestäubt. Diese Vorgehensweise erlaubte ebenfalls keine Differenzierung zwischen den Systemen.

Aufgrund dieser Tatsachen wurde die Prüfkraft auf 1N reduziert. Die Fingerabdrücke wurden nochmal appliziert und mit derselben Vorgehensweise gereinigt.

Tabelle 33: Zusammenfassung der Reinigungsparameter

Prüfkraft	1N
Reibweg	35 mm
Gewebe	Microfibre Vileda
Stempel	Prüfstempel - transparent

In Abb. 96 sind die Ergebnisse des Reinigungsversuches zu sehen.

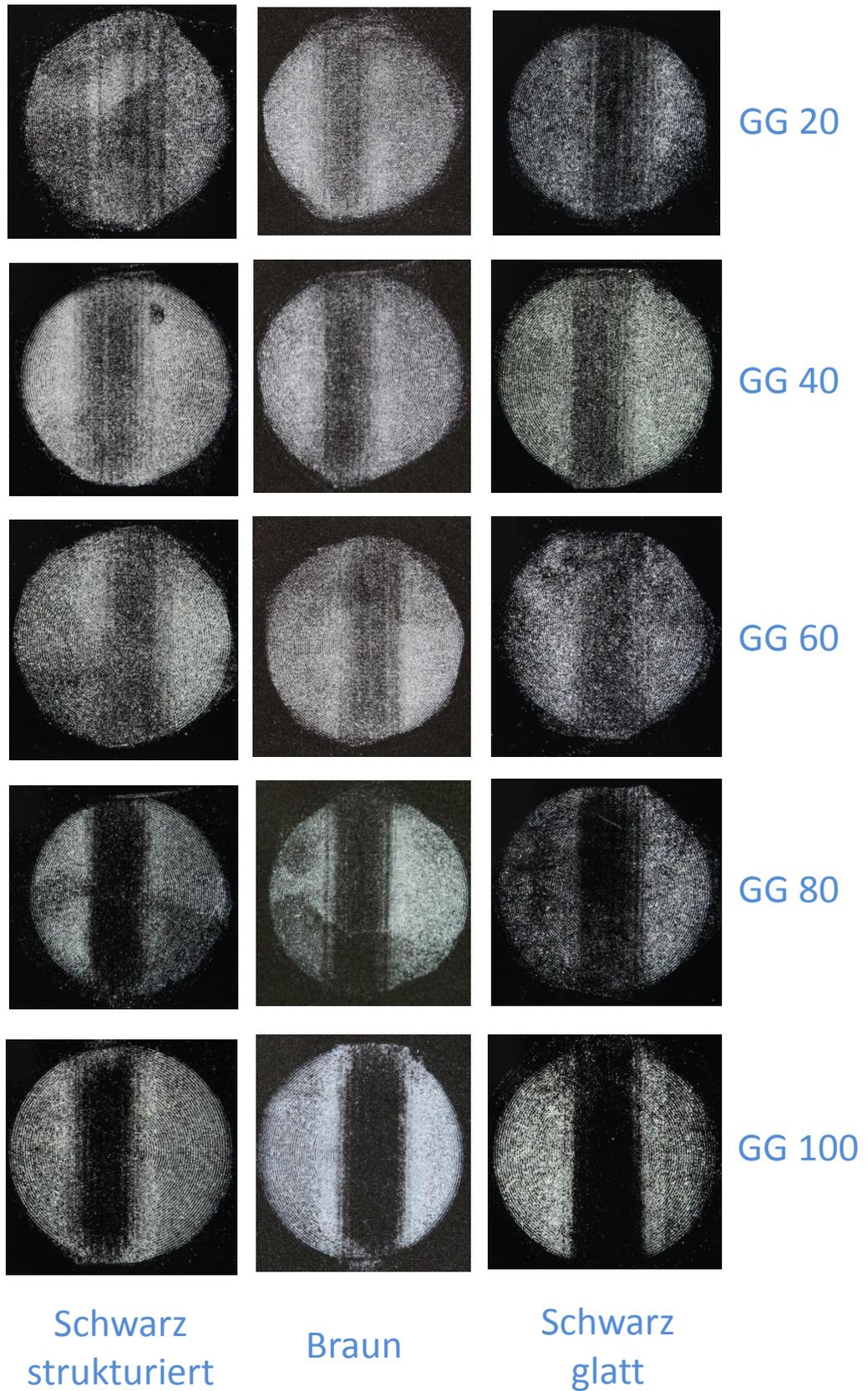


Abbildung 96: Ergebnisse des Reinigungsversuches

Erkenntnisse

- Die Reinigungseigenschaften verbessern sich mit zunehmendem Glanzgrad.
- Strukturierte Systeme haben tendenziell schlechtere Reinigungseigenschaften.

Oberflächenenergie und Oberflächenrauigkeit sind in Zusammenhang mit Reinigungseigenschaften wichtige Einflussfaktoren.

Die Oberflächenenergie der Klarlacksysteme wurde mit den Prüfstiften der Firma arcotec GmbH untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass sich die Oberflächenenergie zwischen den unterschiedlichen Glanzgraden nicht wesentlich unterscheidet ($\sim 34 \text{ mN/m}$). Das zugegebene Mattierungsmittel hat also keinen Einfluss auf die Oberflächenenergie.

Unterschiede zeigten sich jedoch in der Oberflächenrauigkeit. Schon beim Berühren der Lackoberflächen konnten deutliche Unterschiede festgestellt werden. Systeme mit niedrigem Glanzgrad haben eine erhöhte Rauigkeit, bedingt durch die Zugabe von Mattierungsmittel. Dieser Effekt könnte die Reinigungseigenschaften aus folgenden Gründen wesentlich beeinflussen:

- Die Haftung der Vaseline ist durch die Mikrorauigkeit der Oberfläche erhöht.
- Bei glatten Oberflächen hat das Reinigungsgewebe einen durchgehenden Kontakt zur Oberfläche. Dadurch kann Vaseline zur Gänze entfernt werden.
- Die Mikrofasern des Reinigungstuches erreichen bei rauen Oberflächen nicht alle Poren, somit bleiben Rückstände auf der Oberfläche erhalten.

6 Anregung für zukünftige Arbeiten

- Im Zuge der Arbeit wurde auch der Einfluss von Feuchtigkeit auf die Härte der Lacksysteme untersucht. Aus Zeitgründen wurden die Experimente jedoch nur zwei Mal wiederholt. Daher sind diese im Experimentellen Teil nicht zu finden. Trotzdem lassen sich aus den Ergebnissen deutliche Trends ableiten.

Bei dieser Untersuchung wurden ein Polyester(Probe 29-16) und ein Polyurethan (Probe 31-16) Lacksystem in Wasser (23°C) gelagert und anschließend mit dem Fischerscope H 100-C vermessen. In Abb.97 ist deutlich zu erkennen, dass sich die Eindringhärte schon nach 5 minütiger Wasserlagerung ändert. In Summe zeigt sich bei beiden Systemen eine deutliche Abnahme der Härte. Hier könnten noch weitere Versuche gemacht werden um diesen Trend zu festigen.

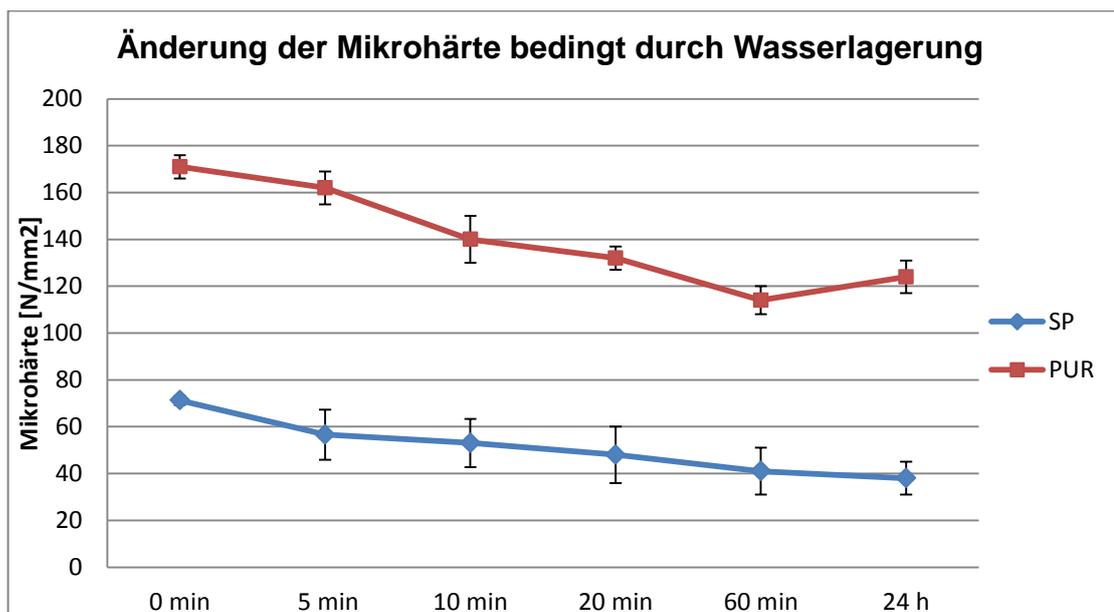


Abbildung 97: Änderung der Mikrohärtigkeit bedingt durch Wasserlagerung

- Ein ähnlicher Versuch wurde auch beim T-Bend Test gemacht. Die Proben wurden bei 45 °C in Wasser gelagert. Nach zehn minütiger Wasserlagerung zeigten fast alle Systeme eine Abnahme der Rissbildung auf 0 T (Abb.98). Bei Probe 34 pendelte sich die Rissbildung auf 0,5 T ein. Diese besitzt die höchste Glasübergangstemperatur.

