



Antonia Rabl, BSc

Optimierung der Oberflächenvorbehandlung von Titanal als Klebvorbereitung für die Ski-Herstellung

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Maschinenbau

Eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Dipl.-Ing. Maximilian Stummer

Institut für Werkstoffkunde, Fügetechnik
und Umformtechnik

Graz, Juni 2017

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.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum

Unterschrift

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich fachlich und persönlich unterstützt haben und dadurch zum Gelingen dieser Masterarbeit beigetragen haben.

In erster Linie möchte ich mich beim Institut für Werkstoffkunde, Fügetechnik und Umformtechnik, im Besonderen bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sommitsch bedanken, der diese Masterarbeit ermöglicht und am Institut die nötige Infrastruktur für die Durchführung dieser Arbeit zur Verfügung gestellt hat.

Ein großes Dankeschön auch an meinen Beurteiler, Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Enzinger, der mit seiner fachlichen Unterstützung wesentlichen Anteil am Gelingen vorliegender Masterarbeit hat.

Ebenfalls herzlich bedanken möchte ich mich bei meinem Betreuer, Dipl.-Ing. Maximilian Stummer, der mir immer zur Seite stand und mich mit seinem fachlichen Wissen unterstützte.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern Hans und Andrea, die mir mein Studium ermöglicht und mich während meiner gesamten Studienzeit unterstützt haben. Ihnen möchte ich diese Arbeit widmen. Auch bei meinen beiden Brüdern Benedikt und Clemens, die mir immer wieder unter die Arme gegriffen haben, möchte ich mich herzlich bedanken.

Für die uneingeschränkte persönliche Unterstützung und die viele Geduld, die mir während meiner Studienzeit entgegengebracht wurden, möchte ich mich bei meinem Freund Hannes bedanken. In schwierigen Zeiten hat er mich immer wieder ermutigt und mir einen sehr starken emotionalen Rückhalt gegeben. Ohne ihn wäre diese Masterarbeit nicht entstanden.

Des Weiteren möchte ich mich bei der Firma Atomic, allen voran bei Michael Pfund, für die Unterstützung und vor allem für die einmalige Möglichkeit, solch ein interessantes Thema bearbeiten zu dürfen, bedanken.

Weiters möchte ich mich noch bei meinen Freunden Chris und Maria bedanken, die, egal zu welcher Tageszeit, immer ein offenes Ohr und vor allem viel Kaffee für mich hatten.

Kurzfassung

In der Skiindustrie werden für höhere Torsionssteifigkeiten und Laufruhe hochfeste Aluminiumlegierungen im Klebeverbund eingesetzt. Diese speziellen Legierungen, die auch im Automobil- oder Flugzeugbau verwendet werden, werden firmenintern als Titanal bezeichnet. Titanal liegt als gewalztes, unbehandeltes Fertigprodukt vor und muss vor der Verklebung oberflächenbehandelt werden, um entsprechende Haftwerte erreichen zu können. Die derzeitige Vorbehandlung umfasst den mechanischen Abtrag der Oxidschicht und die abschließende Absaugung des Schleifstaubs. Nach anschließender Verklebung kann es dabei vereinzelt zum Auftreten von lokalen Haftungslöchern im Klebeverbund kommen. Die Ursachen dieser lokalen Haftungslöcher sollen im Zuge dieser Masterarbeit analysiert und mögliche alternative Oberflächenbehandlungsmethoden untersucht werden. Dabei liegt der Fokus auf dem Erreichen von hohen Klebefestigkeiten. Die untersuchten alternativen Behandlungsmethoden sollen mittels einer einfachen Kostenabschätzung gereiht und als Grundlage für eine Investitionsentscheidung dienen.

Abstract

The ski industry uses high strength aluminium alloys in the adhesive compound in order to achieve higher torsional stiffness and smooth running. These special alloys that are also used in automotive engineering and aircraft construction are internally known as Titanal. Titanal is available as a rolled, untreated finished product and must be surface treated prior to bonding, to get a proper bonding strength. The current practice of pre-treatment includes the mechanical removal of the oxide coating with a subsequent removal of the abrasive dust by suction. Following this, the bonding takes place, which occasionally leads to locally appearing failures in the bonding. The analysis of the cause of the locally appearing failures is part of this master's thesis along with the testing of alternative surface treatment techniques. The main focus is on achieving a high bonding strength. Furthermore a simple assessment of costs should give an ascending order of the different surface treatments, which can serve as the basis for investment decisions.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	1
Kurzfassung	2
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	3
1.2 Ziele	3
2 Literatur.....	5
2.1 Aufbau und Werkstoffe von Ski	6
2.2 Belastungen am Ski	12
2.3 Grundlagen der Haftung	16
2.4 Oberflächentechnik	23
3 Experimentelle Untersuchungen.....	29
3.1 Ursachenfindung der Haftungslöcher	30
3.2 Alternative Oberflächenbehandlungen.....	36
3.3 Versuchsablauf	40
3.4 Kontaktwinkelmessung.....	40
3.5 Klebeversuche	51
4 Investitionskostenvergleich.....	64
4.1 Ultraschallgerät Sonorex Technik L 220 der Fa. Reichmann Industrieservice (ultraschall-anlagen.de)	68
4.2 Bandreinigungsanlage der Fa. SLE electronic GmbH.....	69
4.3 Injektor-Strahlkabine der Fa. SLF Oberflächentechnik GmbH	69
4.4 Kaltplasma MCP der Fa. Inocon.....	70
4.5 Heißplasma IC3 der Fa. Inocon.....	70
5 Zusammenfassung.....	73
6 Ausblick.....	76
7 Literaturverzeichnis	79
8 Abkürzungsverzeichnis.....	83

9	Abbildungsverzeichnis.....	84
10	Tabellenverzeichnis.....	88
11	Anhang.....	89

1 Einleitung

Geschichtlich betrachtet ist die Klebtechnik eine der ältesten Fügeverfahren. Bereits 4000 v. Chr. wurden natürliche Klebstoffe wie Proteine, Harze, Glutin oder sogar Blut eingesetzt. Die Natur diente dem Menschen als Vorbild, der, auf Basis der natürlichen Klebstoffe, diese an seine Zwecke angepasst und Kleben zu einem der wichtigsten Fügeverfahren weiterentwickelt hat [1].

Kleben gehört neben Schweißen und Löten zu den stoffschlüssigen Verbindungstechniken (siehe Abbildung 1-1) und kann im klassischen Sinne nicht zerstörungsfrei gelöst werden [1].

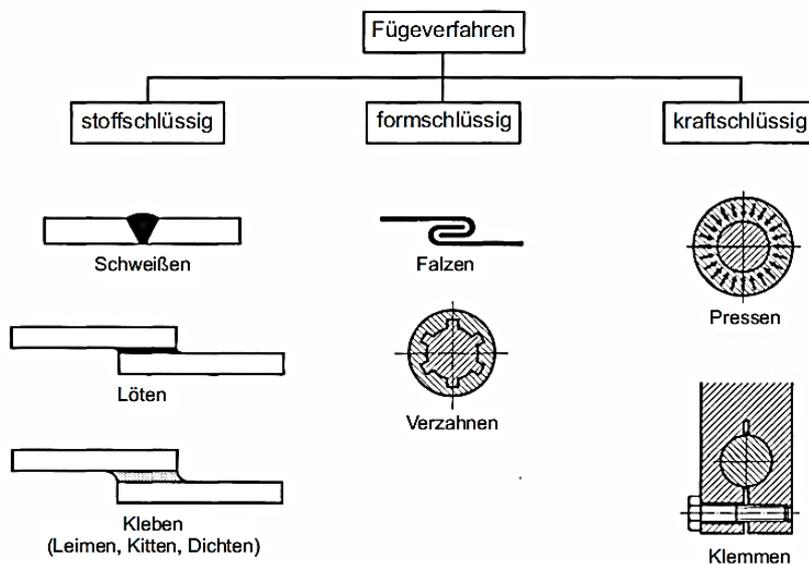


Abbildung 1-1: Einteilung der Fügeverfahren nach der Verbindungsbildung [2]

Ein Leben ohne Klebstoffe wäre heutzutage gar nicht mehr vorstellbar – vor allem im Leichtbau sind die Vorteile des Klebens nicht mehr wegzudenken. Doch nicht nur im Leichtbau, auch in vielen Bereichen des Alltags erfüllen Klebstoffe elementare Aufgaben (z.B. Nahrungsmittelindustrie, Haushalt, Medizin), die ohne sie gar nicht erst möglich wären. Trotz der langsamen Entwicklung, die die Klebstoffindustrie erfahren hat, ist die Nutzung in der heutigen Zeit sehr vielfältig [1,3]. Belegt wird diese Tatsache durch die Produktionsmenge an Klebstoffen in Deutschland. In 2015 wurden 820.000 Tonnen Klebstoff hergestellt (siehe Abbildung 1-2). Und die Tendenz ist aufgrund der großen Produktvielfalt steigend. Aufgrund neuer Entwicklungen tun sich immer wieder neue Anwendungsfelder auf, für die maßgeschneiderte Klebstoffe entwickelt werden.

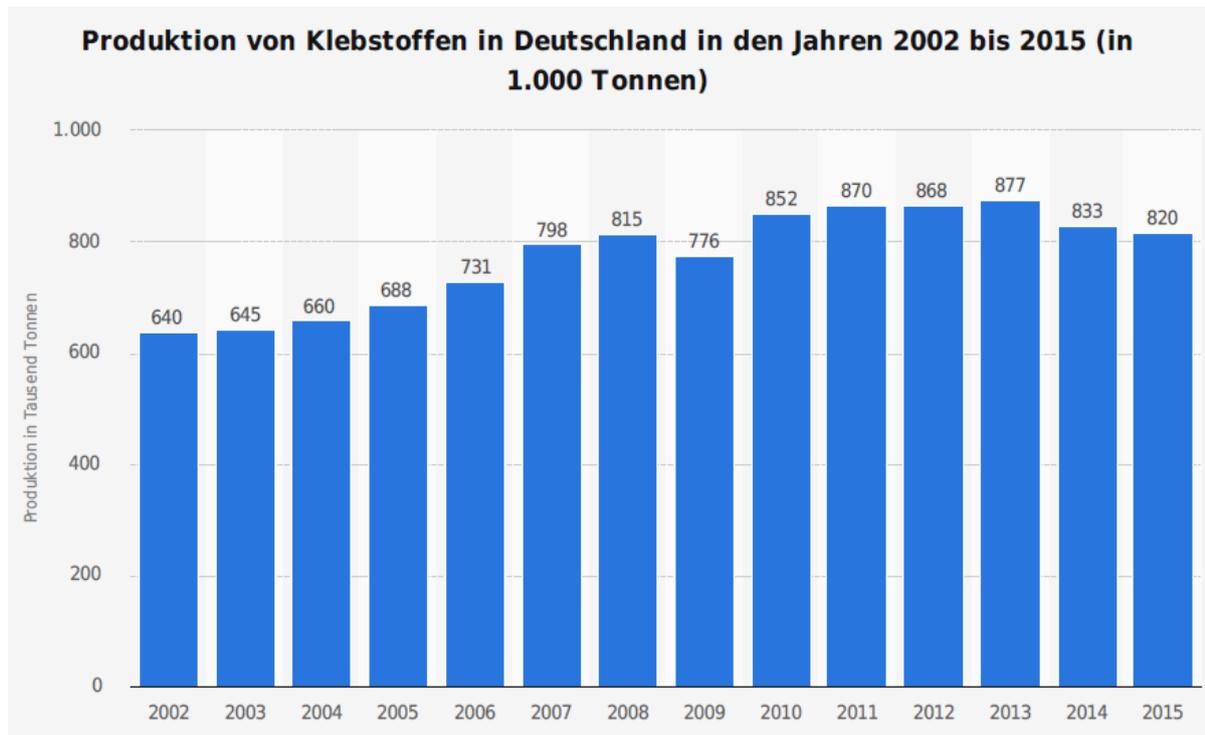


Abbildung 1-2: Produktion von Klebstoffen in Deutschland in den Jahren 2002 bis 2015 (in 1.000 Tonnen)
[4]

Während vor allem im klassischen Maschinenbau nach wie vor Fügeverfahren wie z. B. Nieten, Schweißen, Schrauben, etc. dominieren, etabliert sich das Kleben mit Hochleistungsklebstoffen aufgrund der großen Flexibilität gegenüber den anderen Fügeverfahren immer mehr in vielen industriellen Anwendungen [5]. Zu den Industriebereichen in denen die Klebstoffanwendungen überwiegen zählen unter anderem:

- Baugewerbe/Handwerk
- Papier-/Verpackungsindustrie
- Fahrzeugbau
- Maschinen-/Apparatebau
- Elektronik
- Medizintechnik [1]

Aufgrund der oben genannten Vorteile gilt das Kleben als universelles Fügeverfahren mit dem man eine Vielzahl an technisch nutzbaren Werkstoffen fügen kann. Dabei passt sich der Klebstoff an die Oberflächenbeschaffenheit des Substrates an [1]. Dank der Klebtechnik wurde die Herstellung von Verbundwerkstoffen ermöglicht, denen eine enorme Bedeutung zukommt [3].

1.1 Motivation

Besonders die Sportindustrie profitiert von den Weiterentwicklungen im Bereich der Klebstofftechnik und der Verbundwerkstoffe. Dadurch lassen sich leichtere, festere und verwindungssteifere Produkte herstellen. Diese Eigenschaften sind in der Sportindustrie von Bedeutung. [6].

Begurtungen aus sogenanntem PrePreg, die die Verformungskräfte, die auf den Ski wirken, aufnehmen, besitzen eine hohe Stabilität und Torsionssteifigkeit, eine gute Schlagbeanspruchung und ein hohes Energieaufnahmevermögen. Dadurch werden die Fahreigenschaften eines Skis maßgebend bestimmt [6]. Doch nicht nur Verbundwerkstoffe sind in der modernen Skiherstellung von großer Bedeutung.

Da in der Sportindustrie die Forderung nach Gewichtsreduktion, höherer Automatisierbarkeit und Designfreiheit im Vordergrund steht, zählt Kleben in diesem Industriebereich als das wichtigste Fügeverfahren [7]. Durch die Klebeverbindung werden nicht nur eine gleichmäßige Spannungsverteilung [8] und eine flächige Krafteinleitung [9] erreicht, der Klebstoff übernimmt auch eine abdichtende Funktion gegenüber Flüssigkeiten und besitzt schwingungsdämpfende Eigenschaften [7].

Gerade in einer skisportaffinen Nation wie Österreich, ist das Interesse an der Weiterentwicklung und Verbesserung auch im permanenten öffentlichen Fokus – umso mehr freut es mich, dieses Thema im Zuge meiner Masterarbeit bearbeiten zu können. Das Auftreten von lokalen Haftungslöchern bei Klebungen von verschiedenen Materialien zu minimieren ist gleichermaßen interessant wie herausfordernd.

1.2 Ziele

Das Ziel der vorliegenden Arbeit, die in Zusammenarbeit mit der Fa. Atomic entstanden ist, ist die Optimierung der Oberflächenvorbereitung für Klebungen in der Skiherstellung. Bei höherpreisigen Ski wird in den Klebeverbund Titanal, eine hochfeste Aluminiumlegierung, eingearbeitet. Titanal wirkt als tragendes Element in der Begurtung, da es den Ski versteift, laufruhig macht und die Stauchneigung reduziert [10]. Die Konstruktion der Ski, bei denen Titanal zum Einsatz kommt, erfolgt als Sandwichbauweise – der Ski wird hierbei schichtweise von unten nach oben aufgebaut. Titanal gibt es in zwei Ausführungen: Typ 1, die unbehandelte, blanke Version, und Typ 2 eine chemisch, mittels Phosphorsäureanodisation (PSA) vorbehandelte Variante. Aus wirtschaftlichen Gründen wird das chemisch vorbehandelte Titanal allerdings nur in vereinzelt Modellen eingesetzt.

Im Zuge der vorliegenden Arbeit sollen die Ursachen der lokal auftretenden Haftungslöcher geklärt, alternative Oberflächenvorbehandlungen durchgeführt und analysiert werden. Um eine Aussage über die anfallenden Kosten der unterschiedlichen Oberflächenvorbehandlungsverfahren machen zu können, soll außerdem eine Kostenabschätzung erstellt werden.

2 Literatur

Der Weltmarkt für Ski ist sehr stabil – jährlich werden rund 3 Mio. Paar Alpinski weltweit abgesetzt. Allein in Österreich belaufen sich die jährlichen Verkäufe auf 370.000 Paar Ski [11]. Mit bekannten Skimarken Atomic, Blizzard, Fischer, Head und Kneissl nimmt die österreichische Skiindustrie mit einer Exportquote von rund 80% einen international hohen Stellenwert ein [12].

Die Firma Atomic wurde 1955 von Alois Rohmoser gegründet, das Werk in Altenmarkt im Pongau wurde 1971 gebaut [13]. Nach vielen Höhen und Tiefen wurde 1994 Konkurs beantragt. Kurz darauf erwarb der finnische Amer Sports Konzern die Firma. Seit damals gehört Atomic zum finnischen Sportausrüstungshersteller, zu dem unter anderem auch Salomon, Wilson und Suunto gehören.

Mittlerweile ist Atomic Marktführer bei Alpinski (siehe Abbildung 2-1), bei Skischuhen liegt Schwesterfirma Salomon vorne [14]. In 2016 erwirtschafteten beide Firmen, die gemeinsam die Winter Sports Division Group von Amer Sports bilden, ein Umsatz von rund 400 Mio. Euro. Der Gesamtumsatz von Amer Sports belief sich in besagtem Jahr auf 2.622,1 Mio. Euro [15].

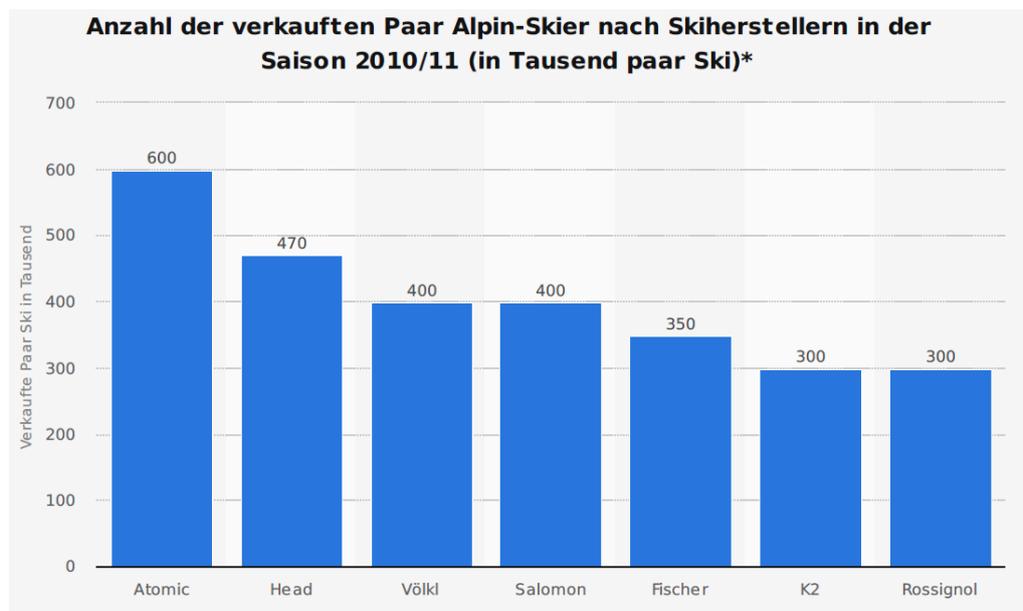


Abbildung 2-1: Anzahl der verkauften Paar Alpin-Ski nach Skiherstellern in der Saison 2010/11 [16]

Im Werk in Altenmarkt im Salzburger Pongau werden Ski der mittleren und oberen Preisklasse erzeugt. Atomic hat jedoch eine zweite Produktionsstätte in Bulgarien, in der die günstigeren Modelle hergestellt werden. Im Jahr 2016 wurden in Summe 305.000 Paar Alpinski und 72.000 Paar Langlaufski von Atomic hergestellt [17].