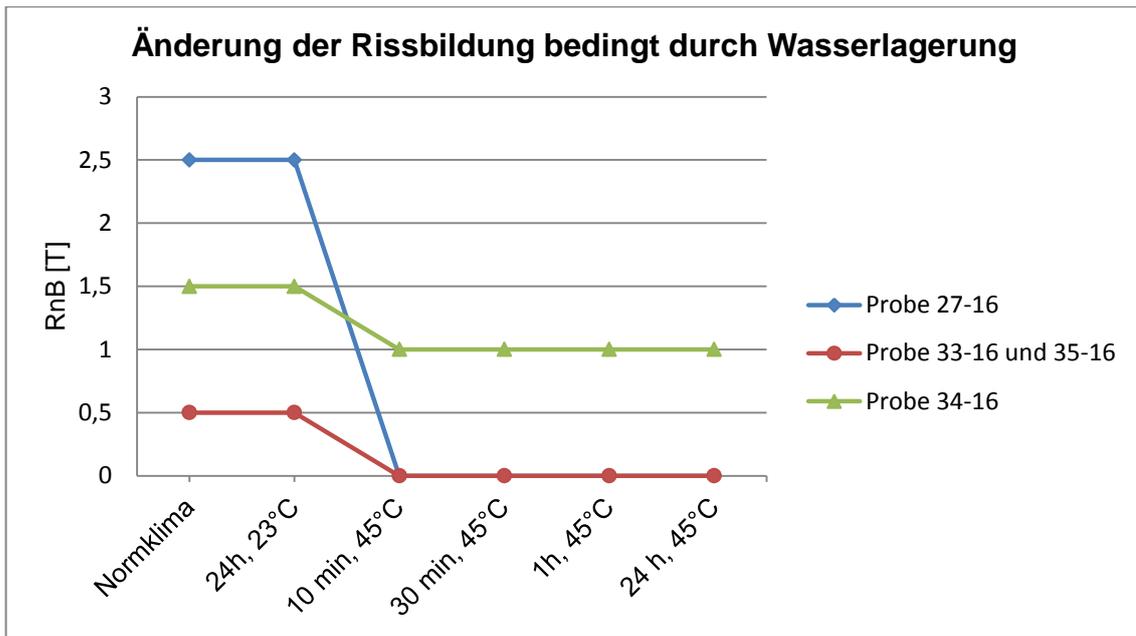


Abbildung 98: Änderung der Rissbildung bedingt durch Wasserlagerung

- Die Einzelkratzexperimente zeigten, dass Wasserlagerung bei einer Wassertemperatur von 23°C keinen Einfluss auf die Kratzfestigkeit hat. Hier könnte man ansetzen und die Wassertemperatur so wählen, dass diese im Bereich des T_{gs} der Lacke liegt. Da das Konfokalmikroskop nanofocus μ surf mobile aufgrund eines Defekts nicht mehr zur Verfügung stand, konnte dieser Versuch leider nicht mehr durchgeführt werden.
- Generell kann der Einfluss von Wassereinwirkung auf mechanisch-technologische Eigenschaftsprofile noch genauer untersucht werden.

7 Zusammenfassung

7.1 Kratzfestigkeit

- Ausgewählte Schnelltests lieferten Informationen über die mechanischen Eigenschaften der Lacksysteme. Durch die Korrelation von Mikroeindringhärte, Kratzfestigkeit, Rissbildung und Tg konnten wichtige Trends identifiziert werden:
 - Sehr weiche Systeme ($H_{Mk} = 20 - 70 \text{ N/mm}^2$) haben eine geringere Kratzfestigkeit.
 - Steigt die Härte, so erreicht man ein Maximum der Kratzfestigkeit ($90 - 140 \text{ N/mm}^2$).
 - Bei sehr harten Systemen (ab 160 N/mm^2) nimmt die Kratzfestigkeit wieder ab.
 - Systeme mit hoher Härte neigen zu Sprödbruch.
 - Die Rissbildung steigt mit sinkender Kratzfestigkeit.
 - Die Abnahme des Tg's wird von einer Erhöhung des Kriechens begleitet.
- Im Zuge des Versuchsprogramms konnte mit dem Prüfgerät ABREX[®]-CE eine neue Methode entwickelt werden, mit der es möglich ist reproduzierbare Kratzspuren auf Lackoberflächen aufzubringen und diese in weiterer Folge mit Hilfe der Konfokalmikroskopie zu quantifizieren.
- Aus den Einzelkratztests ging hervor, dass eine Steigerung der Geschwindigkeit zu sprödem Materialversagen führt. Dieser Befund wird's durch eine Literaturrecherche zum Thema „Verkratzungsverhalten“ unterstützt.
- Bei der visuellen Beurteilung zeigte sich, dass strukturierte Systeme tendenziell unempfindlicher sind. Dieser Zusammenhang kann durch die Richtung der Reflexion erklärt werden. Bei glatten Systemen wirkt der Kratzer bei einem bestimmten Betrachtungswinkel besonders intensiv. Strukturierte Systeme zeigten diese Verhalten jedoch nicht. Durch die strukturierte

Oberfläche wird Licht in viele verschiedene Richtungen reflektiert, was eine Minderung der Intensität der Kratzspur zufolge haben könnte.

- Wasserlagerung bei einer Wassertemperatur von 23°C hat keinen Einfluss auf die Kratzfestigkeit, jedoch wird die Flexibilität der Beschichtung im Biegetest (T-Bend) signifikant erhöht, sowie die Beschichtungshärte reduziert.

7.2 Antifingerprint

- Zur Simulation von Fingerabdrücken wurden mehrere Stempelmaterialien und Prüfmedien getestet.
- Die Applikation eines künstlichen Fingerabdrucks mit Methode 4 (Silikonstempel und Vaseline) führte zum gewünschten Ergebnis. Mit Hilfe dieser Methode können reproduzierbare, in sich homogene künstliche Fingerabdrücke auf Lackoberflächen aufgebracht werden.
- Mit Hilfe der Quantiz[®] Hellfeldbeleuchtung gelang es, Fingerabdrücke zu visualisieren. Somit konnten Fingerabdrücke unabhängig vom Farbton sichtbar gemacht werden und in Bezug auf Homogenität geprüft werden.
- Die in der Folge entwickelte „Quantiz[®] - Origin[®]“ Analysenmethode ermöglicht es, künstliche Fingerabdrücke zu quantifizieren und diese mit menschlichen Fingerabdrücken zu vergleichen. Mit diesem Tool ist es möglich, Intensitätsprofile von beliebigen Fingerabdrücken zu erstellen und diese miteinander zu vergleichen.
- Der AFP - Test ermöglichte es, verschiedene Oberflächen bezüglich AFP – Erkennbarkeit zu beurteilen. Dunkle Farben sowie mittlere Glanzgrade (40 und 80) sowie glatte Oberflächen zeigen die größte Empfindlichkeit.

- Der Reinigungsversuch zeigte, dass die Reinigungseigenschaften vom Glanzgrad und der Oberflächenstruktur abhängig sind. Sie verbessern sich mit zunehmendem Glanzgrad.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Meuthen B, Jandel AS; Coil Coating. Bandbeschichtung: Verfahren, Produkte und Märkte; Kapitel 1; 1 Auflage; Vieweg-Verlag; 2005;
- [2] Interne Konzernpräsentation voestalpine
- [3] voestalpine Stahl GmbH; COLOFER – Die Verarbeitung, Medias Marketing & Werbung
- [4] A Goldschmidt; HJ Streitberger; BASF Handbook on Basics of Coating Technology, BASF Coatings AG; Münster, 2003
- [5] A Goldschmidt; HJ Streitberger; BASF Handbuch Lackiertechnik, BASF Coatings AG; Vincentz Verlag; Hannover; 2002
- [6] AiF-Bericht; Forschungsinstitut für Pigmente und Lacke; Zusammenhang zwischen viskoelastischen Eigenschaften und mechanischer Oberflächenbeständigkeit; Projekt-Nr: 14002 N; 2002
- [7] Serra M. G., Dhondt C., Benoit C., Ostwald C., Strauß B.; Enhancement of stainless and pre-painted steel sheets aesthetic performance by means of scratch- and fingerprint-resistant coatings; technical steel research; Contract No 7210-PR/319; 2006
- [8] V. Jardret et al.; „Journal of Coatings Technology; Vol. 72; No. 907; pp 79 – 88; 2000
- [9] Serra M. G., Dhondt C., Benoit C., Ostwald C., Strauß B.; Enhancement of stainless and pre-painted steel sheets aesthetic performance by means of scratch- and fingerprint-resistant coatings; technical steel research, 2006
- [10] Osterhold M, Wagner G.; Methods for characterizing the mar resistance; Progress in Organic Coatings 45; 365–371; 2002
- [11] Fies M., Menzei K., Kutschera M., Gruber N.; Kratzfeste UV-Beschichtungen; Farbe und Lack 04; 2008
- [12] Serra M. G., Dhondt C., Benoit C., Ostwald C., Strauß B.; Enhancement of stainless and pre-painted steel sheets aesthetic performance by means of scratch- and fingerprint-resistant coatings; technical steel research, 2006
- [13] Tomastik J., Ctvrtlik R.; Nanoscratch test – A tool for evaluation of cohesive and adhesive properties of thin film coatings; EPJ Web of Conferences 48, 2013

- [14] Nothelfer-Richter R., Klinke E., Eisenbach C.D.; Evaluation of the Scratch Resistance with Nano- and Multiple Scratching Methods; Macromol. Symp. 187; 853-860; 2002
- [15] Bertrand-Lambotte P., Loubet P.; Verpy C., Pavan S.; Nano-indentation, scratching and atomic force microscopy for evaluating the scratch resistance of automotive clearcoats: study of the ductile scratches; Thin Solid Films 398-399; 306-312; 2001
- [16] Fies M., Menzei K., Kutschera M., Gruber N.; Kratzfeste UV-Beschichtungen; Farbe und Lack 04; 2008
- [17] Ranjabar Z., Rastegar S.; Evaluation of mar/scratch resistance of a two component automotive clear coat via nano-indentor; Progress in Organic Coatings 64; 387-391; 2009
- [18] Serra M. G., Dhondt C., Benoit C., Ostwald C., Strauß B.; Enhancement of stainless and pre-painted steel sheets aesthetic performance by means of scratch- and fingerprint-resistant coatings; technical steel research; Contract No 7210-PR/319; 2006
- [19] Linda Y.L. W., Ngianb S.K., Chen Z., Xuanc D.T.T.; Quantitative test method for evaluation of anti-fingerprint property of coated surfaces; Applied Surface Science 257; 2965–2969; 2011
- [20] Abriebprüfgerät ABREX[®]-CE; Handbuch V3.35; Innowep GmbH; Würzburg 2015
- [21] Brock T., Grotekales M., Mischke P.; Lehrbuch der Lacktechnologie; 2 Auflage; Vincentz Verlag; Hannover; 1998
- [22] Ehrenstein G.W., Riedel G., Trawiel P., Praxis der Thermomechanischen Analyse von Kunststoffen; 2. Auflage; Carl Hanser Verlag; München; 2003
- [23] Rösler J., Harders H., Bäker M.; Mechanisches Verhalten der Werkstoffe; 1. Auflage; Teubner Verlag; Wiesbaden 2003
- [24] Ehrenstein G.W., Riedel G., Trawiel P.; Praxis der Thermomechanischen Analyse von Kunststoffen; 2. Auflage; Carl Hanser Verlag; München; 2003
- [25] <http://www.tainstruments.com/wp-content/uploads/TMA.pdf>
- [26] [Meuthen B, Jandel AS; Coil Coating. Bandbeschichtung: Verfahren, Produkte und Märkte; 1 Auflage; Kapitel 3; Vieweg-Verlag; 2005]

- [27] Neumaier P.; Bestimmung physikalischer und mechanischer Eigenschaften von Lackschichten; Helmut Fischer GmbH; Sindelfingen; 1992
- [28] Michalzik G.; Martenshärte / Universalhärte, Vergleichbare Härtewerte für alle Werkstoffe und Werkstoffschichten; Stahl 2; 2001
- [29] Behncke H.-H.; Bestimmung der Universalhärte und anderer Kennwerte an dünnen Schichten, insbesondere Hartstoffschichten; Härterei-Technische Mitteilungen 48; 1993
- [30] Helmut Fischer GmbH+Co.KG; Zukunftsweisende Technologie in der Mikrohärtebestimmung; Sindelfingen; 2005
- [31] Norm DIN EN ISO 14577-1 Metallische Werkstoffe Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter. Teil 1: Prüfverfahren
- [32] Norm DIN EN ISO 14577-4 Metallische Werkstoffe Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter. Teil 4: Prüfverfahren für metallische und nichtmetallische Schichten
- [33] Meuthen B, Jandel AS; Coil Coating. Bandbeschichtung: Verfahren, Produkte und Märkte; 1 Auflage; Kapitel 6; Vieweg-Verlag; 2005
- [34] Norm DIN EN 13523-7 Bandbeschichtete Metalle Prüfverfahren, Teil 7: Widerstandsfähigkeit gegen Rissbildung beim Biegen (T-Biegeprüfung)
- [35] Meuthen B, Jandel AS; Coil Coating. Bandbeschichtung: Verfahren, Produkte und Märkte; 3 Auflage; Kapitel 5; Vieweg-Verlag; 2005
- [36] Ueda K., Kanai H., Suzuki T., Amari T.; Effects of mechanical properties of paint film on the forming of pre-painted steel sheets; Progress in Organic Coatings 43 (2001) 233-242
- [37] Norm DIN EN 13523-7 Bandbeschichtete Metalle Prüfverfahren, Teil 7: Widerstandsfähigkeit gegen Rissbildung beim Biegen (T-Biegeprüfung)
- [38] Norm DIN EN ISO 1518 Beschichtungsstoffe Ritzprüfung
- [39] Norm DIN EN ISO 12137-2 Beschichtungsstoffe- Bestimmung der Kratzfestigkeit – Teil2: Verfahren mit spitzem Stichel
- [40] <https://www.nanofocus.de/technologie/messprinzipien/usurf-technologie/>
- [41] NanoFocus Technologiebroschüre (D_100412_web)
- [42] MountainsMap® Handbuch; Digital Surf; Mai 2012; Frankreich
- [43] <https://www.nanofocus.de/technologie/messprinzipien/usurf-technologie/>

- [44]** BMW Norm PR 506: Durchführung eines Fingerprinttest an Oberflächen von Innenausstattungsteilen; September 2006
- [45]** DIN 53160-2: Bestimmung der Farblässigkeit von Gebrauchsgegenständen - Teil 2: Prüfung mit Schweißsimulanz
- [46]** Bauer K. H., Frömming K. H., Führer C.; Pharmazeutische Technologie, mit Einführung in die Biopharmazie; 9 Auflage; Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft; Stuttgart; 2012
- [47]** voestalpine: Arbeiten mit Luftumwälzofen R1

9 Anhang

Anlage 1 – Kratzfestigkeit, Härte, T-Bend, TMA

Pr – Nr.	Kratzfestigkeit KF	Mikroeindringhärte		T-Bend [T]
		HMk [N/mm ²]	Kriechen [%]	
		MW + s	MW + s	
27-16	15/15/15	195 / s = 3	9 / s = 2	2,5/2,5/2,5
28-16	24/23/24	124 / s = 7	19 / s = 1	0/0/0
29-16	26/26/26	58 / s = 1	40 / s = 1	0/0/0
30-16	27/26/25	138 / s = 1	18 / s = 1	0/0/0
31-16	17/17/17	170 / s = 4	17 / s = 1	0/0/0
32-16	21/21/21	74 / s = 4	32 / s = 1	0/0/0
33-16	25/24/24	70 / s = 3	38 / s = 1	1/1/1
34-16	19/19/19	129 / s = 1	20 / s = 1	1,5/1/1,5
35-16	24/24/23	56 / s = 2	36 / s = 1	0,5/0,5/0,5
67-16	21/21/21	34 / s = 1	28 / s = 2	0/0/0
68-16	23/23/23	140 / s = 4	22 / s = 1	0/0/0
69-16	27/27/26	167 / s = 6	16 / s = 1	0/0/0