2.1 Aufbau und Werkstoffe von Ski

Ein Ski besteht aus bis zu zehn Lagen und 35 Komponenten. Neben Glasfaser-Einlagen, Kunststoff-Seitenwangen, Gummiteilen, Metallspitzen und Holz findet man bei Premium-Ski auch eine Schicht aus Titanal im Verbund.

Die Produktionszeit eines Skis beträgt im Durchschnitt 25 Minuten, wobei der Großteil der Arbeit bei der Herstellung noch manuell durchgeführt wird. Nachdem die einzelnen Lagen in der richtigen Reihenfolge und jeweils mit einer Schicht Klebstoff dazwischen zusammengeklebt werden, wird der Sandwichverbund für zehn Minuten bei 135 °C zu einem richtigen Ski verpresst und zur Endfertigung weitergebracht [14].

Der genaue Aufbau variiert je nach Verwendungszweck. Grundsätzlich unterscheidet man drei Typen von Ski-Modellen:

- Alpinski für die Abfahrt,
- Nordische Ski für den Langlauf und
- Sprungski, die ihre Anwendung im Skispringen haben.

Jedes dieser Ski-Modelle kann wiederum in unterschiedlich viele Untertypen eingeteilt werden [18].

Bei der Konstruktionsform unterscheidet man prinzipiell vier Grundbauarten (Abbildung 2-2), die den Fahrcharakter des Skis wesentlich bestimmen:

- **ad a) Injektionsbauweise:** Bei dieser Konstruktionsweise werden alle Skibauteile in einer Form fixiert. Zwischen Ober- und Untergurt wird unter Druck ein Schaum aus Polyurethan eingespritzt, der erhärtet und die Funktion des Kerns übernimmt [19].
- **ad b) Torsions- / Kastenbauweise:** Hierbei handelt es sich um eine sehr aufwendige Bauweise, bei der der Kern mit einem Laminat aus Carbon umwickelt und mit Hilfe von Harz unter Druck und hoher Temperatur verbunden wird [19].
- **ad c) Sandwichbauweise:** Die Konstruktion, die auch heute noch in Handarbeit erfolgt, zeichnet sich durch einen schichtweisen Aufbau aus. Die Ski-Schichten werden von Unten nach Oben in die Skiform eingelegt. Anschließend werden die Bauteile mit Harz unter Druck und hoher Temperatur verbunden [19].
- **ad d) Schalenbauweise:** Die Bauteile werden in eine vorgegebene Kunststoffschale, die aus dem Obergurt und den Seitenwangen besteht, eingelegt und verklebt. Durch die Schale ist eine direktere Kraftübertragung auf die Kante möglich [19,20].

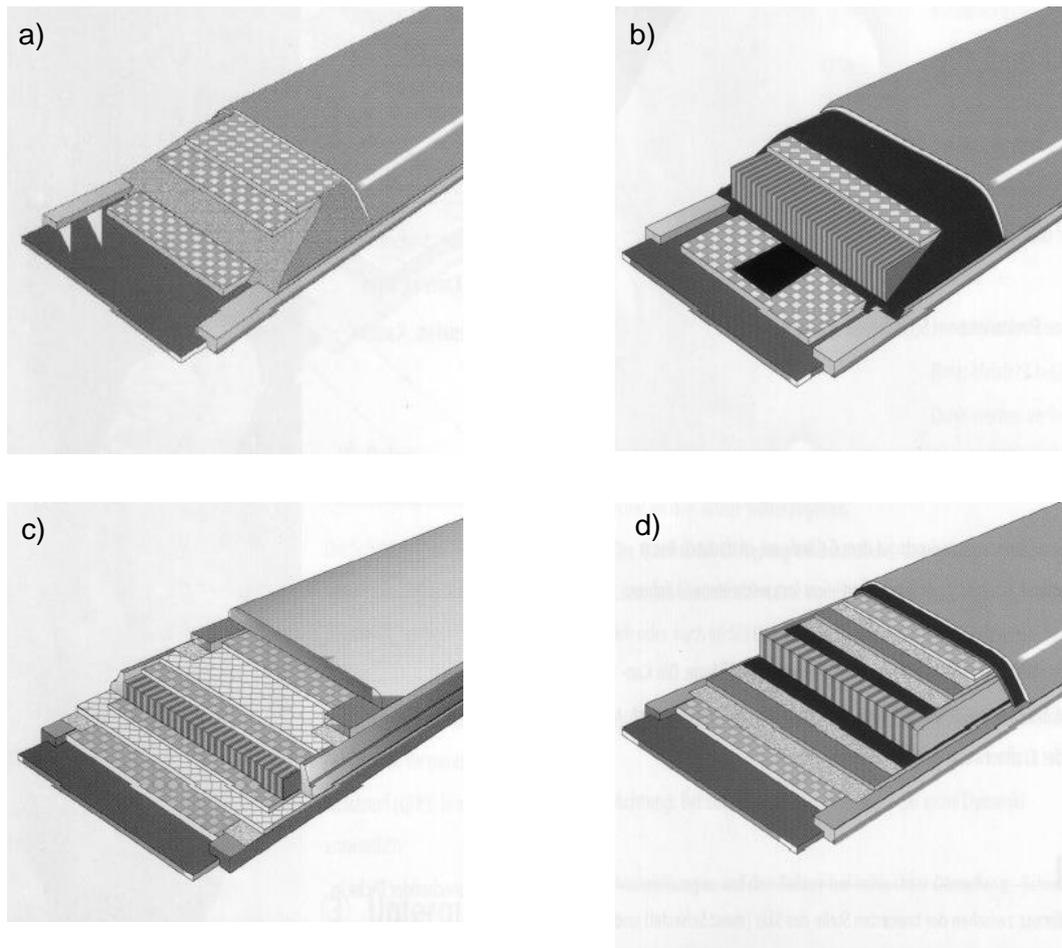


Abbildung 2-2: Ski-Bauweisen: a) Injektionsbauweise, b) Torsionsbauweise, c) Sandwichbauweise, d) Schalenbauweise [21]

Alle hochpreisigen Ski, vor allem Rennski, werden heutzutage in der Sandwichbauweise, d.h. Schicht für Schicht aufgebaut, da diese Art der Konstruktion eine sehr präzise Verarbeitung zulässt, einfach feine Abstimmungen vorgenommen werden können und der Ski sehr leicht modifiziert bzw. individualisiert werden kann [20]. Da Titanal für die Begurtung vorwiegend in der Sandwichbauweise eingesetzt wird, wird im Folgenden nur diese Bauweise diskutiert.

Abbildung 2-3 verdeutlicht den Aufbau eines Skis in der Sandwichbauweise mit den unterschiedlichen Lagen. Jede der Lagen, die aus unterschiedlichen Werkstoffen besteht, erfüllt andere Funktionen. Um einen Überblick über die Lagen zu bekommen, werden diese im Folgenden kurz beschrieben.

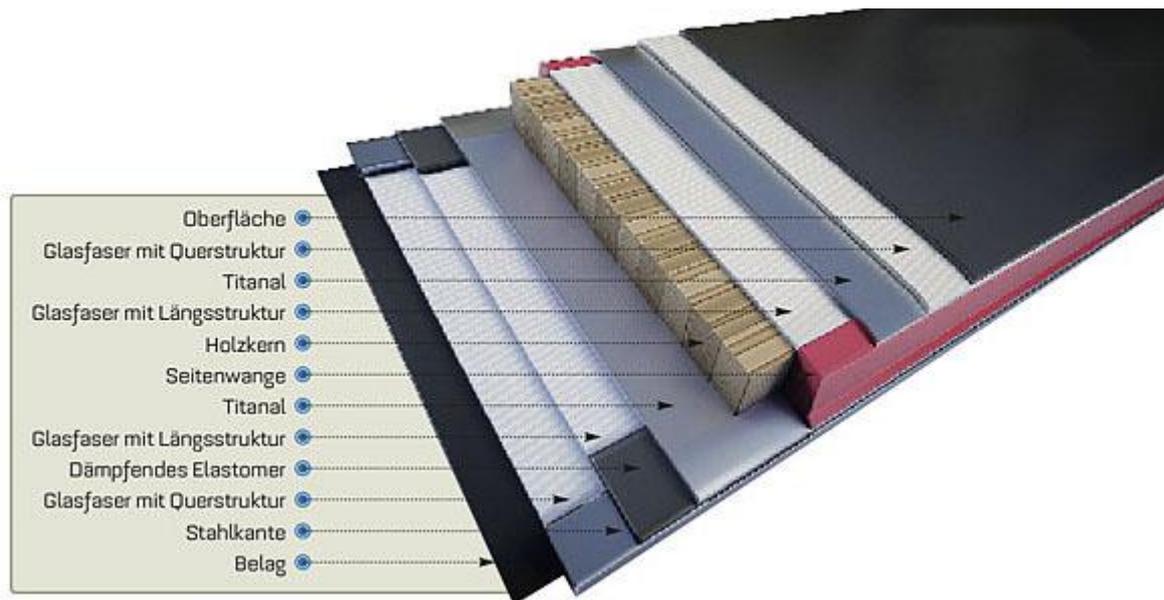


Abbildung 2-3: Querschnitt einer Sandwichkonstruktion mit Seitenwangen [22]

Aufbau

Kern

Die Grundlage des Verbundes bildet der Holzkern, der ein wichtiges Qualitätsmerkmal darstellt. Diese zentrale Struktur im Inneren des Skis, wird von den Gurten, der Oberfläche, den Kanten und dem Belag eingefasst.

Für den Holzkern wird neben Massivhölzern auch geleimtes Schichtholz verwendet. Dadurch lassen sich positive Eigenschaften wie Schwingungsdämpfung und Steifigkeit verschiedener Hölzer kombinieren. Die Dicke und die Holzart sind ausschlaggebend für die Härte des Skis. Durch die hygroskopischen Eigenschaften von Holz können die mechanischen Eigenschaften je nach Umgebungsbedingungen – und der damit verbundenen, ändernden Holzfeuchte – variieren [23]. Der Kern bestimmt die Fahreigenschaften des Skis und beeinflusst maßgeblich dessen Gewicht, Elastizität und Lebensdauer. Aus diesem Grund sollte das Holz gute Dämpfungseigenschaften besitzen [24]. Die Holzkerne variieren je nach Skimodell. Wie bereits erwähnt, kann der Kern aus Massivholz oder aus geleimtem Schichtholz bestehen. Die am meisten verwendeten Hölzer sind unter anderem Pappel, Esche, Weide und Buche. Durch den Schichtaufbau können die Vorzüge (siehe unten) der einzelnen Holzarten hervorragend kombiniert werden.

Pappel ist ein leichtes, weiches Holz, das eine geringe Festigkeit aufweist [25] und mit seiner Feuchtigkeit flexibel ist. Pappel garantiert eine gute Vorspannung und eine harmonische Biegelinie ohne zu ermüden [22].

Esche hingegen ist ein hochelastisches, zähes, festes Holz, das sehr biegsam und tragfähig ist. Es ist überall dort einsetzbar, wo höchste Ansprüche an Elastizität und Festigkeit gestellt werden [25].

Buche ist ein schweres Holz, das sich durch Härte-, große Biege-, Druck-, Schub- und Scherfestigkeit auszeichnet. Außerdem ist es sehr widerstandsfähig gegenüber Reibung. Von allen Hölzern die es gibt, hat Buche die längste Gebrauchsdauer [25].

Weide ist mit dem Holz der Pappel vergleichbar, denn es ist weich, leicht, biegsam und begrenzt elastisch [25].

Kanten

Die L-förmigen Stahlkanten des Skis werden ebenfalls in den Verbund eingeklebt und bilden ein tragendes Bauteil, das sich auf die Biegesteifigkeit des Skis auswirkt. Die genaue chemische Zusammensetzung des verwendeten Stahls ist nicht bekannt; die Stahlkanten werden vor dem Verkleben aber wärmebehandelt. Um einen Bruch der Kante bei zu starker Durchbiegung zu vermeiden, darf diese nicht beliebig hart ausgeführt sein [26].

Seitenwangen

Unter Seitenwangen versteht man Kunststoffprofile, die innen und außen über der Stahlkante über die gesamte Skilänge verlaufen und den Kern verstärken. Sie gewährleisten damit eine optimale Eisgriffigkeit. Seitenwangen dienen außerdem zur Stoßdämpfung und sorgen für eine gute Kraftübertragung auf den Schnee. Neben den eben erwähnten Aufgaben der Seitenwangen dienen diese zusätzlich dazu, die Vorspannung des Skis zu erhalten [22].

Gurte

Ein wichtiger Bestandteil eines Skiverbunds sind Druck- und Zuggurte, die für eine gleichmäßige Übertragung des Gewichts des Skifahrers auf die gesamte Länge des Skis verantwortlich sind und neben der Taillierung den meisten Einfluss auf die Fahreigenschaften des Skis haben. Der Obergurt, der bei jedem Schwung zusammengedrückt wird, nimmt die Druckbeanspruchungen des Skis auf, während der Untergurt bei jedem Schwung gedehnt wird und die Zugbeanspruchungen aufnimmt. Durch diese beiden Gurte wird also die Druckverteilung in Längsrichtung sowie die Torsionssteifigkeit des Skis gesteuert [26].

Die Begurtung kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Prinzipiell werden die Gurte aus Verbundwerkstoffen hergestellt, die aus mit Reaktionsharzen vorimprägnierten Fasern (PrePreg) aufgebaut sind und die unter Druck und Temperatur aushärten. Durch diese Verbundwerkstoffe erhält der Ski die erforderliche Torsionssteifigkeit und es werden höhere Festigkeiten

erreicht. Zusätzlich zu den Verbundwerkstoffen kann auch eine metallische Begurtung erfolgen. In den meisten Fällen wird dafür Titanal verwendet, da durch den Einbau von diesem hervorragende Dämpfungseigenschaften und die erforderliche Laufruhe der Ski erreicht werden.

Oberfläche

Die Oberfläche ist jene Schicht, auf der sich der graphische Aufdruck befindet, die den Ski nach oben hin abschließt und das Innenleben vor äußeren Einflüssen schützt [27].

Skioberflächen bestehen meistens aus dünnen Schichten aus Polyamid (PA), die sehr leichtgewichtig und vor allem extrem robust sind [28]. Auf ihnen befindet sich das dekorative Design des Skis. Oberflächen gibt es in den unterschiedlichsten Ausführungen (transparent, deckend, glatt, mattiert, etc.), doch sie haben alle dieselbe Funktion - sie schützen den Ski vor äußeren Einflüssen (Feuchtigkeit, UV-Strahlung) und gewährleisten einen optimalen Verschleißschutz [29].

Belag

Skibeläge werden aus Polyethylen (PE) hergestellt. Grundsätzlich werden bei der Herstellung zwei Verfahren unterschieden, die sich sowohl in Preis als auch Qualität unterscheiden. Bei der kostengünstigeren Variante handelt es sich um extrudierte Beläge aus hochdichtem PE. Diese Beläge werden aus einer Kunststoffmasse zu Platten gegossen und weiterverarbeitet. Extrudierte Beläge sind eher weich, empfindlich gegenüber Kratzern und haben im Vergleich zu den gesinterten Belägen eine geringe Wachsaufnahmefähigkeit [19].

Im Gegensatz dazu werden die gesinterten Beläge aus ultrahochmolekulargewichtigem Polyethylen Pulver (UHMW-PE) hergestellt. Der Belag zeichnet sich dadurch aus, dass er sehr hart und unempfindlich gegenüber Kratzern ist. Zudem kann eine große Menge an Wachs aufgenommen werden, wodurch sich die Gleiteigenschaften auf Schnee gegenüber dem extrudierten Material deutlich verbessern [19].

Gurtwerkstoff Titanal

Titanal (AlZn7MgCuZr) ist der Markenname einer hochfesten und warmushärtbaren Aluminium-Knetlegierung, hergestellt von der Austria Metall AG. Ähnlich wie bei Flugzeugaluminium, sind beim Titanal die Anteile einiger Legierungselemente erhöht (Tabelle 1), wodurch sich ein breites Anwendungsspektrum ergibt. Typische Anwendungsfälle von Titanal sind Bindungsteile für den Ski- und Snowboardbau, Strukturteile im Automobil- und Flugzeugbau, Zahnkränze und Bauteile für den allgemeinen Maschinenbau [30].

Tabelle 1: Nominalzusammensetzung in Massen-% [30]

Al %	Cu %	Mg %	Zn %	Zr %
~88,5	~1,7	~2,5	~7	~0,1

Da die Gurtwerkstoffe in den Zonen der höchsten Beanspruchung liegen [31], sind die isotropen Eigenschaften und eine Dehngrenze von > 600 MPa bei Dicken von 0,40 – 1,2 mm wichtige Größen, die zur Erhöhung von der Torsionssteifigkeit, einem optimalen Kanteneingriff und der erforderlichen Laufruhe ausgenutzt werden. Zusätzlich wird mit dem Einsatz von Titanal die Stauchneigung des Skis deutlich reduziert [10].

Beim unbehandelten Titanal befindet sich an der Oberfläche eine Oxidschicht, die das darunterliegende Grundmaterial vor Oxidation und Korrosion schützt. Vor der Weiterverarbeitung muss diese Oxidschicht durch eine entsprechende Behandlung entfernt werden und eine definierte Oberfläche, die eine gute Klebbarkeit gewährleistet, geschaffen werden [32].

Die zweite Ausführung des Titanals ist eine chemisch vorbehandelte Variante, die mittels Phosphorsäureanodisation speziell für Klebungen hergestellt wird. Mit dieser offenporigen Phosphorsäure-Anodierschicht ist es möglich Titanal im Verbund mit Epoxidharz-Klebstoffen zu verkleben [10].

Klebstoffe

Unter dem Begriff Klebstoff wird gemäß DIN EN 1692 ein nichtmetallischer Stoff verstanden, der Werkstoffe durch Oberflächenhaftung so verbinden kann, dass die entstehende Verbindung eine ausreichende innere Festigkeit besitzt [1]. Klebstoffe werden weit überwiegend auf polymerer Basis hergestellt, weshalb sie auch die Eigenschaften von Polymeren besitzen [8].

Es gibt sind zwei Grundvoraussetzungen, die ein Klebstoff erfüllen muss:

- Der Klebstoff muss zu einem bestimmten Zeitpunkt im Fügevorgang eine hohe molekulare Beweglichkeit aufweisen, um sich den Unebenheiten der Substratoberfläche annähern zu können.
- Der Klebstoff in der Klebschicht muss nach der Aushärtung eine möglichst geringe molekulare Beweglichkeit haben, damit er in der Lage ist, maximale Zug-, Scher- und Schälkräfte zu übertragen [1].