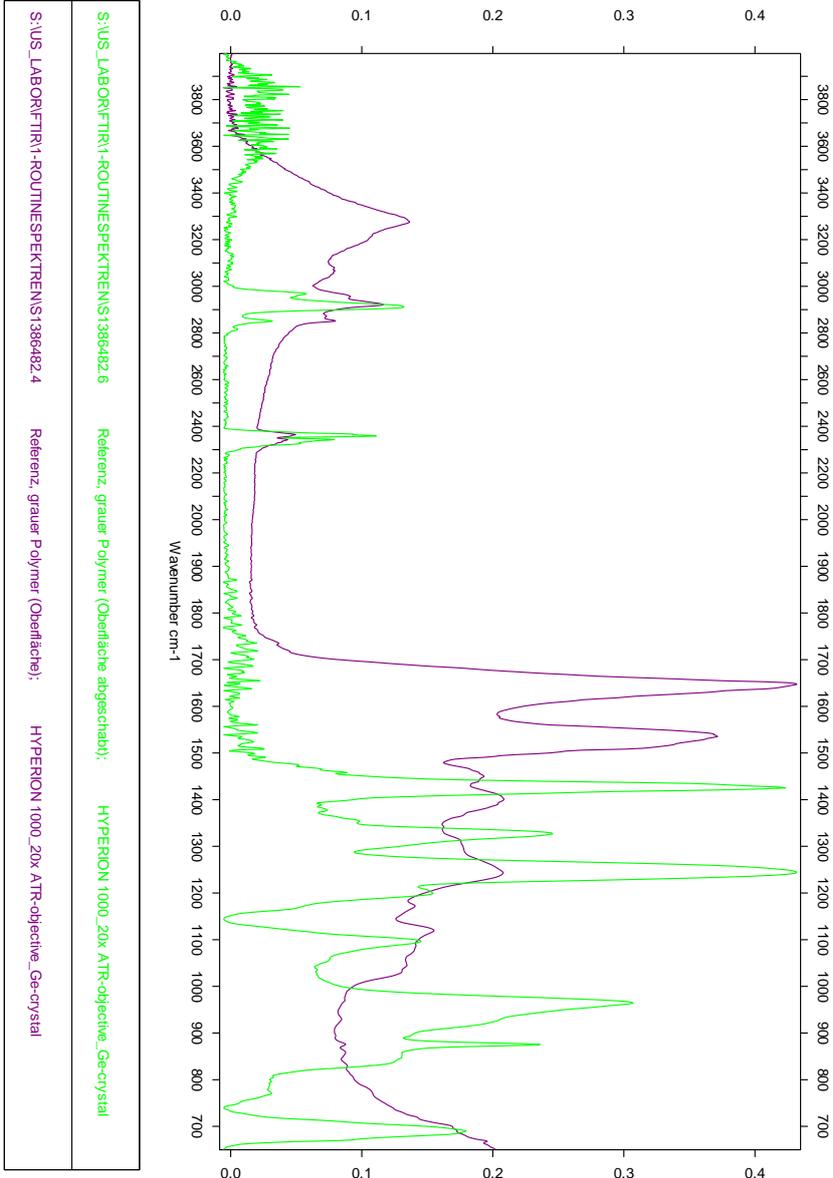
TMA Messung T _{g onset}				
	T _{g on} [°C]	T _{g on} [°C]	MW [°C]	s [°C]
27-16	37,6	37,6	37,6	0,0
28-16	32,4	31,5	32,0	0,6
29-16	25,1	26,3	25,7	0,8
30-16	37,7	34,2	36,0	2,5
31-16	37,4	37,0	37,2	0,3
32-16	29,8	29,7	29,8	0,1
33-16	27,6	28,0	27,8	0,3
34-16	37,1	39,2	38,2	1,5
35-16	31,2	31,4	31,3	0,1
67-16	27,0	27,2	27,1	0,1
68-16	40,2	39,0	39,6	0,8
69-16	39,2	39,5	39,4	0,2

TMA Messung Tg				
	Tg [°C]	Tg [°C]	MW [°C]	s [°C]
27-16	44,2	44,2	44,2	0,0
28-16	37,1	36,5	36,8	0,4
29-16	30,4	31,5	31,0	0,8
30-16	42,4	42,1	42,3	0,2
31-16	41,7	41,0	41,4	0,5
32-16	32,8	34,7	33,8	1,3
33-16	32,3	31,7	32,0	0,4
34-16	44,4	47,1	45,8	1,9
35-16	34,7	36,6	35,7	1,3
67-16	32,3	31,6	31,9	0,5
68-16	44,9	44,4	44,6	0,4
69-16	44,6	45,7	45,2	0,8

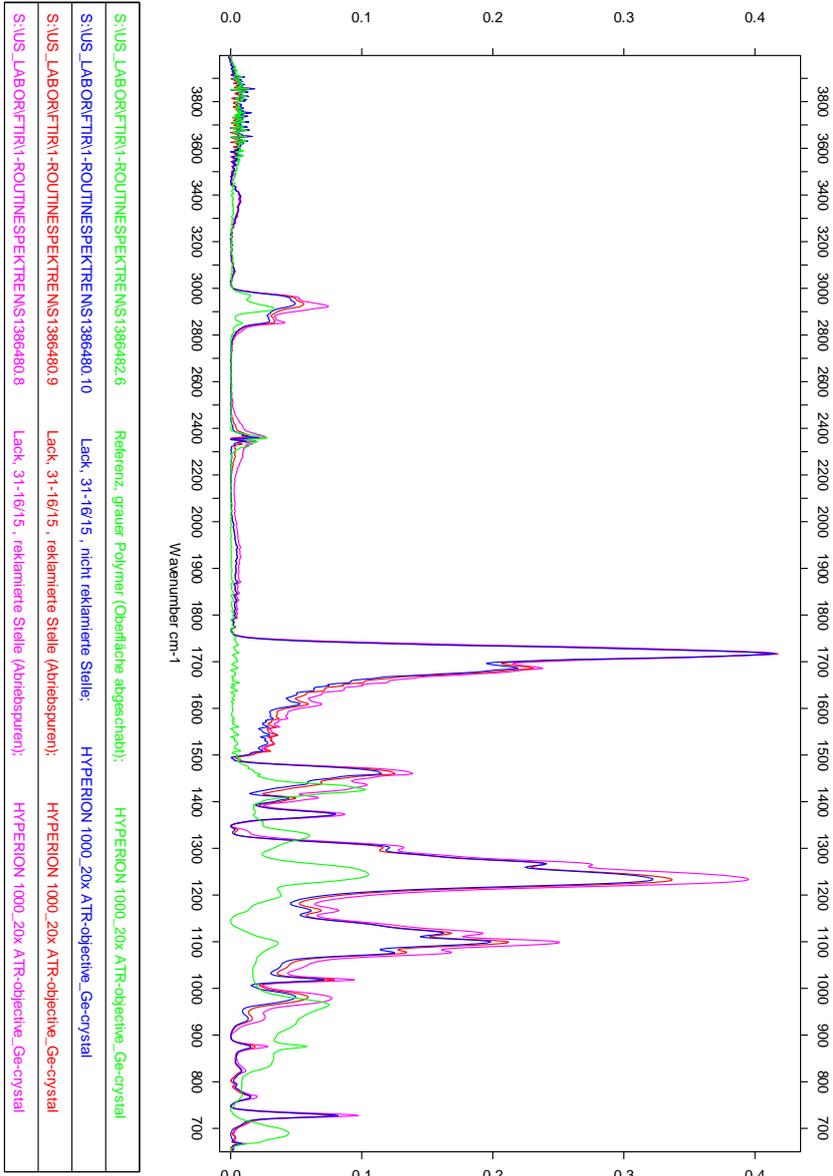
Anlage 2 – Messergebnisse Wochenproben

Pr-Nr.	HMk [N/mm ²]	KF	Pr-Nr.	HMk [N/mm ²]	KF
632-15	111	34	688-15	142	24
633-15	97	31	771-15	149	28
807-15	72	29	830-15	153	30
808-15	99	29	705-15	84	24
680-15	68	25	706-15	95	25
689-15	95	25	810-15	87	28
809-15	79	29	811-15	63	27
681-15	59	24	683-15	172	20
690-15	70	22	687-15	209	24
833-15	85	32	777-15	164	22
634-15	211	20	831-15	154	26
635-15	205	21	678-15	182	22
772-15	207	17	679-15	171	24
773-15	203	16	717-15	182	16
636-15	155	22	832-15	169	18
686-15	131	23	812-15	66	23
637-15	133	30	813-15	62	25
638-15	155	32	664-15	184	22
774-15	126	30	665-15	168	28
639-15	143	28	704-15	77	26
640-15	159	29	949-15	149	29
775-15	138	31			
776-15	136	31			
666-15	155	29			
682-15	157	28			