Bei den, im Zuge dieser Arbeit, verwendeten Klebstoffen handelt es sich um zweikomponentige Epoxidharz-Klebstoffe (Anhang B, Seite 93 - 96). Epoxidharz-Klebstoffe gehören zu den chemisch härtenden Reaktionsklebstoffen; genauer gesagt zu den Polyadditionsklebstoffen,

deren Verknüpfung auf der Anlagerung von verschiedenen reaktiven Monomermolekülen unter gleichzeitiger Wanderung eines Wasserstoffatoms von der einen Komponente zu der anderen beruht [33]. Um eine vollständige Polyaddition gewährleisten zu können, ist die Einhaltung des stöchiometrischen Mischungsverhältnisses der beiden reaktiven Komponenten Harz und Härter notwendig [8].

Ein wesentliches Merkmal der Epoxidharze ist die Epoxidfunktion, ein Sauerstoffatom, das mit zwei Kohlenstoffatomen einen dreigliedrigen Oxiraning bildet. Der Epoxidring verleiht dem Epoxidharz eine besondere Stabilität [33] und aufgrund seiner Elektronenanordnung zugleich auch eine hohe Polarität. Die hohe Polarität bewirkt, dass sich gute Adhäsionseigenschaften in der Klebung ausbilden können, da es zu einer erhöhten Anziehung zwischen den Klebpartnern kommt [1]. Bei der Reaktion von den beiden Komponenten wird der Epoxidring geöffnet, die Anbindung erfolgt über die sich ausbildenden Valenzen der entsprechenden Molekülgruppen [33].

Epoxidharzsysteme weisen eine hohe Festigkeit bei relativ geringer Verformbarkeit auf, wobei sich ein falsches Mischungsverhältnis negativ auf die Klebfestigkeit auswirken kann.

2.2 Belastungen am Ski

Die Kräfte, die bei der Geradeausfahrt (Abbildung 2-4), der Schrägfahrt (Abbildung 2-5) bzw. der Kurvenfahrt auf den Skifahrer wirken, wirken auch auf den Ski.

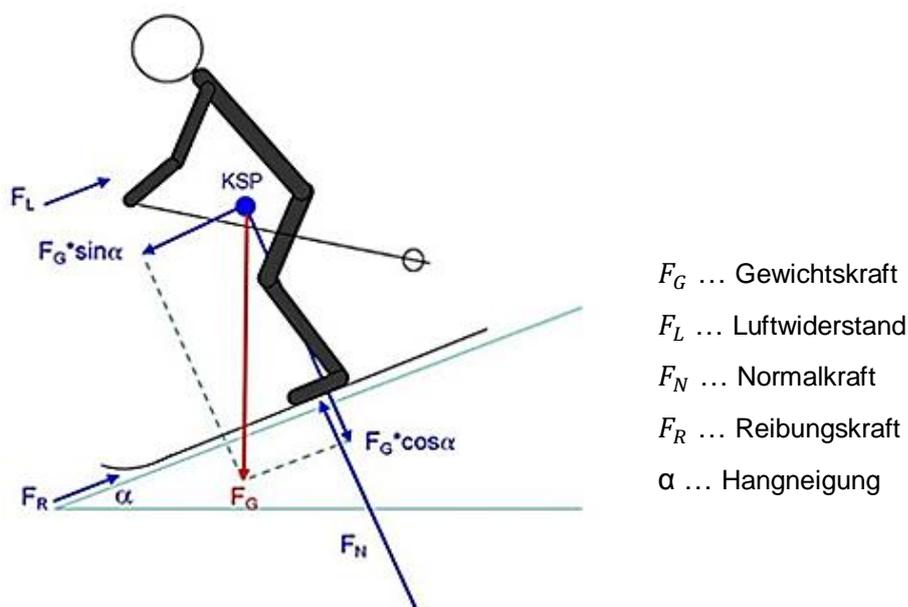


Abbildung 2-4: Geradeausfahrt [34]

Die gesamte beschleunigende Kraft bei der Geradeausfahrt ergibt sich aus der Hangabtriebskraft, der entgegenwirkenden Reibungskraft und dem Luftwiderstand. Die Hangabtriebskraft errechnet sich aus dem Produkt der Gewichtskraft des Skifahrers und der Hangneigung. Bei der Schrägfahrt wird die Hangabtriebskraft unterteilt in den beschleunigenden Anteil (Hangabtriebskraft) und die senkrecht zur Fahrlinie wirkende Querkraft [34].

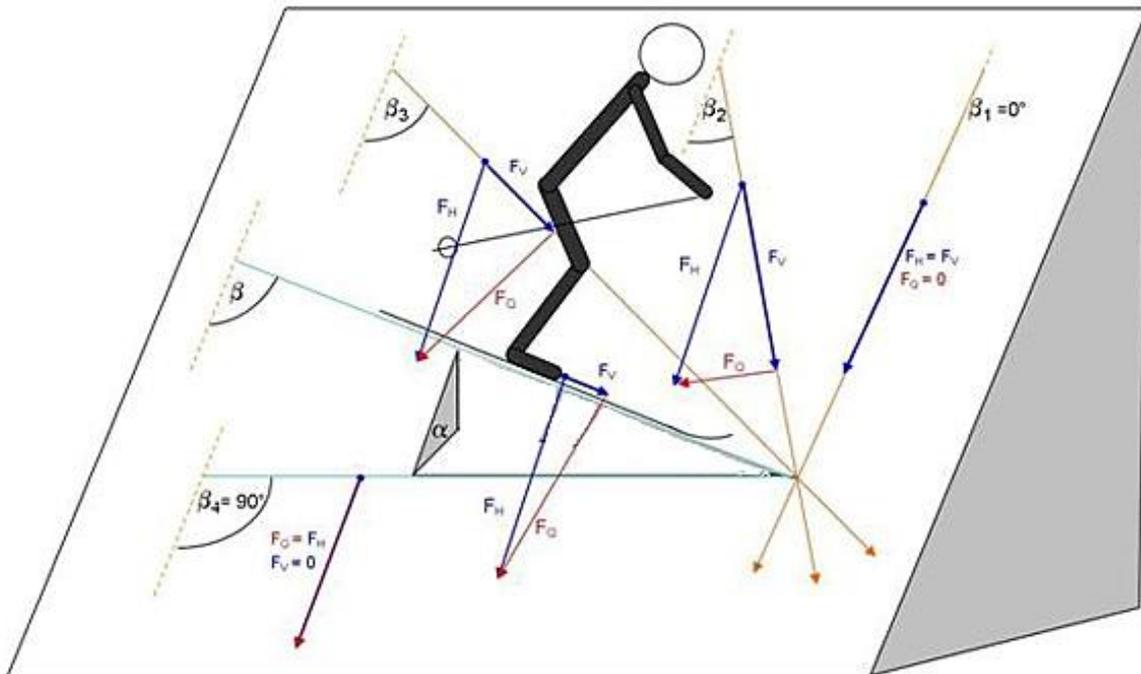


Abbildung 2-5: Schrägfahrt [34]

F_H ... Hangabtriebskraft

F_V ... Vortriebskraft

F_Q ... Querkraft

α ... Hangneigung

β ... Winkel zur Falllinie

Dadurch entstehen Belastungen, die auf den Ski bzw. den Klebeverbund wirken und die notwendigen Skieigenschaften vorgeben:

- Normalspannungen
- Biegespannungen
- Schub- / Torsionsspannungen

Entscheidender Faktor für ein gutes Fahrverhalten von Ski ist die Druckverteilung (siehe Abbildung 2-6). Je nachdem wie stark die einzelnen Druckzonen (Schaufel, Skimitte, Skiende)

belastet werden, verändern sich die Fahreigenschaften [26]. Lastfall 1 in Abbildung 2-6 zeigt die gleichmäßige Druckverteilung über den Ski, während Lastfall 2 eine zentrierte Verteilung widerspiegelt. Die Druckverteilung ergibt sich somit aus dem Zusammenspiel von Geometrie und Elastizität des Verbundes. Nur durch eine harmonische Abstimmung aller Skieigenschaften, die nachfolgend beschrieben werden, kann ein hochwertiger Ski entstehen [35].

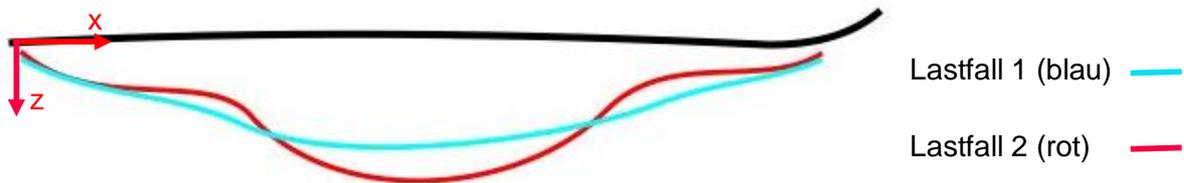


Abbildung 2-6: Druckverteilung [26]

Taillierung

Unter Taillierung kann man das Verhältnis der Breite über die Länge verstehen (Abbildung 2-7). Über die Taillierung ist eine Beeinflussung des Kurvenradius möglich, wenn auf der Kante gefahren wird. Je stärker die Taillierung ausgeprägt ist (Fall 2), desto kleiner ist der Kurvenradius, der gefahren werden kann. Während früher Kurvenradien von 40 m üblich waren, so schwankt bei den heutigen Ski der Kurvenradius zwischen 12 – 19 m [26].

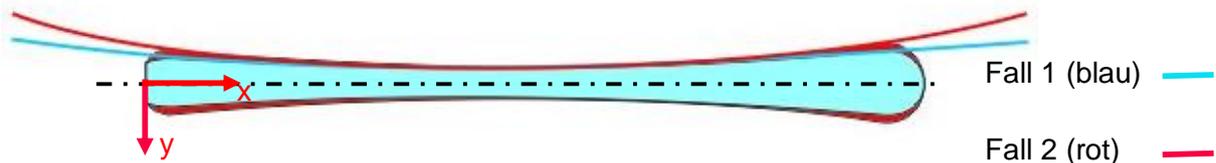


Abbildung 2-7: Taillierung [26]

Flex

Unter Flex oder Biegehardte versteht man das Biegeverhalten entlang der Längsachse (Abbildung 2-8). Ebenso wie die Taillierung steht diese Eigenschaft im Zusammenhang mit dem gefahrenen Radius, sowie den Druckzonen [35]. Je mehr sich der Ski durchbiegen kann (Fall 1), desto enger wird die auf den Kanten gefahrene Kurve. Je härter der Ski (Fall 2), desto stabiler ist der Ski bei hohen Geschwindigkeiten [36]. Dabei muss jedoch genügend Steifigkeit des Verbundes gewährleistet sein.

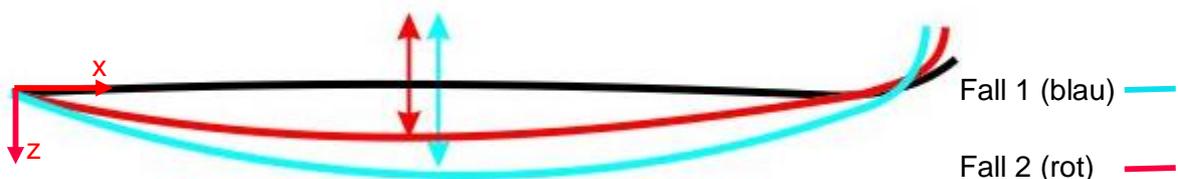


Abbildung 2-8: Biegehardte [26]

Torsionssteifigkeit

Torsionssteifigkeit ist der Widerstand, dem der Ski bei einer Verdrehung um die Längsachse entgegenwirkt [35], siehe Abbildung 2-9. Je höher die Torsionssteifigkeit, desto geringer ist die Verwindung des Skis, wenn er auf die Kante gestellt wird. Eine geringe Torsionssteifigkeit geht einher mit geringer Stabilität und schlechtem Grip auf hartem Schnee. Torsionssteife Ski reagieren im Gegensatz dazu bereits auf kleinste Impulse, weshalb sie erfahrene Skifahrer benötigen [36].

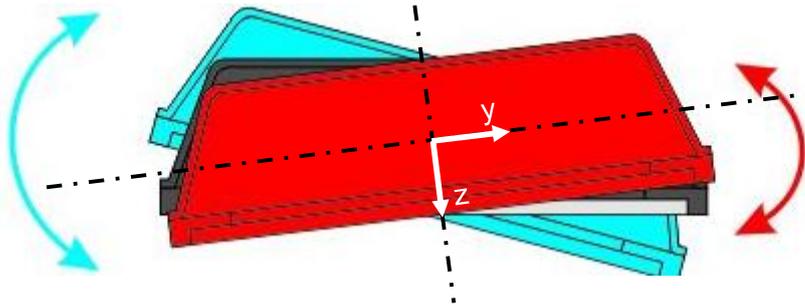


Abbildung 2-9: Torsionssteifigkeit [26]

Vorspannung (Camber)

Auch die Vorspannung ist ein mitbestimmender Faktor für die Eigenschaften der Druckverteilung entlang der Längsachse. Die Wölbung des Skis muss an den Flex angepasst sein, nur dann ist es möglich, dass der Druck über die gesamte Länge in der gewünschten Weise wirkt [36]. Ist die Vorspannung positiv, bedeutet das, dass die Skimitte im belastungsfreien Zustand einen Abstand zum Boden aufweist. Im Gegensatz dazu befindet sich die Skimitte bei einer negativen Vorspannung am Boden, Schaufeln und Skiende sind ein Stück vom Boden entfernt, wodurch mehr Auftrieb im Tiefschnee erzielt wird [35].

Dämpfung

Das Schwingungsverhalten wird durch die Konstruktion des Skis selbst oder durch sogenannte Dämpfungselemente gesteuert. Die Reduktion von unerwünschten Vibrationen beim Umkantvorgang beim Richtungswechsel ist genauso ein wichtiges Thema wie die Laufruhe des Skis [36].

2.3 Grundlagen der Haftung

Eine Oberfläche befindet sich immer in Wechselwirkung mit ihrer Umgebung, verbunden mit einer Änderung ihrer mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften, wie z.B. Oberflächenspannung, Oberflächenenergie, etc. [33,37]. Der Eigenschaftszustand und der Aufbau der Oberfläche hängen von der fertigungstechnischen Vergangenheit des Fügeteils ab und sind für eine nachfolgende oberflächentechnische Behandlung von elementarer Bedeutung. Denn diese Eigenschaften bestimmen die Haftungsmechanismen, die sich zwischen der Oberfläche des Substrates und der Klebschicht ausbilden, und definieren einen funktionierenden Verbund. Die Voraussetzung für eine ausreichende Haftung sind Wechselwirkungen und Wechselwirkungskräfte in der Grenzschicht zwischen Grundwerkstoff und Klebstoff [38].

Der Haftmechanismus (siehe Abbildung 2-10) hängt von der Oberflächenhaftung des Klebstoffes am Werkstoff, der sogenannten Adhäsion, und von der Festigkeit innerhalb des Klebstoffes, also von der Kohäsion ab. Dabei ist eine erfolgreiche Klebung dadurch definiert, dass die Adhäsion stets größer sein sollte als die Kohäsion.

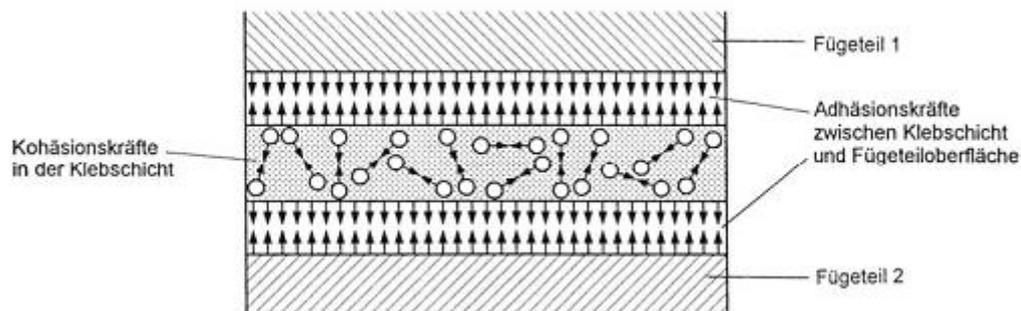


Abbildung 2-10: Bindungskräfte in einer Klebung [2]

Allgemein können die in der Grenz- und in der Klebschicht wirkenden Kräfte, die für den Zusammenhalt von Atomen und Molekülen verantwortlich sind, als Bindungskräfte bezeichnet werden [33]. Abbildung 2-11 gibt eine kurze Übersicht über die unterschiedlichen existierenden Bindungsarten, sowie über die Reichweite der Wechselwirkungskräfte. Die Reichweite spielt eine wesentliche Rolle bei der Klebung, denn technisch nutzbare Wechselwirkungskräfte zwischen Atomen und Molekülen treten nur auf, wenn die Bindungspartner sehr nahe ($< 1 \text{ nm}$) zusammenkommen [1].

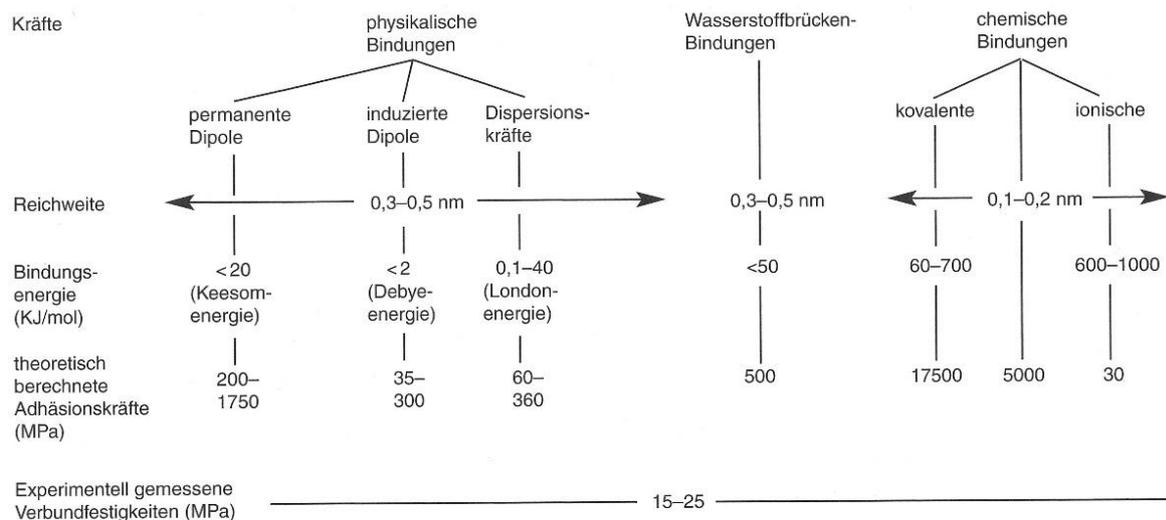


Abbildung 2-11: Wechselwirkungskräfte in Grenzflächenschichten und ihre Reichweite [1]

2.3.1 Adhäsion

Alle Wechselwirkungskräfte, die zwischen Klebstoff und Substrat auftreten und für das flächige Aneinanderhaften dieser Substanzen verantwortlich sind, werden unter dem Begriff Adhäsion zusammengefasst. Aufgrund der unterschiedlichen, an der Adhäsion beteiligten Wechselwirkungsmechanismen gibt es eine Vielzahl an Adhäsionstheorien [9].