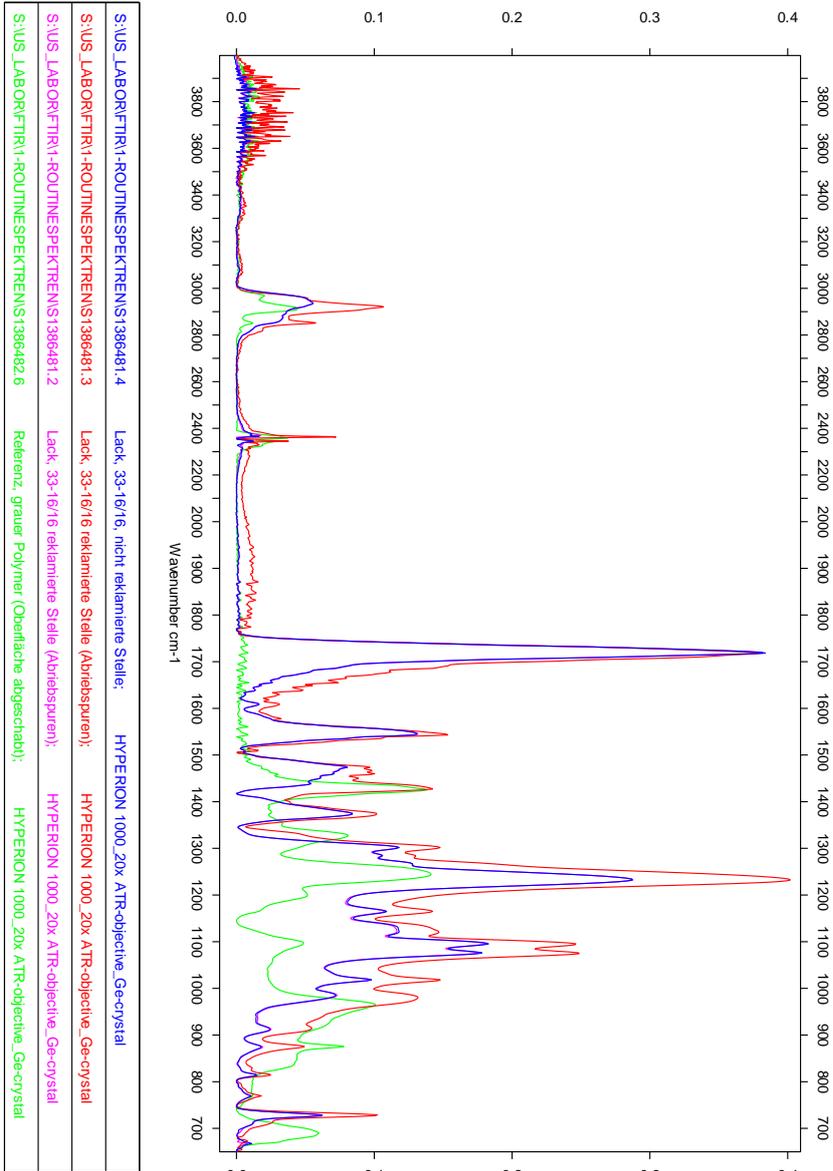
Anlage 3 – IR Spektrum Fingernagelkratzaufsatz