Die häufigsten Mechanismen, mit denen die Wirkung der Adhäsion erklärt wird, sind:

- Mechanische Verklammerung
- Intermolekulare Kräfte in der Adhäsionszone
- Thermodynamische Grenzflächenvorgänge
- Chemische Verbindungen [39]

Da eine Beschreibung aller Adhäsions-Mechanismen den Rahmen dieser Arbeit überschreiten würde, wird hier auf Fachliteratur verwiesen. Somit kann festgehalten werden, dass Adhäsion folgende Ursachen hat:

- Physikalische Anziehungs- bzw. Adsorptionskräfte,
- chemische Bindungen, die zwischen den Atomen und Molekülen der aufeinanderliegenden Oberflächen entstehen.

Technisch nutzbare Wechselwirkungskräfte treten zwischen Atomen und Molekülen an den Grenzflächen fester Stoffe nur dann auf, wenn sich die beteiligten Bindungspartner gut aneinander annähern können. Dabei sollen Abstände <1 nm erreicht werden. Lediglich adhäsive Wechselwirkungen in Form von Ladungsverschiebungen und können über größere Abstände

wirksam sein [1]. Zusätzlich zu ebengenannten Wechselwirkungskräften kann in der Klebung noch eine mechanische Verklammerung auftreten, die auf formschlüssige Verankerungen des flüssigen Klebstoffes in Poren und Kapillaren zurückzuführen ist [33].

2.3.2 Kohäsion

Für eine erfolgreiche Klebung sind nicht nur starke Adhäsionskräfte zwischen den Klebpartnern erforderlich; auch die ausgehärtete Klebschicht selbst muss eine gewisse innere Festigkeit aufweisen. Diese Festigkeit entsteht durch die Anziehungskräfte zwischen Atomen und Molekülen innerhalb des Klebstoffes und wird als Kohäsion bezeichnet. Sie ist eine werkstoff- und temperaturabhängige Größe [9] und hängt in erster Linie von den chemischen und physikalischen Eigenschaften des Klebstoffes ab, welche die Festigkeit und Langzeitbeständigkeit einer Klebung bestimmen.

Die Ursachen der Kohäsion lassen sich erklären durch:

- das mechanische Verknäulen fadenförmiger Moleküle
- die Anziehung benachbarter Moleküle und Atome aufgrund zwischenmolekularer Kräfte und chemischen Bindungen im Molekül.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass für die Festigkeit einer Klebung das Verhältnis von Kohäsionsfestigkeit zur Adhäsionsfestigkeit eine besonders wichtige Rolle spielt. Eine hohe Kohäsionsfestigkeit der Klebschicht ist keine Garantie für eine erfolgreiche Klebung, wenn sich keine oder nur geringe Adhäsionskräfte an der Fügeoberfläche ausbilden. Auch umgekehrt gilt das gleiche. Das Ziel bei der Herstellung einer Klebung ist es daher, eine möglichst große Ausgewogenheit nach Ausbildung von Adhäsions- und Kohäsionskräften der beteiligten Moleküle sicherzustellen [33].

Für die optimale Anbindung der Klebschicht an die Substratoberfläche und zur Vermeidung von lokalen Fehlstellen ist es daher unbedingt notwendig, die Oberfläche vor dem Verkleben gründlich von Verunreinigungen zu befreien und somit eine vollständige Benetzung der Oberfläche zu garantieren. Denn die häufigste Ursache für das Versagen einer Klebeverbindung ist nicht eine zu geringe Festigkeit des Klebstoffes, sondern eine ungenügende bzw. falsche Vorbereitung der zu verklebenden Oberflächen.

2.3.3 Benetzung

Benetzung kann im Allgemeinen mit dem Verhalten eines Flüssigkeitstropfens auf einer Oberfläche erklärt werden. Die in die Grenzschicht reichenden Wechselwirkungen beider Phasen bestimmen nämlich die geometrische Form der Phasengrenze [38]. Abhängig vom Oberflächenzustand, der Art der Flüssigkeit und auch von den Umgebungsbedingungen, bildet der

Tropfen einen Randwinkel zwischen der Tropfenoberfläche und der Festkörperoberfläche aus. Thermodynamisch exakt wird der sich einstellende Randwinkel des Flüssigkeitstropfens durch die Grenzflächenspannung des Festkörpers zur Umgebung, der Flüssigkeit zur Umgebung und der Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Festkörper im Ruhezustand des Tropfens bestimmt. Im Falle des ruhenden Tropfens müssen alle wirkenden Grenzflächenspannungen im Gleichgewicht sein [1].

Der sich bildende Randwinkel kann theoretisch zwischen 0° - vollständiges Spreiten - und 180° - Nichtbenetzung - liegen. Aus Abbildung 2-12 ist ersichtlich, dass technisch nutzbare Adhäsion zwischen der benetzenden Flüssigkeit und dem Festkörper nur dann entsteht, wenn der Randwinkel kleiner als 90° ist. Dieses Kriterium ist allerdings nur dann erfüllt, wenn die Grenzflächenspannung des Festkörpers zur Umgebung gleich oder größer als die des Tropfens zur Umgebung ist [1].

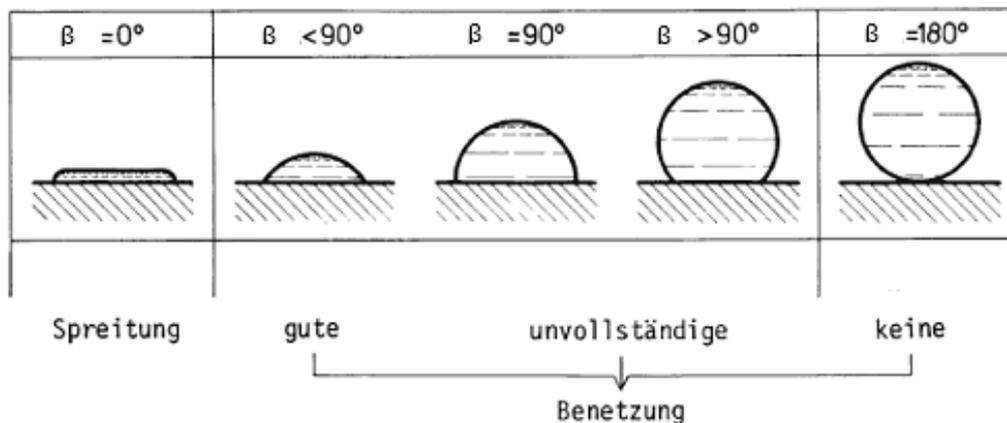


Abbildung 2-12: Benetzungswinkel von Flüssigkeiten auf Oberflächen [2]

Die erste Beschreibung des Benetzungszustandes machte T. Young. Das Kräftegleichgewicht (siehe Abbildung 2-13), das zwischen den Grenzflächenspannungen an der 3-Phasengrenze herrscht, wird durch die Young'sche Gleichung (Gleichung 2.1) beschrieben.

$$\sigma_{sv} = \sigma_{sl} + \sigma_{lv} \cdot \cos\beta \quad (2.1)$$

σ_{sv} ... Grenzflächenspannung des Festkörpers zur Umgebung

σ_{sl} ... Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Festkörper

σ_{lv} ... Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Umgebung

β ... Kontaktwinkel

Damit wird der Kontaktwinkel β von den Eigenschaften der beteiligten Phasen bestimmt [38].

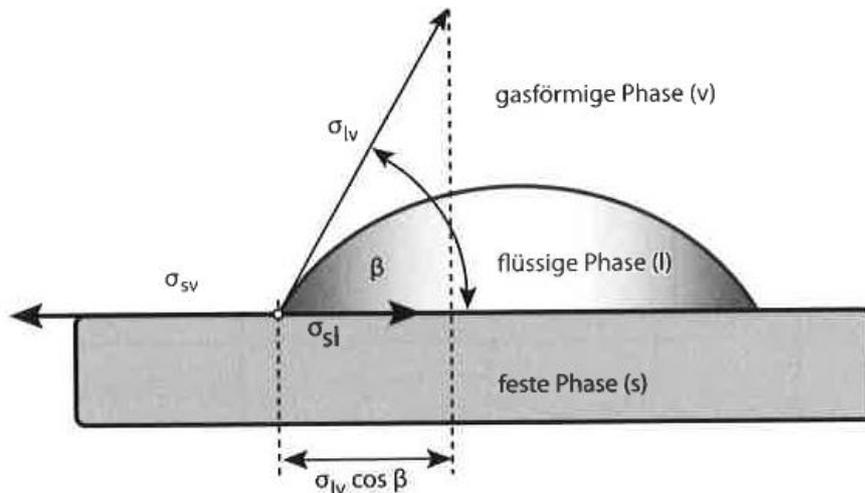


Abbildung 2-13: Oberflächen- und Grenzflächenspannung bei Benetzungsvorgängen [38]

Während der Kontaktwinkel β und die Oberflächenspannung σ_{lv} messbare Größen sind, können σ_{sv} und σ_{sl} nur als Differenz ($\sigma_{sv} - \sigma_{sl}$) bestimmt werden. Der Term ($\sigma_{sv} - \sigma_{sl}$) wird Haftspannung oder auch Benetzungsspannung genannt [38].

Werkstoffe mit einer hohen Oberflächenenergie zeichnen sich durch einen kleinen Randwinkel aus und lassen sich einfacher durch Klebstoffe benetzen und erzielen mehrheitlich hohe Verklebungsfestigkeiten [40]. Eine gute Benetzung der Oberfläche durch den Klebstoff ist demnach ein notwendiges aber kein hinreichendes Kriterium dafür, dass sich Adhäsionskräfte zwischen Klebstoff und Substrat ausbilden können [1,7].

Um erste Hinweise auf die Klebbarkeit einer Oberfläche und deren Polarität zu bekommen, können Benetzungsversuche durchgeführt werden. Die Polarität kann schon als Anhaltspunkt für die Qualität der entstehenden Adhäsion dienen. Durch Benetzungsmessungen lassen sich die exakten Eigenschaften der Adhäsion aber nicht ermitteln [1].

2.3.4 Bestimmung der Oberflächenenergie

Die Oberflächenenergie eines Substrates wird in der Regel mit Hilfe von – mindestens – zwei Flüssigkeiten bestimmt, deren Oberflächenspannung bekannt ist. Zumindest eine der Flüssigkeiten muss einen polaren Anteil > 0 aufweisen [41]. Die Flüssigkeiten werden auf die zu untersuchende Probe tropfenförmig aufgebracht und die resultierende Form mittels einer Projektion vermessen. Anhand einer Graustufenanalyse wird zunächst eine Konturerkennung durchgeführt und anschließend ein, die Tropfenkontur beschreibendes, geometrisches Modell an die Kontur gefittet [42]. Für die Bestimmung des Kontaktwinkels wird der sogenannte Young-Laplace Fit herangezogen. Bei dieser Methode wird die Tropfenkontur anhand der Form eines idealen liegenden Tropfens analysiert, dessen Krümmung aus dem Kräftegleichgewicht zwischen Oberflächenspannung und Gewichtskraft resultiert [43] (Abbildung 2-14).

Das Ergebnis der Tropfenkonturanalyse ist der sich zwischen der Fügeiteiloberfläche und der verwendeten Testflüssigkeit einstellende Kontaktwinkel. Er gilt als Maß für die Benetzbarkeit [33].

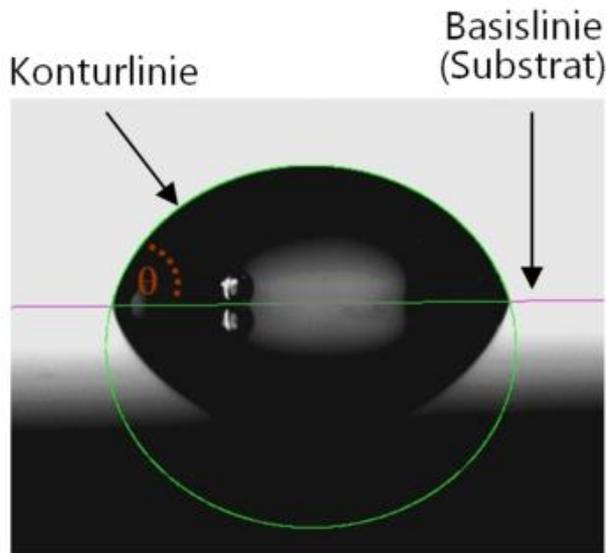


Abbildung 2-14: Liegender Tropfen mit gefitteter Kontur (grüne Kontur) [42]

Aus den gemessenen Kontaktwinkeln kann in weiterer Folge für die Bestimmung der Oberflächenenergie das Modell nach Owens-Wendt-Rabel & Kaelble (OWRK) herangezogen werden. Bei diesem Verfahren handelt es sich um ein Standardverfahren zur Berechnung der Oberflächenenergie eines Festkörpers. Nach dem Zweikomponentenmodell hängt die Grenzflächenspannung davon ab, ob polare und disperse Anteile mit entsprechenden Anteilen der angrenzenden Phase Wechselwirkungen ausbilden können. Besonders bei Plasmabehandlungen, bei denen es zu einer Änderung der Polarität kommt, kommt die OWRK-Methode zur Untersuchung der Benetzbarkeit und Adhäsion zum Einsatz [41].

Da gemäß der Young'schen Gleichung (siehe Gleichung 2.1) ein Zusammenhang zwischen dem Kontaktwinkel der Oberfläche und den Oberflächenspannungen der beteiligten Phasen besteht, muss die zweite unbekannte Größe – die Grenzflächenspannung zwischen Festkörper und Flüssigkeit – mithilfe von Gleichung 2.2 bestimmt werden. Die Oberflächenenergie wird bei Verwendung dieses Verfahrens in ihren polaren und dispersen Anteil aufgeteilt [41]. Der disperse Anteil der freien Oberflächenenergie ist auf disperse Wechselwirkungen zurückzuführen, das heißt auf temporäre, im Molekül lokalisierte Schwankungen der Elektronendichte. Durch diese entstehen temporäre Dipole, die in benachbarten Molekülen ebenfalls temporäre Dipole induzieren können [44].

Der polare Anteil der freien Oberflächenenergie ist jener, der auf polare, nicht kovalente Wechselwirkungen zurückzuführen ist. Diese Wechselwirkungen treten bei Molekülen mit einem Dipolmoment auf [45].

Bei Verwendung des Modells nach OWRK wird zwischen den Mittelwerten der Kontaktwinkelmessungen der beiden Benetzungsflüssigkeiten eine Ausgleichsgerade (Abbildung 2-15) gelegt und daraus die freie Oberflächenenergie berechnet [41].

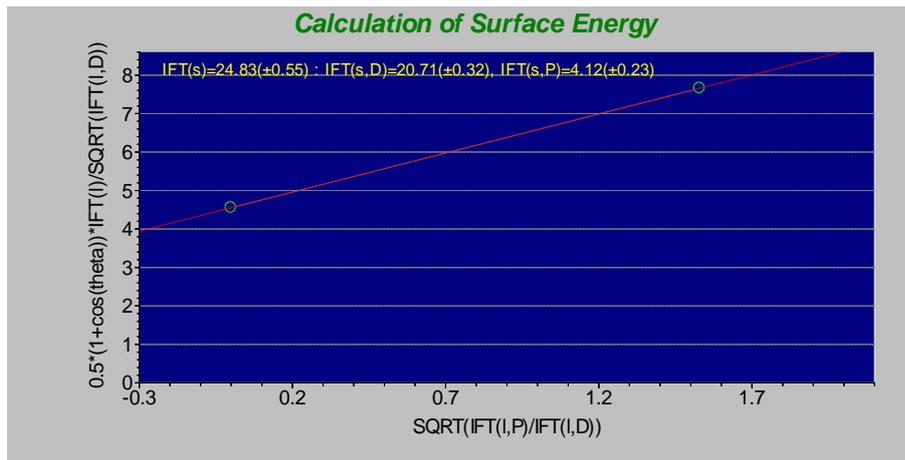


Abbildung 2-15: Ausgleichsgerade - Berechnung der Oberflächenenergie nach OWRK

$$\sigma_{sl} = \sigma_s + \sigma_l - 2 \left(\sqrt{\sigma_s^D \cdot \sigma_l^D} + \sqrt{\sigma_s^P \cdot \sigma_l^P} \right) \quad (2.2)$$

σ_s ... Freie Oberflächenenergie des Festkörpers

σ_l ... Oberflächenspannung der Flüssigkeit

σ_{sl} ... Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Festkörper

σ_i^D ... Disperser Anteil der Oberflächenspannung / -energie

σ_i^P ... Polarer Anteil der Oberflächenspannung / -energie

Problematisch bei der Kontaktwinkelmessung ist die Abhängigkeit des sich einstellenden Randwinkels von der Oberflächenrauheit des Substrates, von der Größe des Tropfens und von Verunreinigungen auf der Oberfläche [8].

2.4 Oberflächentechnik

Der Zustand der zu verklebenden Oberflächen ist einer der wichtigsten Faktoren für eine gute Klebverbindung und bestimmt maßgeblich die Haftungseigenschaften. Deshalb ist eine Reinigung bzw. eine Vorbehandlung der Fügeiteiloberflächen vor der Verklebung ratsam, vor allem dann, wenn der Zustand der zu verklebenden Oberflächen nicht bekannt ist. Durch eine Vorbehandlung erhält man einen definierten, reaktiven Zustand der Oberfläche – man verbessert dadurch die Haftung bzw. erhöht sogar die Alterungsbeständigkeit [1].

Die Ziele der klebgerechten Oberflächenbehandlung können wie folgt definiert werden:

- Verbesserung der Benetzung
- Verbesserung der Adhäsion
- Verbesserung der Reproduzierbarkeit der Oberfläche
- Verbesserung der Langzeitbeständigkeit der Klebung [46]

Wie Abbildung 2-16 zu entnehmen ist, wird die Oberflächenbehandlung unterteilt in Oberflächenvorbereitung, -vorbehandlung und -nachbehandlung. Jeder dieser Verfahrensschritte kann wiederum unterteilt werden.