Anlage 4 – IR Spektrum Abrieb

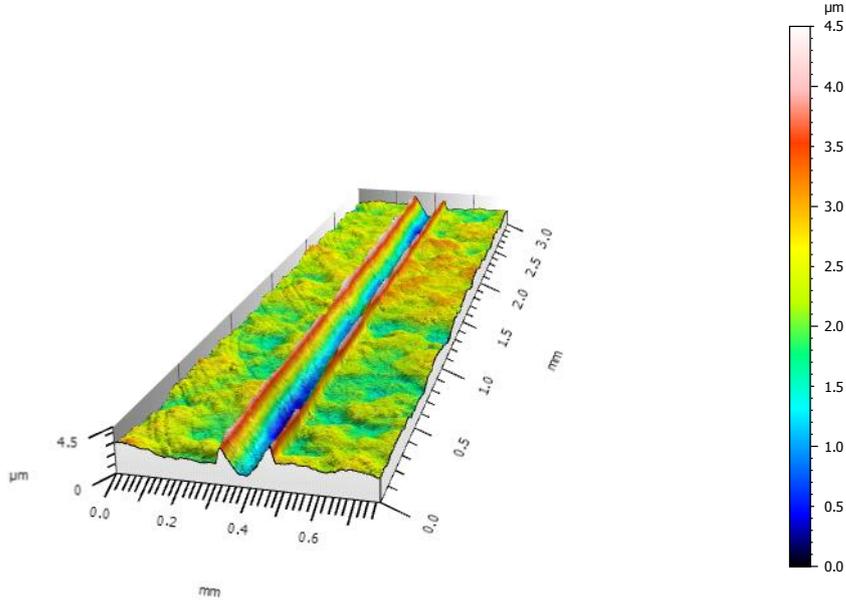


Anlage 5 – IR Spektrum Abrieb

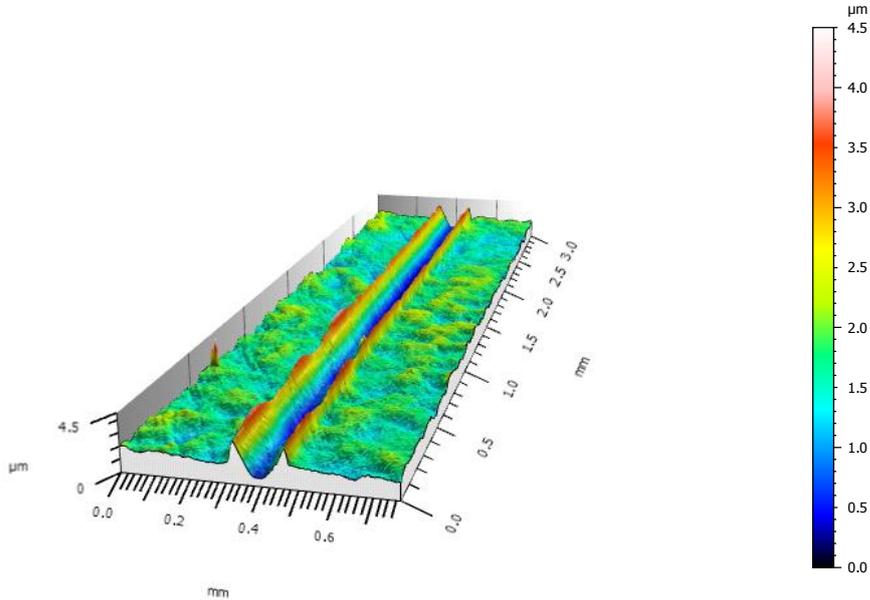


Anlage 6 – Topografiediagramme

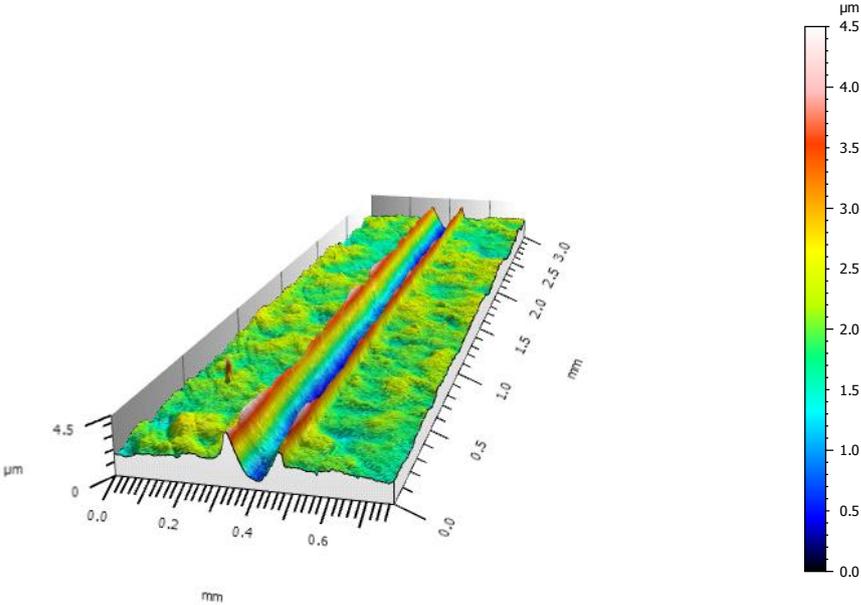
Probe 27-16 -1; Normklima



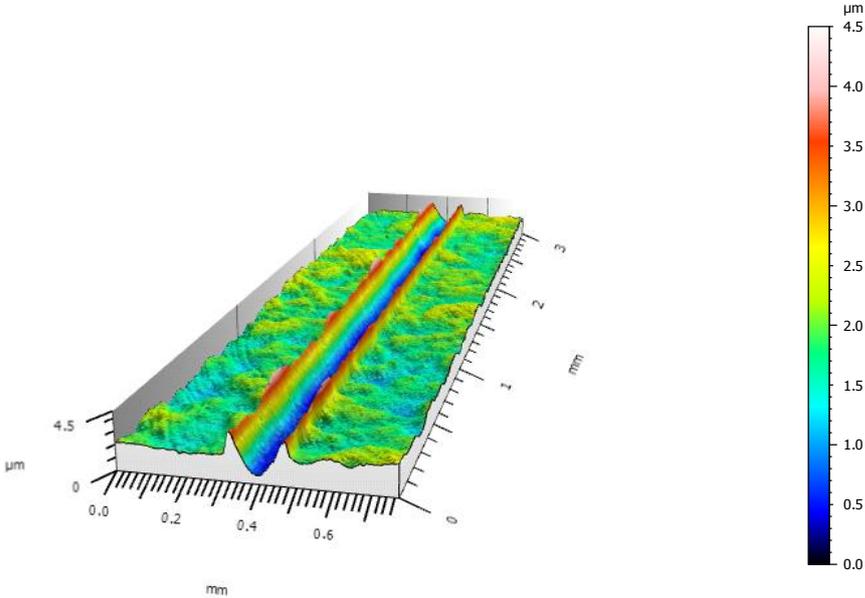
Probe 27-16 -2; Normklima



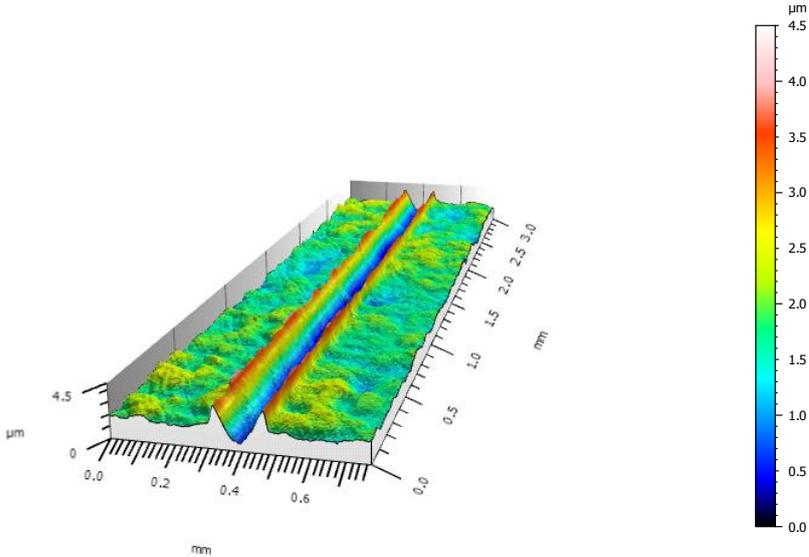
Probe 27-16 -3; Normklima



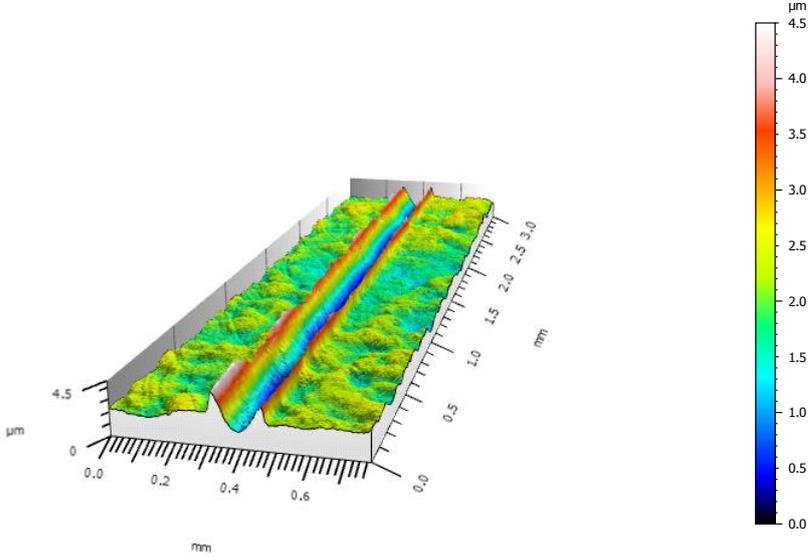
Probe 27-16 -1; Wasserlagerung



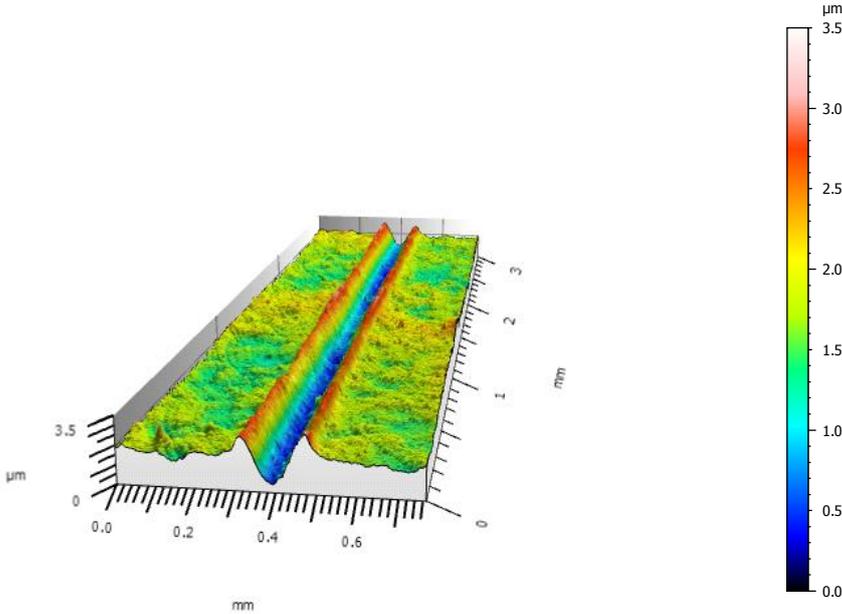
Probe 27-16 -2; Wasserlagerung



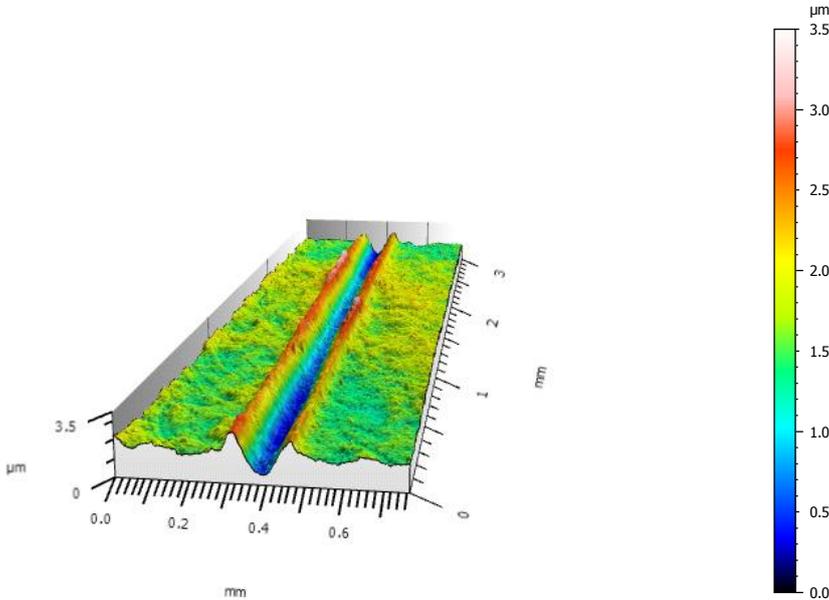
Probe 27-16 -3; Wasserlagerung



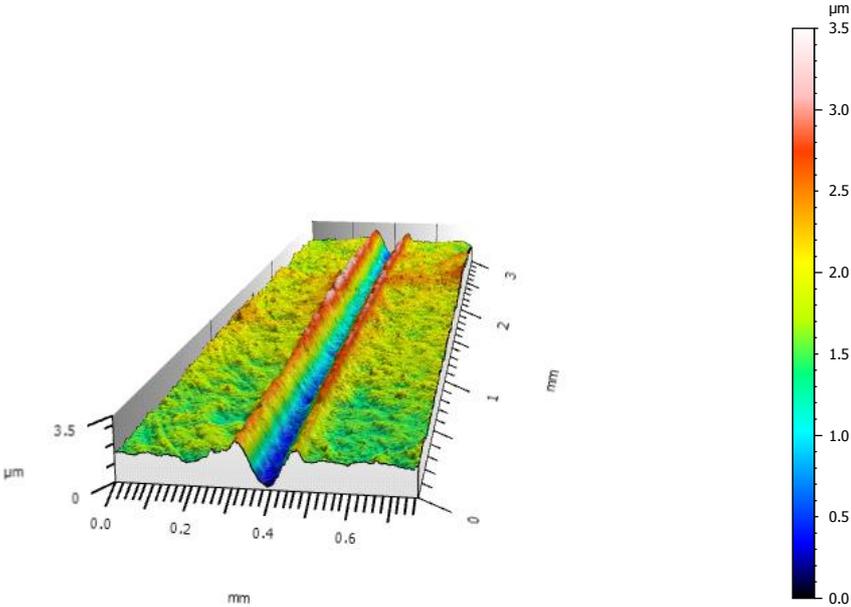
Probe 35-16 -1; Normklima



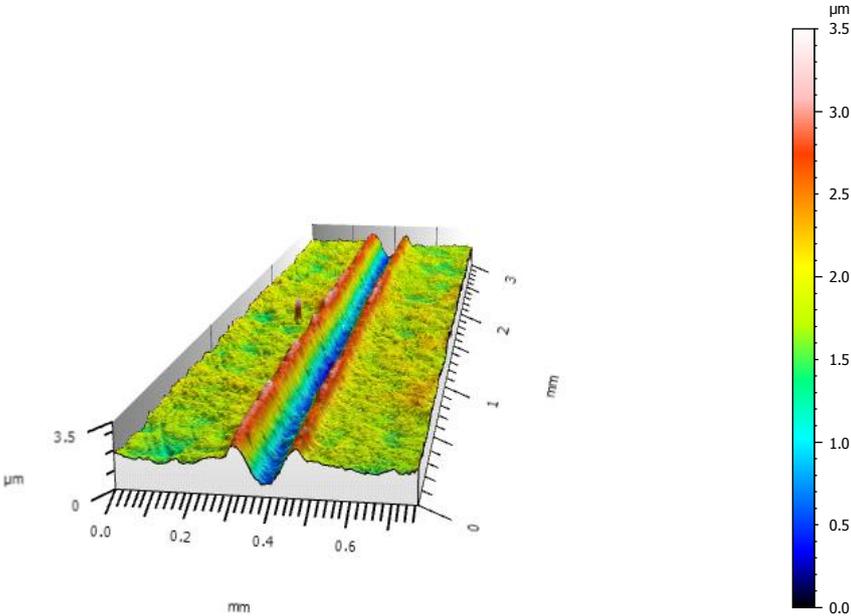
Probe 35-16 -2; Normklima



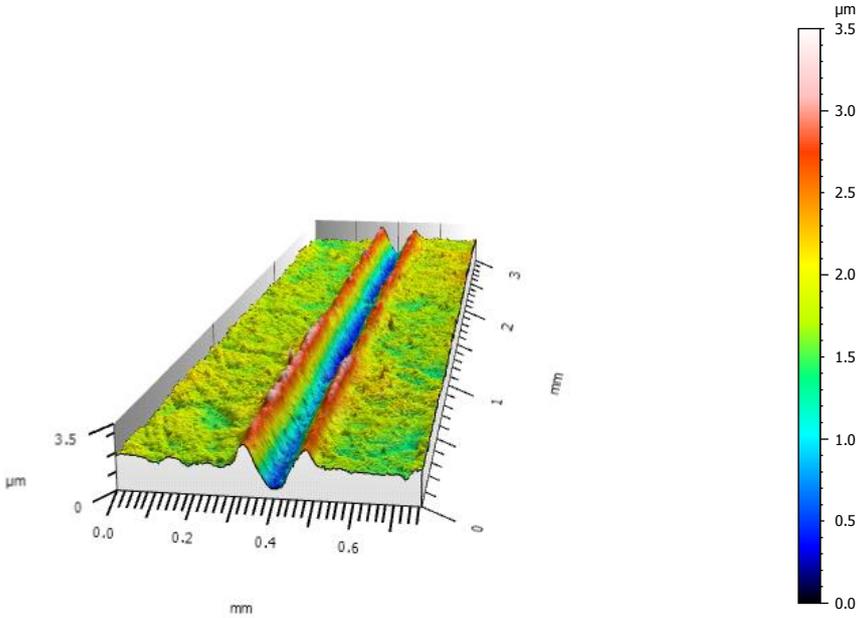
Probe 35-16 -3; Normklima



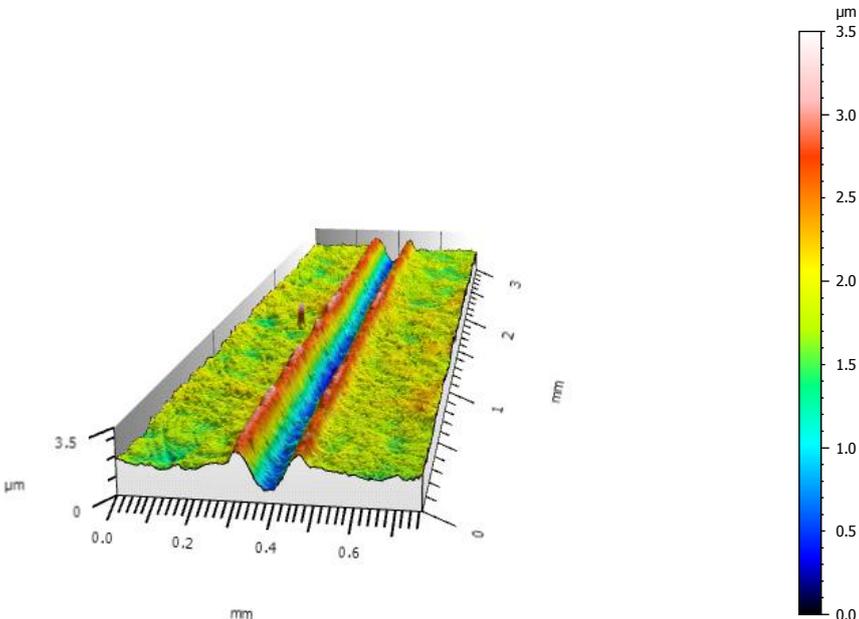
Probe 35-16 -1; Wasserlagerung



Probe 35-16 -2; Wasserlagerung



Probe 35-16 -3; Wasserlagerung



10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich von Lackierprozessen [1]	2
Abbildung 2: Bandbeschichtungsanlage [2].....	3
Abbildung 3: Einschichtaufbau [3]	6
Abbildung 4: Zweischichtaufbau mit Schutzfolie [3].....	6
Abbildung 5: Oberflächenschäden [7].....	11