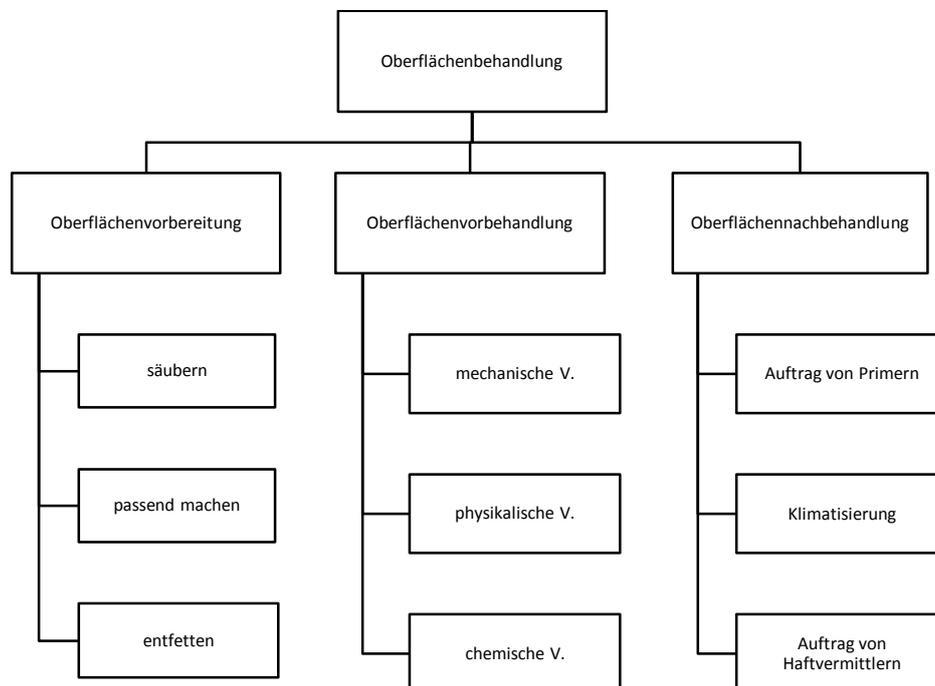


Abbildung 2-16: Verfahren der Oberflächenbehandlung [33]

Vor der eigentlichen Vorbehandlung sollte die Fügeiteiloberfläche unter allen Umständen gereinigt bzw. entfettet werden, denn eine saubere Fügeiteiloberfläche ist in den meisten Fällen die Voraussetzung für die Herstellung einer fehlerfreien Klebung.

2.4.1 Oberflächenvorbereitung

Die Oberflächenvorbereitung ist einer der wichtigsten Schritte bei der Herstellung einer einwandfreien Klebung. Sie dient dazu, die Fügeteile optimal an die nachfolgende Oberflächenvorbehandlung vorzubereiten. Die wichtigsten Schritte umfassen Vorreinigen, Entgraten sowie Entfetten der Klebflächen, da einerseits am Fügeteil anhaftende, feste Fremdschichten wie z.B. Schmutz, Rost, etc. immer Ausgangspunkte für Haftungslöcher darstellen und andererseits die Erzielung einer gleichmäßigen Klebschicht erforderlich ist [33].

Durch die Reinigung werden die Oberflächen von Staub, Öl, Rost, Zunder und Schmutz befreit [1]. Zur Entfernung der Verunreinigungen können wässrige oder lösemittelhaltige Reiniger verwendet werden [47]. Da auf der Metalloberfläche befindliche Schmutz- bzw. Fremdschichten als Trennschichten wirken, beeinträchtigen diese die Haftung der Klebschicht. Das gewählte Vorbereitungsverfahren muss aus diesem Grund auf das Material und den sich darauf befindlichen Verunreinigungen abgestimmt werden [37].

Eine der einfachsten Möglichkeiten ist die Wischreinigung der zu fügenden Teile mit einem reinigungsmittelgetränkten, fusselfreien Tuch. Weiters besteht die Möglichkeit, die Fügeteile in einem Tauchbad zu entfetten, wobei eine Tauchreinigung ohne mechanische Bewegung die geringste Reinigungswirkung erzielt. Durch die Bewegung der Werkstücke im Bad, beispielsweise durch Ultraschall, wird die Reinigungswirkung intensiviert. Hierbei werden von einem Hochfrequenzgenerator elektrische Schwingungen von 20 – 40 kHz erzeugt und von einem Schallwandler in mechanische Schwingungen gleicher Frequenz umgewandelt. Die in der Flüssigkeit entstehenden Kavitationsbläschen wirken bis in die kleinsten Hohlräume und entfernen den Schmutz von der Oberfläche. Die Behandlungszeit richtet sich nach dem Grad der Verschmutzung und kann von einigen Sekunden bis Minuten dauern [47].

Eine weitere Möglichkeit der Entfettung besteht in der Anwendung von Dampf. Durch die Dampfentfettung wird eine sehr hohe und gleichmäßige Fettfreiheit erzielt, die bei den anderen Verfahren nicht möglich ist. Die Fügeteile werden dabei in einer geschlossenen Anlage in die Dampfphase eines Lösemittels eingebracht. Der Dampf kondensiert auf der kalten Oberfläche, löst die Verunreinigungen und wäscht sie ab [8,33].

2.4.2 Oberflächenvorbehandlung

Auf die Oberflächenvorbereitung folgt die Oberflächenvorbehandlung um die, für die Klebung, notwendigen Adhäsionskräfte besser auszubilden. Man kann die Oberflächenvorbehandlung in mechanische, physikalische und chemische Verfahren unterteilen, wobei jedes für sich Vor- und Nachteile mit sich bringt. Die Auswahl des Verfahrens ist abhängig vom Substratmaterial, der Art der Verunreinigung und der Oberflächentopographie [37].

Mechanische Oberflächenvorbehandlung

Unter der mechanischen Oberflächenvorbehandlung versteht man sämtliche mechanischen Arbeiten, welche die Oberflächentopographie verändern. Die mechanische Oberflächenvorbehandlung kann in folgende Grundoperationen eingeteilt werden:

- Entgraten
- Schleifen
- Strahlen
- Polieren [48]

Vor allen mechanischen Oberflächenvorbehandlungen sollte unbedingt eine Entfettung durchgeführt werden, da sonst die vorhandenen Fettrückstände auf der Oberfläche verteilt und in die Poren hineingedrückt werden [1].

Da sich für die Oberflächenvorbehandlung von Aluminium und Aluminiumlegierungen vor allem das Schleifen und Strahlen besonders eignet, werden diese beiden Verfahren kurz näher erläutert.

Schleifen

Unter Schleifen versteht man ein spanendes Verfahren, bei dem die kornförmigen Schleifmittel unter Druck in die Werkstückoberfläche eingreifen und Material abgehoben wird. Es dient in erster Linie dazu Fremd- und Deckschichten zu entfernen und Oberflächendefekte zu beseitigen. Zusätzlich vergrößert es die wahre Oberfläche. Allerdings können beim Schleifvorgang sehr hohe Temperaturen infolge Reibung entstehen, die bei nichtvorhandener Kühlung zu Veränderungen im Gefüge führen können [37,48].

Durch den Schleifvorgang kommt es zu einer Vergrößerung der wahren Oberfläche, wodurch die Haftfestigkeit erhöht wird. Allerdings kann eine zu grobe Körnung des Schleifbandes dazu führen, dass es zu einer ungleichmäßigen Ausbildung der Klebschicht kommt und durch die, aus der Klebschicht herausragenden Oberflächenspitzen eine Kerbwirkung erzeugt wird. Den Zusammenhang von Haftfestigkeit und Rautiefe gibt Abbildung 2-17.

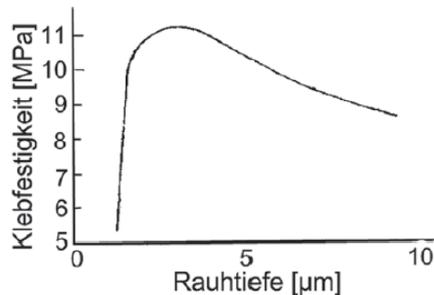


Abbildung 2-17: Zusammenhang zw. Haftfestigkeit und Rauhtiefe [8]

Strahlen

Bei dieser Oberflächenvorbehandlung wird das Strahlmittel durch Druckluft oder durch die Zentrifugalkraft auf die Oberfläche aufgeschleudert [37]. Bei diesem Verfahren muss das Strahlmittel ebenfalls auf das Substratmaterial abgestimmt sein, da je nach Strahlmittel der Grad des Stoffabtrages bzw. des Verformungsgrades der Oberfläche bestimmt wird. Bei der Verwendung von Druckluftanlagen ist unbedingt darauf zu achten, dass die Druckluft frei von Fett-, Öl-, Wasserrückständen ist [1], da diese Rückstände auf die Oberfläche gelangen und Ausgangspunkt für Haftungslöcher sein können [8].

Physikalische Oberflächenvorbehandlung

Je nach Art der physikalischen Verfahrensgrundlagen können neben rein physikalischen Änderungen auch chemische Reaktionen an einer Oberfläche ablaufen. Für das Kleben sind vor allem die folgenden Verfahren für die Oberflächenaktivierung wichtig:

- Niederdruckplasma
- Atmosphären-Plasma
- Corona Entladung
- Laser [33]

Bei den, im Zuge dieser Arbeit angewandten Verfahren der Oberflächenaktivierung handelt es sich um Atmosphären-Plasma-Verfahren.

Eine Grundvoraussetzung für die Anwendung eines Atmosphären-Plasma-Verfahrens ist das Vorhandensein eines Plasmas. Das Plasma, das auch 4. Aggregatzustand der Materie genannt wird, ist physikalisch definiert als ein ionisiertes Gas mit exakt gleicher Anzahl positiver und negativer Ladungen. Da es sich auf unterschiedliche Arten und über einen sehr breiten Bereich von Druck und Temperatur realisieren lässt, gibt es eine Vielzahl an Plasmen mit unterschiedlichen Eigenschaften und Intensitäten – je nachdem welches Prozessgas verwendet wird. Die Plasma-Atmosphäre besteht aus Elektronen, Radikalen, Ionen und über die sog. Fragmentierung entstehen weiterhin neutrale oder elektrisch geladene Molekülbruchstücke. Das zu behandelnde Füge teil wird mit dem Plasma behandelt und erhält dadurch eine höhere

Oberflächenenergie. Durch den Aufprall von Plasmateilchen auf oberflächennahe Atome oder Moleküle der vorzubehandelnden Füge­teile findet eine Aktivierung der Oberfläche im Sinne einer höheren Reaktivität statt. Durch die hohe kinetische Energie des Plasmastrahls werden zusätzlich Verunreinigungen von der Oberfläche entfernt. Abhängig vom verwendeten Prozessgas kommt es zu chemischen Reaktionen auf der Füge­teiloberfläche. Einhergehend mit einer höheren Oberflächenenergie ist auch die höhere Benetzungsfähigkeit [33,49].

Beim Atmosphärendruck-Plasma erfolgt die Plasmaerzeugung mittels Hochspannungsentladung in einer Plasmaquelle. Der erzeugte Plasmastrahl weist allerdings kein elektrisches Potential auf, sodass der behandelte Werkstoff nicht mit einer Spannung beaufschlagt wird. Die Füge­teiloberfläche kommt beim Atmosphärendruck-Plasmaverfahren nur sehr kurz mit dem Plasma in Kontakt, sodass der Grundwerkstoff thermisch nicht geschädigt wird, aber die oberflächennahen Bereiche gezielt verändert werden können. Diese Art von Behandlung lässt sich auf Kunststoffe und im Speziellen auf Metalle und NE-Metalle anwenden. Dabei lässt sich eine deutliche Erhöhung der Oberflächenenergie erreichen [33,50].

Chemische Oberflächenvorbehandlung

Ziel der chemischen Oberflächenvorbehandlung ist einerseits die Verbesserung der Haftungseigenschaften auf der zu behandelnden Oberfläche. Andererseits dient diese Art der Vorbehandlung dazu, gezielt Schichten von der Oberfläche zu entfernen. Durch die chemische Oberflächenvorbehandlung kommt es zu einer chemischen Reaktion zwischen Oberfläche und Behandlungsmittel [8]. Man unterscheidet zwei Arten von Einwirkungsmöglichkeiten auf die Oberfläche. Die Einwirkung von nicht oxidierenden Säuren bzw. die Einwirkung von oxidierenden Säuren [1]. Die häufigsten angewendeten Verfahren sind:

- Beizen
- Brünieren
- Ätzen

Da mit den chemischen Oberflächenvorbehandlungen immer arbeits- und sicherheitstechnische Kriterien zu erfüllen sind und sie nicht gut in den Produktionsprozess eingebunden werden können, wird diese Art der Oberflächenvorbehandlungen nicht weiter betrachtet.

2.4.3 Oberflächennachbehandlung

Durch die guten Adhäsionseigenschaften, die durch die Vorbehandlungen entstanden sind, üben die Oberflächen eine starke Anziehung auf Teilchen in ihrer Umgebung aus. Um einer erneuten Verschmutzung entgegen zu wirken, sollte die Klebung direkt auf die Oberflächen-

vorbehandlung erfolgen [1]. Sollten dennoch fertigungstechnische Verzögerungen in der Weiterverarbeitung auftreten, ist es möglich durch folgenden Maßnahmen die Klebfläche für die spätere Verklebung zu konservieren [33].

Auftrag von Primern

Unter Primer versteht man flüssige Beschichtungssysteme, die vor dem Klebstoffauftrag auf die zu verklebende Oberfläche aufgetragen werden. Primer dienen dazu, die Oberfläche vor unkontrollierten Veränderungen durch Umwelteinflüsse zu schützen bzw. die Haftung des aufzutragenden Klebstoffes zu verbessern.

In der Regel handelt es sich bei Primern um hochverdünnte Polymerlösungen, welche die Benetzung der Oberfläche verbessern, sie unter Umständen von kleinen Verunreinigungen befreien und im trockenen Zustand schützen [1]. Um gute Haftungseigenschaften zu gewährleisten, müssen Primer und Klebstoff aufeinander abgestimmt werden [8].

Klimatisierung

Aufgrund der Kondensation von Wasser auf den Fügeteilen und damit verbundenen Einbußen bei der Haftfestigkeit ist es notwendig, die zu klebenden und vor allem, die schon geklebten Bauteile so aufzubewahren, dass durch wechselnde Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen ebendiese Kondensation unterbunden wird [33].

Auftrag von Haftvermittlern

Unter Haftvermittlern versteht man ganz allgemein Stoffe, die zur Verbesserung der Haftfestigkeit eines Verbundes dienen. Haftvermittler sind sozusagen „chemische Brücken“, die direkt auf das Substrat aufgetragen werden können und dadurch eine optimale Wirksamkeit erreichen, da sich der Haftvermittler somit direkt in der Grenzschicht befindet. Haftvermittler können aber auch dem Klebstoff zugesetzt werden. Sie werden eingesetzt, um die Festigkeit der Klebung, insbesondere aber das Alterungsverhalten der Klebung gegenüber feuchter Atmosphäre zu verbessern. Haftvermittler haben also die Aufgabe, die Wirkung der mechanischen Oberflächenvorbehandlung zu verbessern [33,51].

Aufgrund der großen Vielfalt der zu verklebenden Materialien und auftretenden Beanspruchungsarten existiert eine ebenso große Vielfalt an Haftvermittlern, die auf Basis unterschiedlicher chemischer Verbindungen bestehen. Es gibt Haftvermittler auf Basis siliziumorganischer Verbindungen, sogenannten Silanen, welche die Haftung zwischen organischen und anorganischen Materialien signifikant verbessern, da sie das Eindringen von Wasser in die Grenzschicht erschweren und dadurch die Dauerbeständigkeit von den Klebverbindungen erhöhen [51]. Speziell für Aluminiumklebungen wurden Haftvermittler auf Basis von epoxifunktionellen Anthrachinonverbindungen entwickelt [33].

3 Experimentelle Untersuchungen

Mittelpunkt der experimentellen Untersuchungen ist die Ursachenfindung der lokal auftretenden Haftungslöcher bzw. die gezielte Oberflächenvorbehandlung des unbehandelten Titanals mit dem Ziel, die Haftungseigenschaften im Verbund zu verbessern. Abbildung 3-1 gibt eine Übersicht über den Ablauf der Vorgehensweise bei den experimentellen Untersuchungen. Nach Ermittlung des Ist-Zustandes der Oberflächen von *Titanal blank* und *Titanal PSA* werden alternative Oberflächenvorbehandlungen (mechanisch und physikalisch) durchgeführt, die Auswirkungen dieser Vorbehandlungen mittels Kontaktwinkelmessungen untersucht und die erreichten Oberflächenenergien für Vergleichszwecke ermittelt.

Im Anschluss an die Ermittlung der Oberflächenenergien werden mit den gewählten Oberflächenvorbehandlungen Klebproben hergestellt, die bei Firma Atomic zerstörend mittels Trommelschälprüfung geprüft werden. Die daraus resultierenden Schälwiderstände der unterschiedlichen Proben werden einander gegenübergestellt und verglichen.

Um die durchgeführten Oberflächenvorbehandlungen nicht nur hinsichtlich ihrer Effektivität bzgl. der Haftfestigkeit zu beurteilen, wird ein Kostenvergleich durchgeführt

Im Folgenden werden nun die eingesetzten Methoden und Ergebnisse dargestellt.



Abbildung 3-1: Ablauf der Vorgehensweise bei den experimentellen Untersuchungen

3.1 Ursachenfindung der Haftungslöcher

Da zu Beginn der Untersuchungen nicht bekannt war, wodurch es zum vereinzelt Auftreten der Haftungslöcher kommt, werden im ersten Schritt die Oberflächen des unbehandelten und des phosphorsäureanodisierten Titanals verglichen. Darauf folgend wird der Zustand der geschliffenen (und gereinigten) Proben untersucht und somit der Ist-Zustand der 4 Materialzustände (Abbildung 3-2) erhoben.

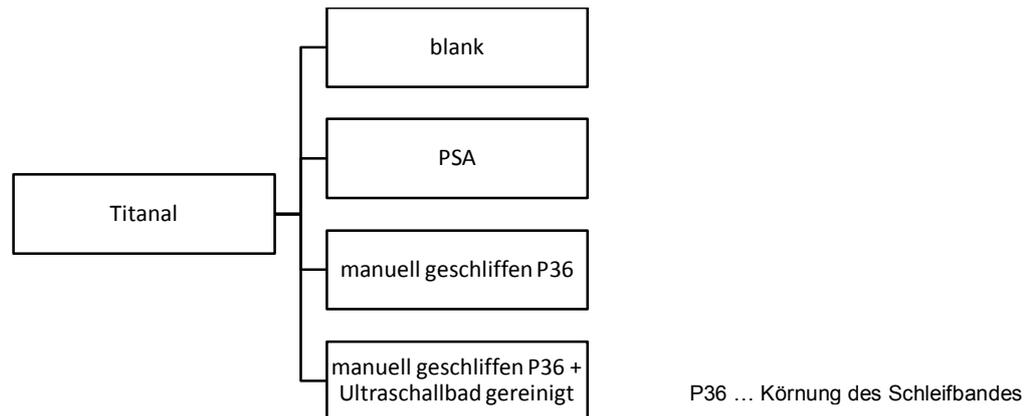


Abbildung 3-2: Materialzustände der Proben für die Ursachenfindung der Haftungslöcher

3.1.1 Makrodokumentation

Die Probenabmessungen des Titanals, welches aus der laufenden Produktion entnommen wurde, betragen 200 x 400 x 0,4 mm. Abbildung 3-3 a) zeigt ein Übersichtsfoto der Titanal-Proben, wie sie von der Firma zur Verfügung gestellt wurden. Bei den schwarzen Verfärbungen seitlich und in der Mitte handelt es sich um Spiegelungen des Kamerastatives, die aufgrund des blanken Titanals nicht zu vermeiden waren. Auffällig sind allerdings die Fingerabdrücke/Verunreinigungen (siehe Markierungen), die im rechten und linken Bildrand zu erkennen sind. Da bei den Fertigungsschritten Ablängen, Breite zuschneiden sowie beim Schleifen in der Produktion keine Handschuhe getragen werden, können organische Reste (Schweiß, Fett, etc.) einfach auf die Bleche gelangen.