Abbildung 6: plastische Deformation / Sprödbruch [7].....	11
Abbildung 7: Lichtreflexion bei plastischer Deformation [8]	12
Abbildung 8: Lichtreflexion bei Sprödbruch [8]	12
Abbildung 9: Übersicht Kratztests [2].....	13
Abbildung 10: AMTEC – Test [10]	14
Abbildung 11: Crockmeter [11]	15
Abbildung 12: Nano Scratch Test [13]	15
Abbildung 13: Erichsen Single Scratch Test.....	16
Abbildung 14: Abriebprüfgerät ABREX [®] -CE im „Scratch – Modus“	19
Abbildung 15: Prüfkraft [20]	20
Abbildung 16: Prüfstempel [20].....	21
Abbildung 17: Gewebe	21
Abbildung 18: Flüssigkeitskreislauf [20].....	22
Abbildung 19: Kratzeinsatzhalter mit Kunststoffeinsatz [20]	23
Abbildung 20: Kratzeinsatzhalter mit Kunststoffeinsatz	23
Abbildung 21: Silikonstempel.....	23
Abbildung 22: Änderung des spezifischen Volumens in Abhängigkeit von der Temperatur [23]	25
Abbildung 23: TMA Q400 EM [25]	27
Abbildung 24: TMA Q400 EM [25]	28
Abbildung 25: Penetrationsstempel [25]	28
Abbildung 26: Messzyklus [30]	32
Abbildung 27: Fischerscope H 100-C	33
Abbildung 28: T-Bend Zuordnung nach ECCA und NCCA Skalen [35]	35
Abbildung 29: Randfaserquerschnitt [36].....	35
Abbildung 30: Biegeversuch bis zur 2-T Biegung [37]	37
Abbildung 31: Kratzfestigkeitsprüfung voestalpine Stahl GmbH	38
Abbildung 32: Messaufbau NanoFocus [41]	39