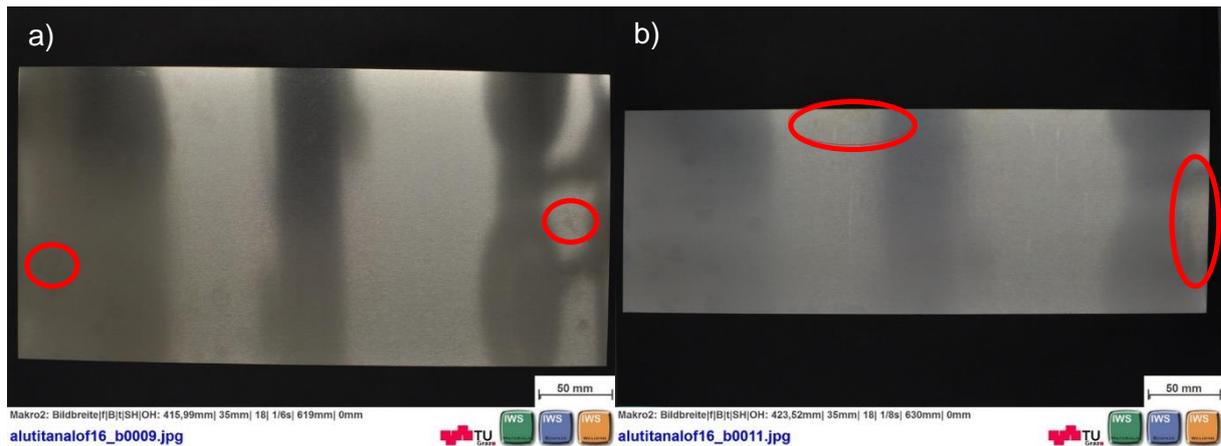


Abbildung 3-3: Titanal Probenmaterial: a) Titanal blank, b) Titanal PSA

Bei Abbildung 3-3 b) handelt es sich um das chemisch vorbehandelte PSA, das mit den Abmessungen 140 x 400 x 0,4 mm bereitgestellt wurde. Auch hier sind, wie beim blanken Titanal, die Spiegelungen erkennbar. An einigen Stellen der Probe sind gelbliche Verfärbungen zu erkennen (siehe Markierungen), bei denen es sich vermutlich um Korrosionsprodukte handelt.

Fraglich ist, ob lokale Korrosionsprodukte durch die Lagerung entstanden sind. Die Titanalrollen werden in Plastik eingewickelt gelagert. Laut Herstellerinformation sollte das Titanal bei Raumtemperatur, bei staubfreier, trockener Atmosphäre gelagert werden. Da allerdings kein definiertes Raumklima im Lager herrscht - erschwert durch das ständige Öffnen und Schließen der Laderampe - könnten die Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankungen verantwortlich für auftretende Korrosionsprodukte sein.

Des Weiteren konnten nicht abgelöste Späne auf der Substratoberfläche als weitere Fehlstellen charakterisiert werden (Abbildung 3-4). Diese Fehlstellen können mögliche Ausgangspunkte von Haftungslöchern darstellen. Alle Berichte der quantitativen Bestimmung der chemischen Zusammensetzung sind von Seite 97 - 102 im Anhang C der Arbeit zu finden.

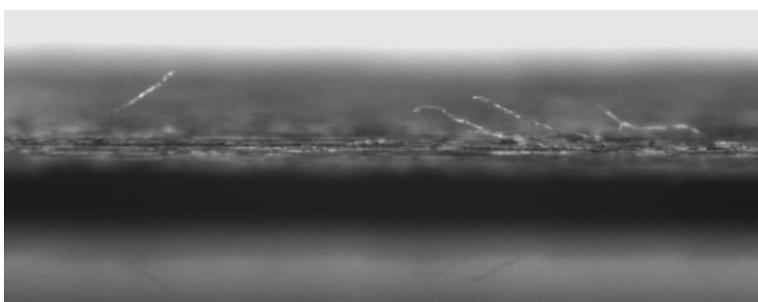


Abbildung 3-4: Nicht abgelöste Späne auf Titanal geschliffen

Für die weiterfolgenden Untersuchungen wird das erhaltene Probenmaterial zu kleineren Proben mit den Abmessungen 40 x 100 mm zugeschnitten. Da die Haftungslöcher zufällig auftreten, gibt es keinen Probenentnahmeplan. Die Proben werden mit einer Schlagschere längs aus dem bereitgestellten Material in den o.g. Abmessungen zugeschnitten.

3.1.2 Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Zur Erhebung des Ist-Zustandes der beiden Materialien *Titanal blank* und *Titanal PSA* werden von diesen zwei Materialtypen Proben im REM untersucht. Wie aus Abbildung 3-5 ersichtlich, zeigen beiden Proben bei einer 2000-fachen Vergrößerung optische keine bzw. nur geringe Abweichungen der Oberflächenstruktur.

Da die Aufnahmen bei beiden Proben mittels Sekundärelektronen gemacht wurden, ist in beiden Abbildungen die Oberflächentopographie ersichtlich. Die unbehandelte Titanal Probe erscheint relativ glatt, wobei im unteren Bereich eventuelle plastische Verformungen erkennbar sind.

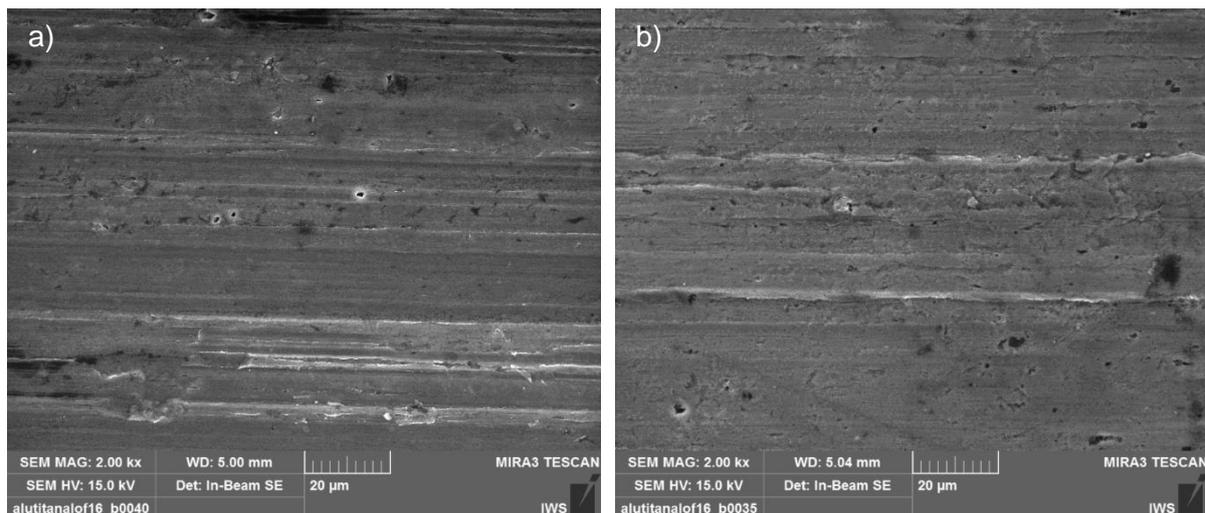


Abbildung 3-5: REM Aufnahme 2000-fache Vergrößerung a) Titanal blank, b) Titanal PSA

Abbildung 3-6 a) zeigt die Oberfläche des unbehandelten, blanken Titanals bei 100.000-facher Vergrößerung. Die Oberfläche erscheint hier sehr glatt, es ist keine Strukturierung der Oberfläche erkennbar, nur im oberen Bereich der Abbildung sind mögliche plastische Verformungen ersichtlich. Es könnte sich hierbei um die aufgebrochene Oxidschicht des Materials handeln. Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 3-6 b) die Oberfläche des chemisch behandelten Materials bei gleicher Vergrößerung. Man erkennt eine wabenförmige Struktur, an der sich der Klebstoff sehr gut verankern kann; es handelt sich hierbei um eine Oberfläche, die optimal für Klebungen ist. Bei der dunklen Verfärbung im oberen Bereich der Abbildung handelt es sich um eine Verunreinigung, die auf der Oberfläche aufliegt.

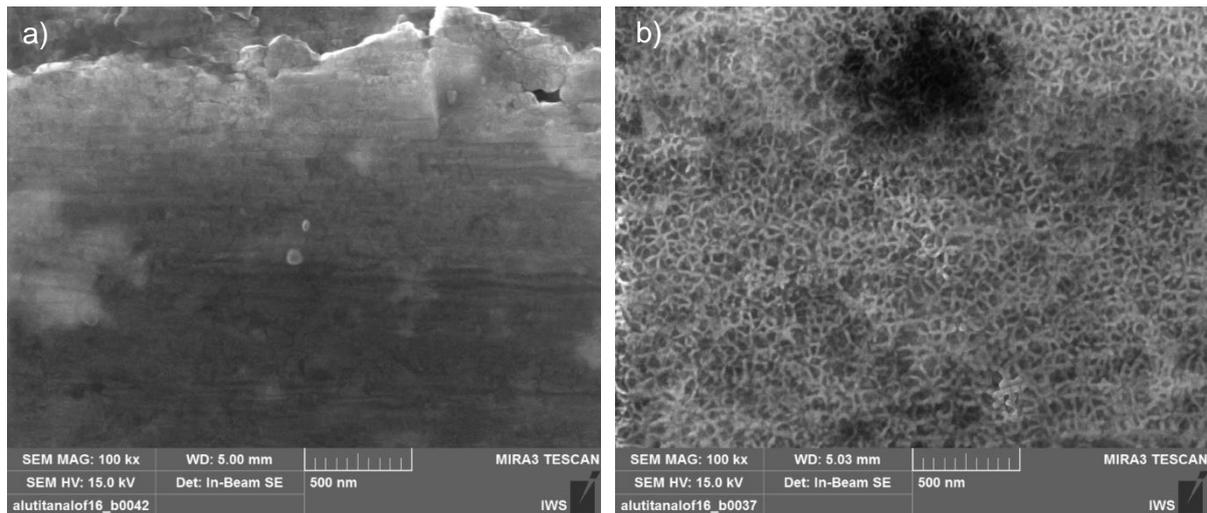


Abbildung 3-6: REM Aufnahme 100.000-fache Vergrößerung a) Titanal blank, b) Titanal PSA

3.1.3 Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX)

Bei den EDX Untersuchungen der Proben konnten auf allen geschliffenen und unbehandelten Proben Verunreinigungen und Fremdpartikel detektiert werden.

Beim Vergleich einer geschliffenen mit einer geschliffenen und im Ultraschallbad (UB) gereinigten Probe (Abbildung 3-7) werden die Unterschiede deutlich.

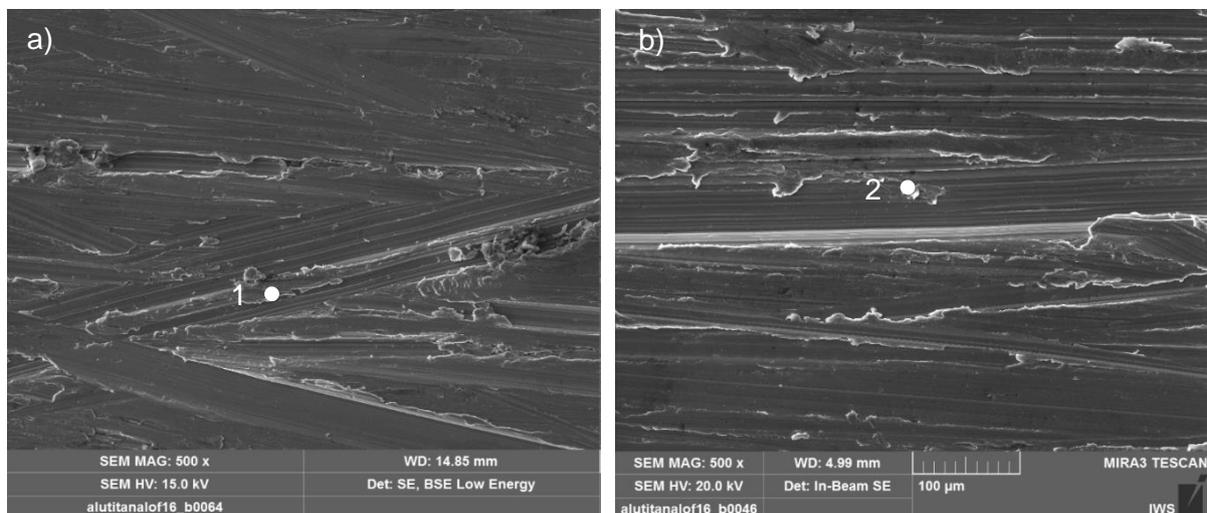


Abbildung 3-7: REM Aufnahme 500-fache Vergrößerung Titanal geschliffen a) ungereinigt, b) Ultraschallbad gereinigt

Die EDX Analyse zeigt, dass auf der ungereinigten Probe ein vermehrtes Auftreten von Fremdstoffen zu verzeichnen ist (Abbildung 3-8).

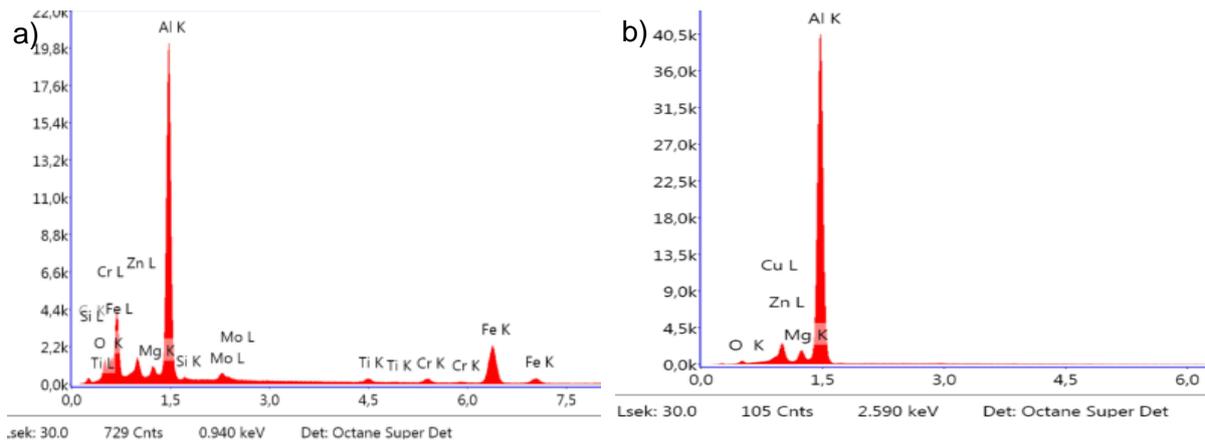


Abbildung 3-8: EDX Spektrum Titanal geschliffen a) ungereinigt, b) Ultraschallbad gereinigt

Es stellt sich heraus, dass es auf den Proben zu einem vermehrten Auftreten von Partikeln bzw. Fremdstoffen (Fe, Fe-Oxide, Schleifmittelreste, organische Rückstände) kommt (Abbildung 3-9).

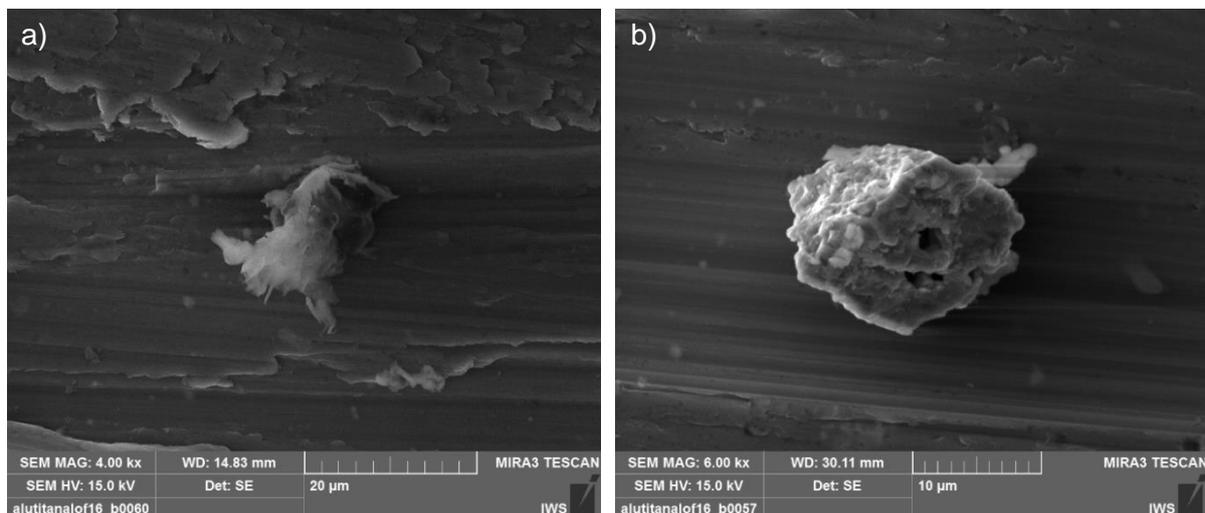


Abbildung 3-9: a) organischer Rest, b) Eisenpartikel auf Substrat

Des Weiteren wurden bei einigen maschinell geschliffenen Proben nicht abgelöste Metallspäne gefunden (Abbildung 3-4), welche weitere Ausgangsstellen für Haftungslöcher darstellen können.

3.1.4 Zusammenfassung

Die Makrountersuchung zeigte Verunreinigungen und anhaftende Schleifspäne auf der Substratoberfläche. Dies konnte mittels REM Untersuchungen bestätigt werden. Verunreinigungen und nicht abgelöste Späne konnten auch mittels REM Untersuchung an ungereinigten und geschliffenen Proben bestätigt werden. Als Ursache für das lokale Auftreten von Haftungslöchern konnten diese Fehlstellen als kritisch identifiziert werden.

Zusammenfassend gelten folgende Gründe für das lokale Auftreten von Haftungslöchern als wahrscheinlich:

- undefinierte Lagerbedingungen des Titanals und damit verbundene „Lagerungsschäden“
- Durch das Fehlen von Handschuhen können Verunreinigungen auf die Substrate gelangen
- unzureichende Oberflächenbehandlung (ungenügende Reinigung vor / nach dem Schleifen) → alternative Oberflächenbehandlungen denkbar

3.2 Alternative Oberflächenbehandlungen

Um das lokale Auftreten von Haftungslöchern zu verhindern, muss ein definierter und sauberer Oberflächenzustand gewährleistet werden. Dazu werden folgende 5 Oberflächenbehandlungen (mechanisch und physikalisch) durchgeführt:

- Ultraschallbadreinigung
- Schleifen
- Sandstrahlen
- Kaltplasmaaktivierung
- Heißplasmaaktivierung

3.2.1 Ultraschallbadreinigung

Für die Ultraschallbadreinigung wird ein Ultrasonic Cleaner der Firma VWR verwendet. Die Proben werden in einem Becherglas, das mit 96%-igem Ethanol gefüllt war, für ca. 2,5 min bei einer Frequenz von 45 kHz gereinigt. Bevor die Kontaktwinkelmessungen durchgeführt werden, trocknen die Bleche für ca. eine Stunde an der Luft.

3.2.2 Mechanische Oberflächenbehandlung

Schleifen

Die zugeschnittenen Titanal-Proben werden mit einem Schleifpapier der Type Hermes RB 320 X mit der Körnung P36, per Hand geschliffen. Um eine Vergleichbarkeit zum Realprozess zu sichern wurde die gleiche Körnung verwendet.