Abbildung 33: Signalstärke [41]	40
Abbildung 34: Bilderstellung [41]	40
Abbildung 35: Konfokalmikroskop μ surf mobile [43]	43
Abbildung 36: Kratzfestigkeit gegen Mikrohärte	46
Abbildung 37: Kratzfestigkeit gegen Rissbildung	47
Abbildung 38: $T_{g_{on}}$ gegen Kriechen	48
Abbildung 39: Universalhalterung, Probenhalter, Kratzeinsatzhalter, Kunststoffhülse	49
Abbildung 40: Kratzspur mittels Kunststoffhülse	50
Abbildung 41: Modifikation Kratzeinsatzhalter	51
Abbildung 42: Kratzspur mittels Kunststoffhülse – modifiziert	51
Abbildung 43: Kratzspur unter 50-facher Vergrößerung	52
Abbildung 44: Aufnahme vom Randbereich der Abriebspur (50-fache Vergrößerung)	52
Abbildung 45: Tiefenprofilaufnahme im Randbereich (50-fache Vergrößerung)	53
Abbildung 46: Kratzeinsatzhalter - modifiziert	54
Abbildung 47: Kratzspuren (Prüfbedingungen: 1, 5 und 10N; 20 cm/s)	54
Abbildung 48: Kratzspur unter 20-facher Vergrößerung	55
Abbildung 49: Höhenprofil / Mikroskop Olympus BX 61 / Sprödbbruch	55
Abbildung 50: Kratzspur 5 N; 20 cm/s	57
Abbildung 51: Ermittlung der Eindringtiefe	57
Abbildung 52: Kratzspur, 1N, 70 cm/s, 20-fache Vergrößerung	60
Abbildung 53: Eindringtiefe Probe 27-16	60
Abbildung 54: Eindringtiefe Probe 29-16	61
Abbildung 55: Probe 29-16; Prüfkraft 1N	62
Abbildung 56: Probe 31-16; Prüfkraft 1N	63
Abbildung 57: Probe 29-16; Prüfkraft 5N	63
Abbildung 58: Probe 31-16; Prüfkraft 5N	64
Abbildung 59: Probe 29-16; Prüfkraft 10N	64
Abbildung 60: Probe 31-16; Prüfkraft 10N	65
Abbildung 61: Probe 27-16, Normklima	66
Abbildung 62: Probe 27-16, Wasserlagerung	67
Abbildung 63: Probe 35-16, Normklima	67
Abbildung 64: Probe 35-16, Wasserlagerung	68

Abbildung 65: Prüfarm mit Silikonstempel	70
Abbildung 66: Fingerabdruckapplikationsgerät.....	72
Abbildung 67: Normsilikonstempel	73
Abbildung 68: Stempel mit Stabilit [®] Auflage	73
Abbildung 69: Stempelkissen	74
Abbildung 70: Stempelkissenmaterialien	75
Abbildung 71: Kunstschweiß auf Lackoberfläche	75
Abbildung 72: Künstliche Fingerabdrücke mit Rapsöl	77
Abbildung 73: Fein verteilte Öltröpfchen auf Lackoberfläche.....	77
Abbildung 74: Substratblech.....	79
Abbildung 75: Künstlicher Fingerabdruck mit Vaseline.....	80
Abbildung 76: Künstlicher Fingerabdruck mit Vaseline / Silikonstempel.....	81
Abbildung 77: Stempelstruktur am Überträgerblech Rakel 4	82
Abbildung 78: Stempelstruktur am Überträgerblech Rakel 10	82
Abbildung 79: Quantiz Hellfeldbeleuchtung	84
Abbildung 80: Belichtung im „White-Soft-Modus“	85
Abbildung 81: Belichtung im „Bright-Field-Modus“	85
Abbildung 82: Künstliche und menschliche Fingerabdrücke im Vergleich	86
Abbildung 83: Analysenprozedere Origin	87
Abbildung 84: Grauwertintensitäten des extrahierten Bereiches – Fingerabdruck ist homogen.....	88
Abbildung 85: Applikationsreihenfolge.....	89
Abbildung 86: Intensitätsprofil der ganzen Probe	90
Abbildung 87: Grauwertintensität FA Stabilit [®] Stempel	90
Abbildung 88: Grauwertintensität FA Silikonstempel	91
Abbildung 89: Inhomogener Fingerabdruck.....	92
Abbildung 90: Silikonstempeloberfläche - künstlicher Abdruck auf Lackoberfläche .	92
Abbildung 91: Probenhalterungen mit definiertem Betrachtungswinkel	93
Abbildung 92: Temperaturverteilung der Oberfläche [47]	97
Abbildung 93: Proben mit künstlichen Fingerabdrücken.....	98
Abbildung 94: Fingerabdruckintensität in Abhängigkeit von Farbe, Glanzgrad und Oberflächenstruktur	99
Abbildung 95: Reinigungsversuch, System schwarz glatt, Glanzgrad 60, Aufnahme: Quantiz [®] Hellfeldbeleuchtung	103

Abbildung 96: Ergebnisse des Reinigungsversuches	104
Abbildung 97: Änderung der Mikrohärtigkeit bedingt durch Wasserlagerung	106
Abbildung 98: Änderung der Rissbildung bedingt durch Wasserlagerung	107

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Untersuchungsmethoden	19
Tabelle 2: Berechnete Werte für die Dehnung als Funktion des T-Wertes	36
Tabelle 3: Kenndaten der Proben	44
Tabelle 4: Messprogramm Fischerscope H100-C	45
Tabelle 5: Messprogramm TMA Q400 EM	45
Tabelle 6: Ergebnisse der Schnelltests	46
Tabelle 7: Probenkenndaten	50
Tabelle 8: Kenndaten des Mikroskops	56
Tabelle 9: Prüfparameter ABREX [®] -CE	58
Tabelle 10: Optische Beurteilung der Einzelkratzer	58
Tabelle 11: Mittelwert der Eindringtiefe und Standardabweichung	61
Tabelle 12: Prüfparameter ABREX [®] -CE	62
Tabelle 13: Prüfparameter ABREX [®] -CE	66
Tabelle 14: Applikationsbedingungen Methode 1	74
Tabelle 15: Zusammensetzung Schweißsimulanz	74
Tabelle 16: Applikationsbedingungen Methode 2	76
Tabelle 17: Applikationsbedingungen Methode 3	78
Tabelle 18: Masse an Vaseline pro 100 cm ²	80
Tabelle 19: Applikationsbedingungen Methode 4	81
Tabelle 20: Grauwertintensitäten der künstlichen Fingerabdrücke	89
Tabelle 21: Daten zu den verwendeten Grund- (BKZA1) und Decklacksystemen (BKZA2)	94
Tabelle 22: Daten zu dem verwendeten Klarlacksystem	94
Tabelle 23: Daten des Werkstoffes	94
Tabelle 24: Daten der Entfettung	95
Tabelle 25: Daten der Vorbehandlung	95
Tabelle 26: PMT, Verweilzeit und Ofentemperatur	96

Tabelle 27: Trockenschichtdicke und Rakelgröße	96
Tabelle 28: Probenmatrix.....	97
Tabelle 29: Beurteilungsschema	98
Tabelle 30: Prüfparameter ABREX-CE®	101
Tabelle 31: Probenkenndaten.....	102
Tabelle 32: Probenkenndaten.....	102
Tabelle 33: Zusammenfassung der Reinigungsparameter	103