Zusätzlich werden Proben mit einem Schleifband der Körnung P80 geschliffen um die Auswirkung der Schleifmittelkörnung auf die Klebeeigenschaften zu untersuchen. Durch Schleifen mit zu grobem Korn kann es zu negativen Haftungseffekten aufgrund eines Kerbeffektes kommen. Laut Literatur beginnt das Grobschleifen von Aluminium ab Körnung 60 [52].

Des Weiteren werden maschinell geschliffenen Referenzproben zur Vergleichbarkeit untersucht.

Bürsten

Die Voruntersuchung zeigte Späne sowie Verunreinigungen am geschliffenen Substrat. Um diese negativen Effekte zu reduzieren, wurde von Fa. Atomic eine Bürstvorrichtung unmittelbar im Anschluss an die Schleifmaschine errichtet, um damit eine zusätzliche Reinigung der geschliffenen Bleche durchzuführen und die anhaftenden Späne zu reduzieren.

Sandstrahlen

Die Bleche werden per Hand in einer Sandstrahlkabine TYP P1 der Firma Güde GmbH mit Hochofenschlacke (0,5 – 1 mm Korngröße) beidseitig gestrahlt. Die Bleche verformen sich aufgrund der geringen Dicken und trotz steifer Unterlage durch den Strahlvorgang plastisch. Durch beidseitiges Strahlen können die hervorgerufenen Verformungen reduziert werden.

3.2.3 Physikalische Oberflächenbehandlung

Für die Plasmaaktivierung der Titanbleche werden zwei Atmosphären-Plasma-Verfahren verwendet. Die Plasmageneratoren werden von Firma Inocon (MCP und IC3) zur Verfügung gestellt.

Um zu gewährleisten, dass die durch die Aktivierung erreichte Temperatur unter der Rekristallisationstemperatur des Materials bleibt, wird mit Hilfe eines Thermoelements Typ K an der Substratoberfläche der Temperaturverlauf einer Aktivierung mitaufgezeichnet (Abbildung 3-10). Würde man die Rekristallisationstemperatur überschreiten, müsste man mit Änderungen der mechanischen Eigenschaften des Titanals rechnen.

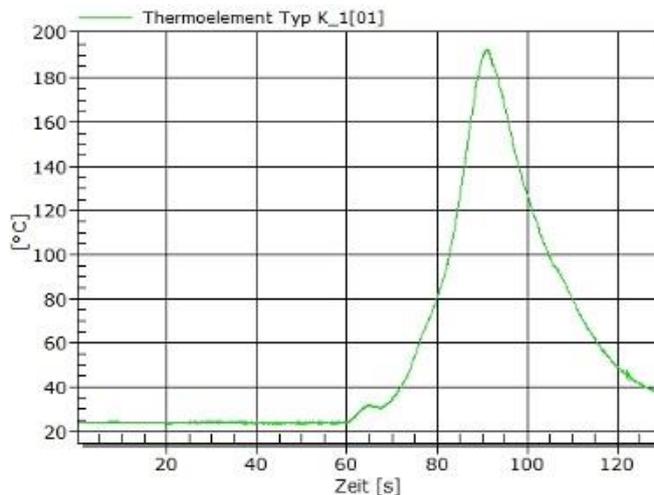


Abbildung 3-10: Temperaturmessung der Aktivierung mittels MCP

Mikrokaltplasma (MCP)

Dieses Verfahren zeichnet sich vor allem durch geringe Stromstärken bei der Entladung (50 - 60 A) und hohen Spannungen ($U_{\text{eff}} = 800 \text{ V}$) aus. Das Mikrokaltplasmaverfahren arbeitet mit Druckluft als Arbeitsgas und kann für die Oberflächenaktivierung von Kunststoffen, zur Reinigung von Oberflächen sowie zum Beschichten verwendet werden. Es ist ein kostengünstiges Verfahren, das sich durch einen geringen Luftverbrauch und eine hohe Leistungsdichte im Plasma auszeichnet [53].

Das verwendete System ist in Abbildung 3-11 zu sehen. Über die Betriebsparameter *Vorschubgeschwindigkeit*, *Düsenabstand* zum Substrat und *Gasdurchfluss* lässt sich das System auf die Prozessbedingungen einstellen.



Abbildung 3-11: Messaufbau der MCP-Aktivierung (IMAT TU Graz)

Die verwendeten Prozessparameter werden von der Fa. Inocon zur Verfügung gestellt und sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Prozessparameter MCP

Abstand Düse – Substrat	20 mm
Eingangsdruck Druckluft	3 bar
Vorschubgeschwindigkeit	20 cm/min
Druckluftdurchfluss	21 l/min

Da der Aktivierungsprozess unter Atmosphäre (ohne Verwendung von Schutzgas) durchgeführt wird, kommt es zu einer Oxidation der Oberfläche, welche sich negativ auf die Klebung auswirkt. Aus diesem Grund wird die Aktivierung mittels Kaltplasmas nur an den geschliffenen Proben durchgeführt.

Heißplasma

Beim zweiten, für die Reinigung der Titanalbleche angewandten System, handelt es sich um das Heißplasma IC3 der Firma Inocon. Das eigentlich für Beschichtungen vorgesehene System wird für die vorliegende Arbeit ohne die Beschichtungseinheit verwendet. Beim verwendeten Prozessgas handelt es sich um Argon. Die für die Versuche benötigten Prozessparameter werden abermals von der Firma Inocon zur Verfügung gestellt (Tabelle 3).

Tabelle 3: Prozessparameter IC3

Abstand Düse – Substrat	20 mm
Stromstärke	50 A
Vorschubgeschwindigkeit	1 m/min
Gasdurchfluss	10 l/min

Die Heißplasmaversuche mit IC3 werden an den maschinell geschliffenen, sowie den blanken Titanal-Proben durchgeführt. Auch bei dieser Versuchsanordnung bewegt sich der Lineartisch, auf dem sich die zu behandelnde Probe befindet, mit einer bestimmten Vorschubgeschwindigkeit unter der Plasmadüse hindurch (Abbildung 3-12).

Die bei diesem Verfahren erreichbaren Stromstärken liegen zwischen 40 und 350 A. Die Spannungen variieren je nach Kathodengeometrie.

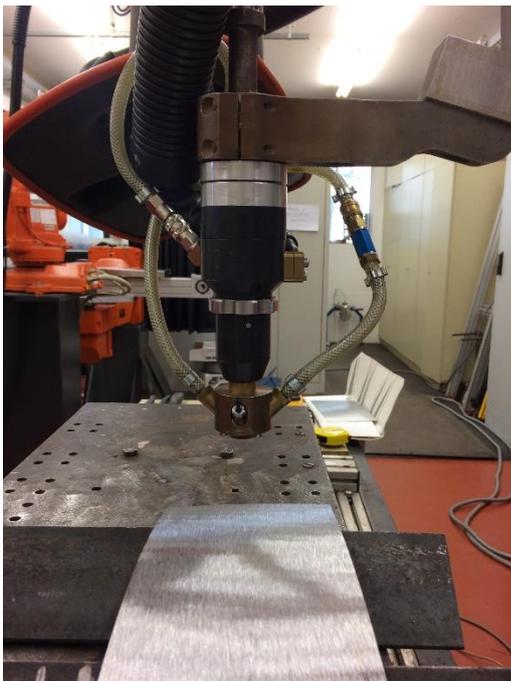


Abbildung 3-12: Meßaufbau der IC3-Aktivierung (IMAT TU Graz)

3.3 Versuchsablauf

Durch unterschiedliche Kombinationen der Oberflächenvorbereitungen mit den 3 Ausgangszuständen ergeben sich 15 Probenkonstellationen (Abbildung 3-13), die bei den anschließenden Kontaktwinkelmessungen untersucht und die Ergebnisse mit denen der PSA Probe verglichen werden.

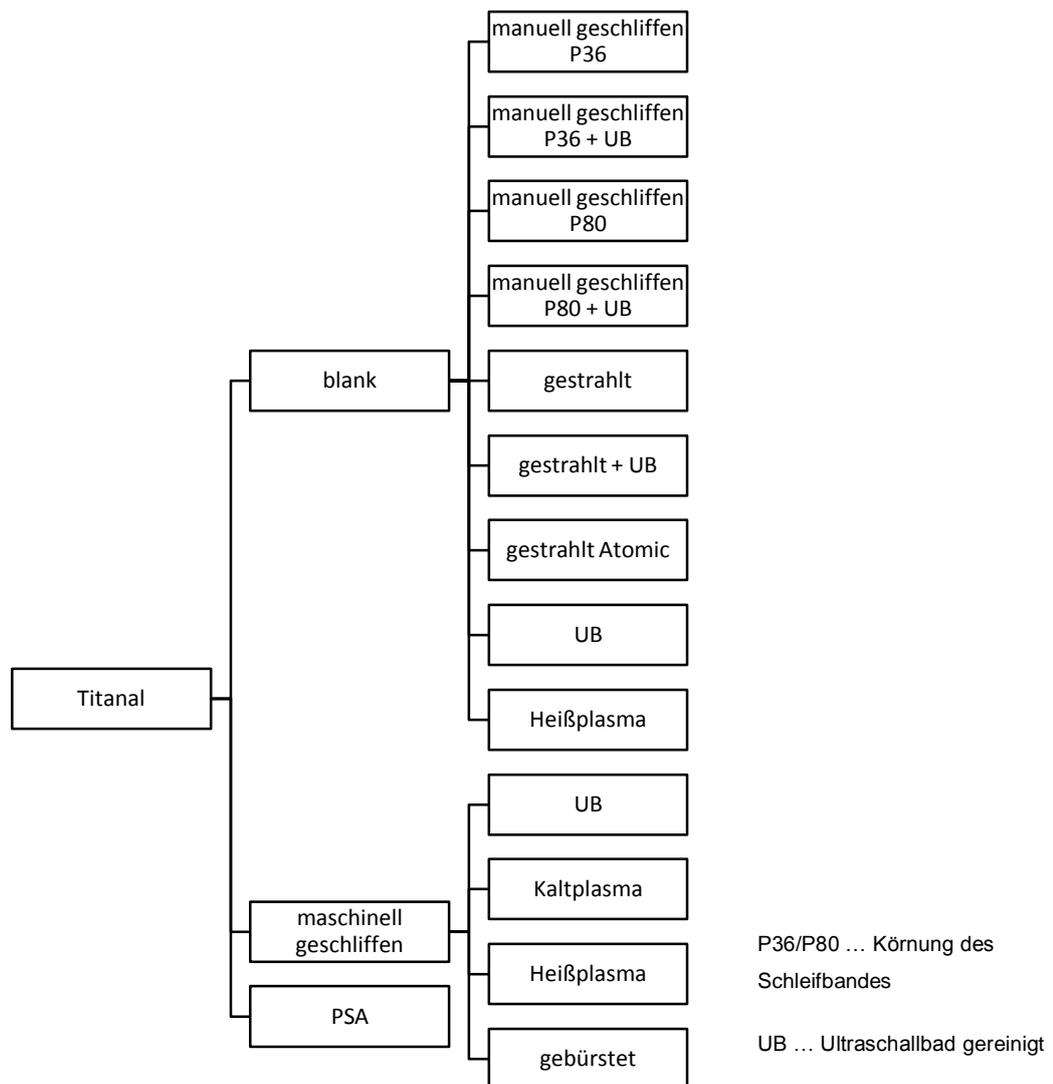


Abbildung 3-13: Variantenbaum

3.4 Kontaktwinkelmessung

Für die Kontaktwinkelmessung wird das Kontaktwinkelmessgerät DSA100 und das dazugehörige Drop Shape Analysis (DSA) Programm der Fa. Krüss verwendet (Abbildung 3-14), das vom Institut für Chemische Technologie von Materialien (ICTM) der TU Graz für die Dauer dieser Arbeit zur Verfügung gestellt wird.

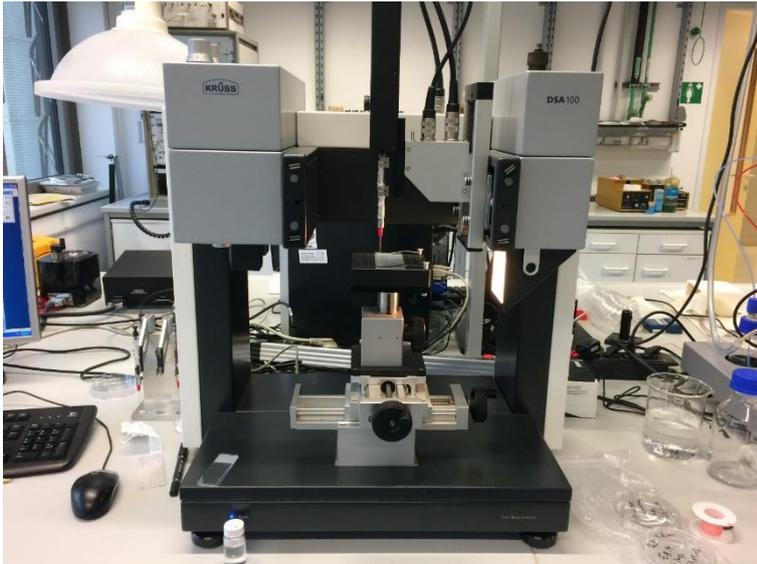


Abbildung 3-14: Kontaktwinkelmessgerät DSA 100

Der Messablauf wird wie folgt durchgeführt:

- Positionierung der Probe am Probentisch
- Einfüllen der richtigen Benetzungsflüssigkeit sowie einsetzen der Spritze in das Messgerät
- Einstellung der passenden optischen Parameter
- Einstellung des Tropfentyps: Da zur Ermittlung der Benetzbarkeit die statische Kontaktwinkelmessung nach der Methode des liegenden Tropfens angewandt wird, muss als Tropfentyp der Sessile Drop gewählt werden
- Einstellung des Dosiersystems: Jede Probe wird mit sieben Flüssigkeitstropfen gleichen Volumens ($3 \mu\text{l}$) und gleicher Tropfrate ($100 \mu\text{l}/\text{min}$) beaufschlagt (Abbildung 3-15)

Die Software legt nach jeder Aufnahme an den Dreiphasenpunkt eine Tangente, deren Winkel zur Festkörperoberfläche als Kontaktwinkel definiert ist, wertet die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung auf der linken und der rechten Seite des liegenden Tropfens aus und bildet daraus den Mittelwert. Nach allen erfolgten Messungen mit der ersten Benetzungsflüssigkeit wird ebenfalls vom Programm der Mittelwert aller Messungen bestimmt, der für die anschließende Auswertung der Oberflächenenergien zwischengespeichert werden muss.

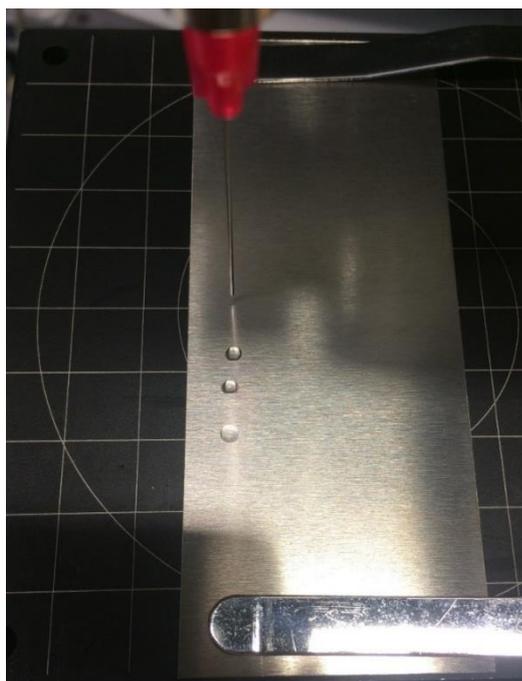


Abbildung 3-15: Aufbringen der Tropfen

Die zur Bestimmung der freien Oberflächenenergie des Festkörpers verwendeten Benetzungsflüssigkeiten, deren disperser und polarer Anteil der Oberflächenspannung bekannt ist, sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Benetzungsflüssigkeiten

	Oberflächenenergie [mJ/m ²]	Disperser Anteil [mJ/m ²]	Polarer Anteil [mJ/m ²]
Deionisiertes Wasser	72,8	21,8	51
Diiodmethan	50,8	50,8	0

Nach allen Messungen wird mittels OWRK-Methode zwischen den Mittelwerten der Kontaktwinkelmessungen der beiden Benetzungsflüssigkeiten die Ausgleichsgerade berechnet und daraus die Oberflächenenergie der Proben ermittelt.

Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen

Um eine Aussage über das Niveau der Kontaktwinkel bzw. der Oberflächenenergie einer bestimmten Probe machen zu können, werden die Messergebnisse mit Hilfe der induktiven Statistik ausgewertet. Die induktive Statistik arbeitet mit Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung, um aus den Daten eines gewissen Stichprobenumfangs die Eigenschaften einer Grundgesamtheit ableiten zu können [54,55].

Aufgrund des kleinen Stichprobenumfangs der unterschiedlichen Proben – pro Variante werden 3 Proben vorbereitet und vermessen – wird für die anschließende Auswertung der Ergebnisse die sogenannte Student-t-Verteilung angewandt. Der große Vorteil der t-Verteilung gegenüber der Standardnormalverteilung liegt in der besseren Darstellbarkeit der Wahrscheinlichkeit von Mittelwertunterschieden der Grundgesamtheit bei einem kleinen Probenumfang ($n < 30$).

Für die Auswertung der Messergebnisse werden aus den Mittelwerten der jeweiligen Proben-Einzelmessungen der Mittelwert, die Standardabweichung der Mittelwerte sowie die Abweichungen mittels eines zweiseitigen Konfidenzintervalls mit einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von 95% berechnet. Die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen sind in Abbildung 3-16 dargestellt.

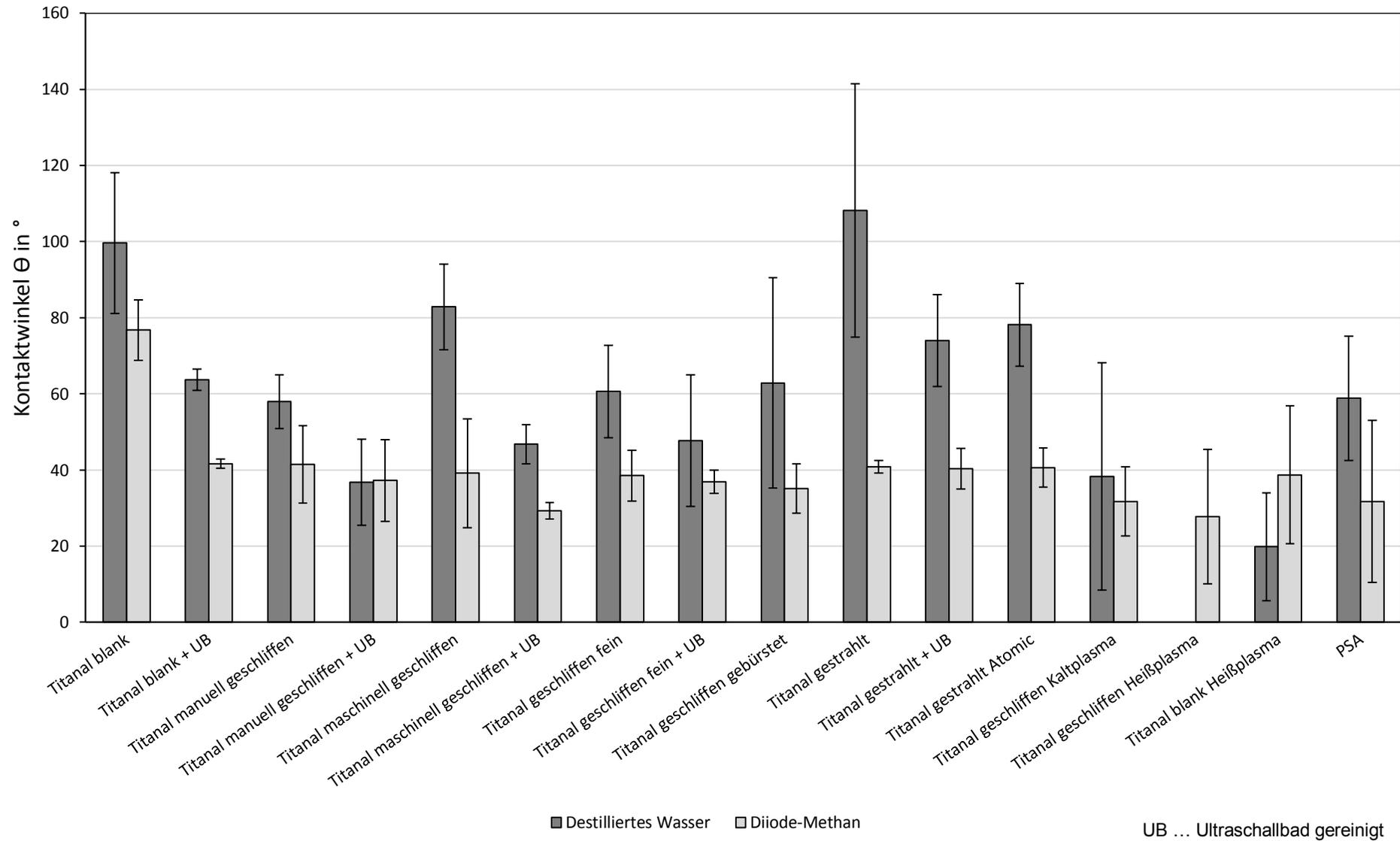


Abbildung 3-16: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen

Die Kontaktwinkel der blanken Titanalprobe (*Titanal blank*) zeigt mit beiden Flüssigkeiten unzureichende Benetzbarkeit. Wie in der Oberflächencharakterisierung bestätigt, ist dies auf eine ungereinigte Oberfläche mit verschiedenen Fremdstoffen und Fremdpartikel zurückzuführen. Im Vergleich dazu sind die Kontaktwinkel von der *PSA* Referenzprobe deutlich kleiner und liegen im Mittel bei 60° für Wasser und 30° bei Diiodmethan.

Wie bereits zu erwarten war, können durch Schleifen der Oberfläche kleinere Kontaktwinkel im Vergleich zu *Titanal blank* erzielt werden. Dies ist auf die geometrische Oberflächenstruktur und damit auf die Größe der wirksamen Oberfläche zurückzuführen. Allerdings zeigt sich bei einigen geschliffenen Proben eine in Längsrichtung gerichtete Struktur aufgrund des Schleifprozesses. Dabei kann es zu einer bevorzugten Ausbreitungsrichtung des Tropfens entlang der Schleifriefen kommen. Infolge einer konsistenten Versuchsauswertung werden die Tropfen nur längs der Schleifriefen gemessen. Aufgrund dieser Tatsache können bei manuell geschliffenen Proben kleinere Kontaktwinkel erreicht werden; da hier gezielt keine bevorzugte Schleifrichtung verwendet wurde.

Bei der Auswertung der Messergebnisse kann kein Unterschied hinsichtlich der Schleifkörnung gezeigt werden. Die Ergebnisse der sandgestrahlten Bleche zeigen im Vergleich zu *Titanal blank* große Kontaktwinkel. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass das Strahlmittel nicht auf dieses Material abgestimmt war bzw. da es während der Versuchsdurchführung zu einer plastischen Verformung der Dünobleche gekommen ist.

Um die Ergebnisse des Sandstrahlens zu verifizieren, werden einige Proben bei Atomic mit definierten Parametern sandgestrahlt. Hier zeigen sich deutlich geringere Kontaktwinkel als bei den manuell gestrahlten Proben. Dies ist auch konform mit der Literatur.

Durch eine UB Reinigung im Anschluss an die Vorbehandlung kann eine deutliche Reduktion der Kontaktwinkel erreicht werden, wie die Kontaktwinkelmessungen im Vergleich zu den ungereinigten Blechen zeigen. Durch eine geeignete Reinigung können die Kontaktwinkel an das Niveau der *PSA* Referenzbleche angenähert werden.

Die Kaltplasmabehandlung der geschliffenen Proben zeigt sehr gute Ergebnisse; die Kontaktwinkel können, bezogen auf die *PSA* Referenzprobe, durch dieses Verfahren um ca. 20% reduziert werden. Die Kaltplasmabehandlung wird nur bei den maschinell geschliffenen Proben angewandt, da dieses Verfahren Druckluft als Prozessgas verwendet und dieses oxidierend auf die Aluminiumoberfläche wirkt. Bei den blanken Proben wäre dieses Verfahren kontraproduktiv.

Im Gegensatz zur oben dargestellten Methode wird die Heißplasmaaktivierung mit Argon als Prozessgas an den blanken sowie den geschliffenen Proben durchgeführt. Die Kontaktwinkelmessungen von *Titanal geschliffen Heißplasma* mit Wasser als Benetzungsflüssigkeit können statistisch nicht ausgewertet werden, da das Messequipment den Winkel nicht mehr erfassen konnte. Die Kontaktwinkel, die mit Diiodmethan gemessen werden, sind so niedrig wie keine anderen, wenngleich jene beim ungeschliffenen blanken Titanal ebenfalls vergleichsweise klein ausfallen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch die UB Reinigung unabhängig vom vorangehenden Prozessschritt eine deutliche Reduktion der Kontaktwinkel möglich ist.

Bestimmung der Oberflächenenergie

Die Ergebnisse der totalen Oberflächenenergien sind Abbildung 3-17 zu entnehmen. Beim Vergleich der Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen mit denen der Oberflächenenergieberechnung ist die Korrelation zwischen Kontaktwinkel und Oberflächenenergie deutlich erkennbar: Je kleiner der Kontaktwinkel, desto höherenergetisch ist die Oberfläche. Die Reinigung der Proben umfasst die Ultraschallbad- bzw. die physikalische Behandlung.

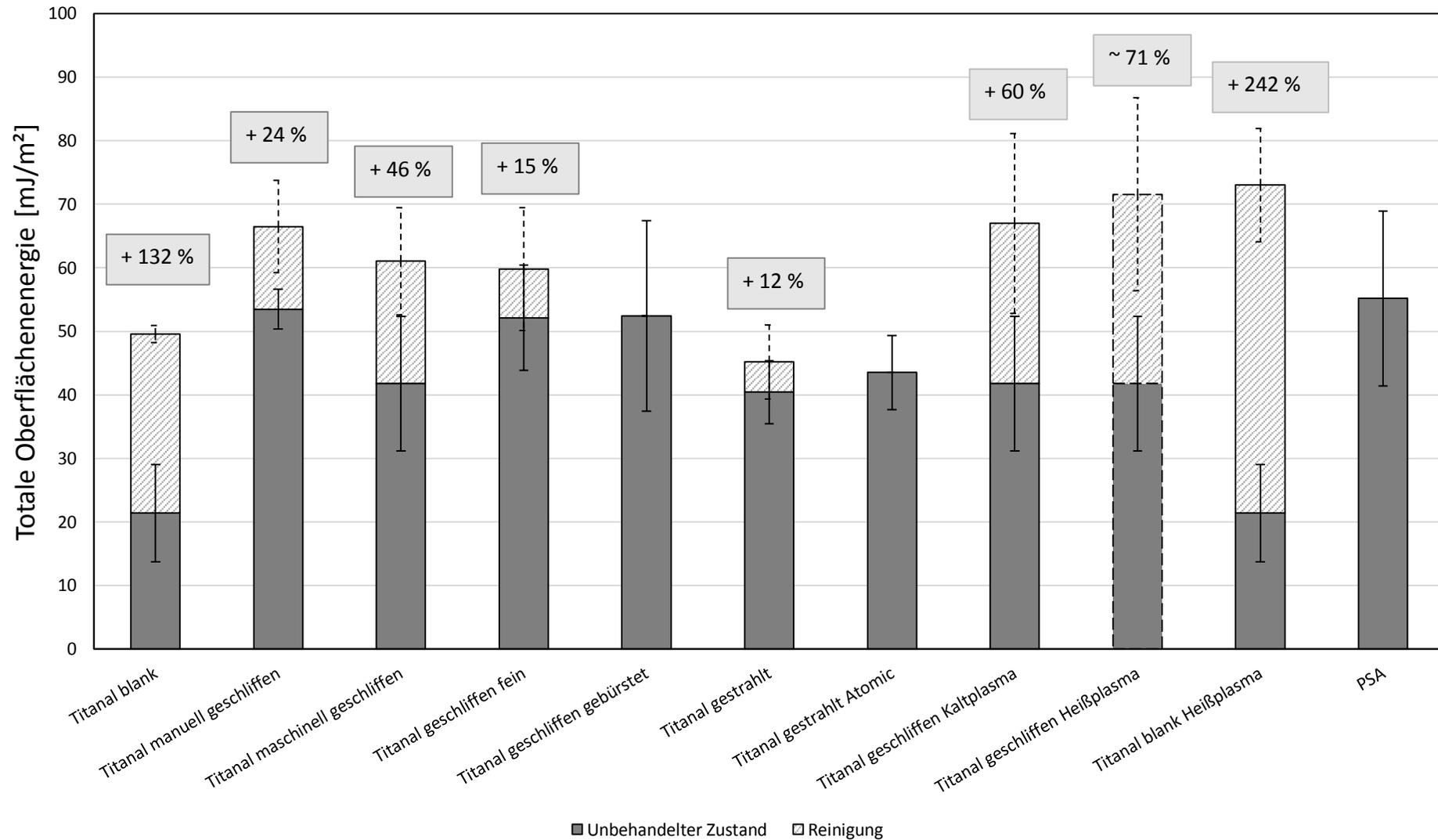


Abbildung 3-17: Totale Oberflächenenergie der unterschiedlichen Proben im unbehandelten Zustand und die entsprechende Erhöhung durch Reinigung in %. Basis der Untersuchung ist der jeweilige unbehandelte Zustand der Probe

Durch die einzelnen Oberflächenvorbehandlungsverfahren kann, wie man auf den ersten Blick erkennt, die Oberflächenenergie gegenüber *Titanal blank* deutlich erhöht werden. Wie bereits zu erwarten war, kann durch eine zusätzliche Reinigung im Ultraschallbad (schraffierte Flächen) eine nochmalige Erhöhung der Oberflächenenergie erzielt werden, wodurch es sogar zu einem Anstieg der Oberflächenenergie auf ein Niveau über dem von *Titanal PSA* kommt.

Nicht nur bei den oberflächenvorbehandelten Proben kommt es zu einer Erhöhung der Oberflächenenergie, selbst bei *Titanal blank* kann durch die Reinigung alleine eine Erhöhung der Oberflächenenergie um 132% erreicht werden.

Titanal geschliffen gebürstet und *Titanal gestrahlt Atomic* wurden nur im – mit Druckluft – abgeblasenen Zustand vermessen und zeigen sehr gute Werte im Vergleich zu *Titanal blank*. Die Oberflächenenergie des zusätzlich gebürsteten Titanals kann im Vergleich zum ungereinigten, maschinell geschliffenen Titanal um 26 % erhöht werden, bei einer zusätzlichen Reinigung wäre eine weitere Steigerung möglich. Das Titanal, das von Atomic gestrahlt wurde, zeigt im Vergleich zu *Titanal blank* eine Erhöhung der Oberflächenenergie um 104 %, die durch eine anschließende Reinigung im Ultraschallbad sicherlich auch noch weiter erhöht werden könnte.

Die Plasmabehandlungen, sowohl Kalt- als auch Heißplasma, zeigen im Vergleich zur *PSA* Referenzprobe deutlich höhere Oberflächenenergien. Durch die Kaltplasmabehandlung können die Oberflächenenergien bezogen auf die *PSA* Referenzprobe um ca. 20 % erhöht werden, die Heißplasmabehandlung von *Titanal blank* erreicht sogar um ca. 30 % höhere Oberflächenenergien als *PSA*. Über die genaue Erhöhung der Oberflächenenergie von *Titanal geschliffen Heißplasma* ist leider keine eindeutige Aussage möglich, da das Messequipment die Messwerte nicht korrekt erfassen konnte. Der Wert der Oberflächenenergie kann für diese Proben nur abgeschätzt werden und ist aus diesem Grund mit einer schraffierten Linie umrandet.

Bestimmung des transienten Verhaltens der Oberflächenbehandlungen

Durch diese Untersuchungen soll festgestellt werden, wie lange nach der Vorbehandlung die Oberflächenenergie erhalten bleibt, da eine Reinigung bzw. Aktivierung die Reaktivität der Oberfläche zwar erhöht, diese sich aber immer in Wechselwirkung mit der Umgebung befindet und sich daher wieder reduziert.

Um die Abhängigkeit der Oberflächenenergie vom zeitlichen Abstand der Messung zum Reinigungsverfahren aufzuzeigen, werden sechs unterschiedliche Proben über den Zeitraum einer Woche untersucht. Folgende Proben wurden dabei untersucht:

- *Titanal blank + Ultraschallbad gereinigt (UB)*
- *Titanal blank Heißplasma*
- *Titanal maschinell geschliffen*
- *Titanal maschinell geschliffen + Ultraschallbad gereinigt (UB)*
- *Titanal maschinell geschliffen + Kaltplasma*
- *Titanal maschinell geschliffen + Heißplasma*

Die Messung erfolgt jeweils 1 Stunde, 24 Stunden bzw. 168 Stunden nach der Oberflächenbehandlung. Die Ergebnisse der zeitlichen Untersuchung der Oberflächenenergien sind in Abbildung 3-18 dargestellt.

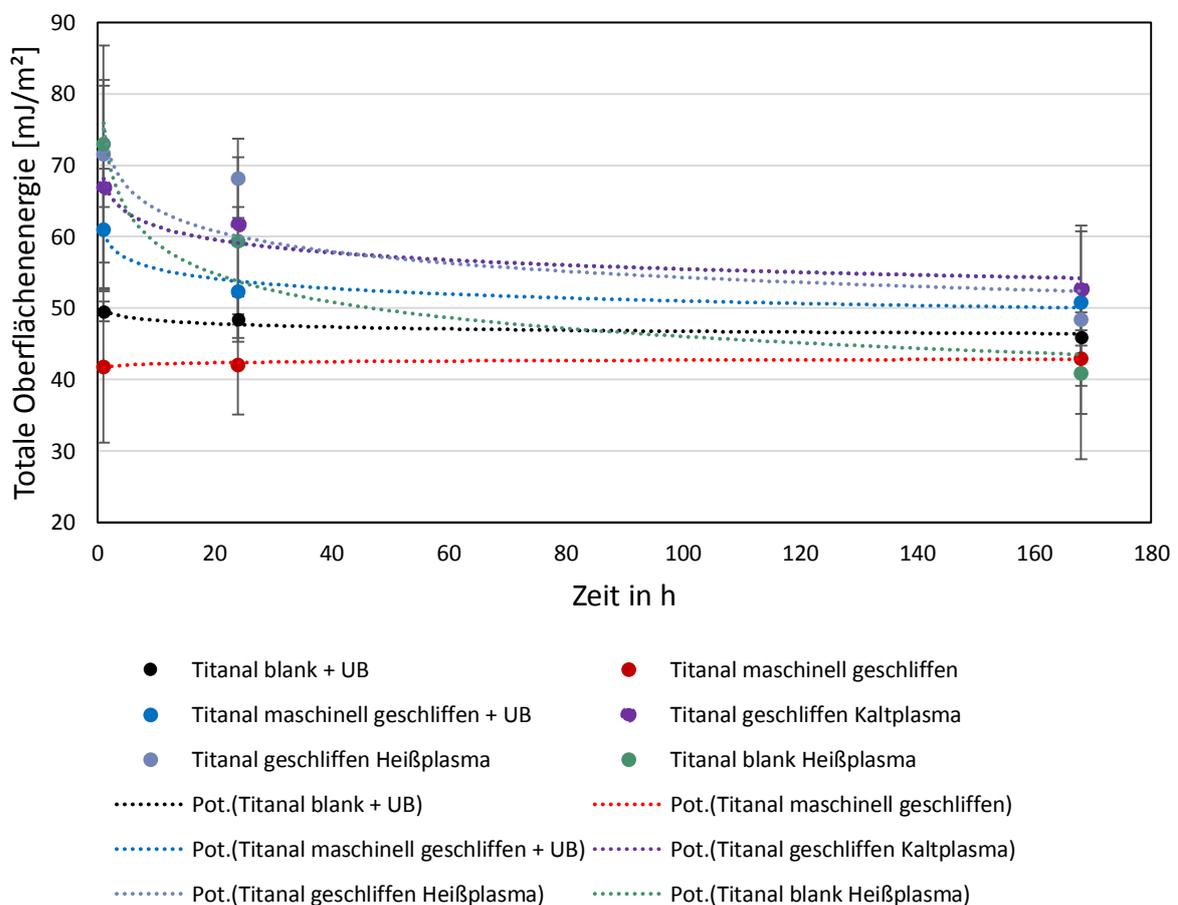


Abbildung 3-18: Zeitlicher Verlauf der Oberflächenenergien über den Zeitraum einer Woche

Wie deutlich zu erkennen ist, nimmt die Oberflächenenergie mit fortschreitender Zeit nach der Oberflächenvorbehandlung ab. Innerhalb der ersten 24 Stunden kommt es zu einem starken Abfall der Oberflächenenergie, und endet schließlich auf einem annähernd konstanten Energieniveau. Dieses repräsentiert das natürliche thermodynamische Gleichgewicht mit der Umgebung. Der zeitliche Verlauf der Oberflächenenergie lässt sich am besten mit einer potentiellen Funktion beschreiben.

Bei einem Vergleich der sechs Proben untereinander fällt auf, dass durch die UB Reinigung das Niveau der Oberflächenenergie des blanken Titanals über das von *Titalal maschinell geschliffen* im ungereinigten Zustand angehoben werden kann. Nach einer Woche allerdings sind die Energien auf einem annähernd gleichen Niveau. Der größte Abfall innerhalb der ersten 24 Stunden ist bei der Heißplasmabehandlung des blanken Titanals erkennbar.

Um diesen Effekt näher zu erläutern werden die Ergebnisse der zeitlichen Verläufe der Oberflächenenergien in einer anderen Form dargestellt – sie werden in ihre polaren und dispersen Anteile aufgeteilt (Abbildung 3-19). Durch die Reinigung bzw. Aktivierung erhält die Oberfläche eine höhere Reaktivität, die sich positiv auf die Haftung auswirkt. Allerdings nimmt dieser „Aktivierungseffekt“ durch die Wechselwirkung der Oberfläche mit der Umgebung mit der Zeit wieder ab.

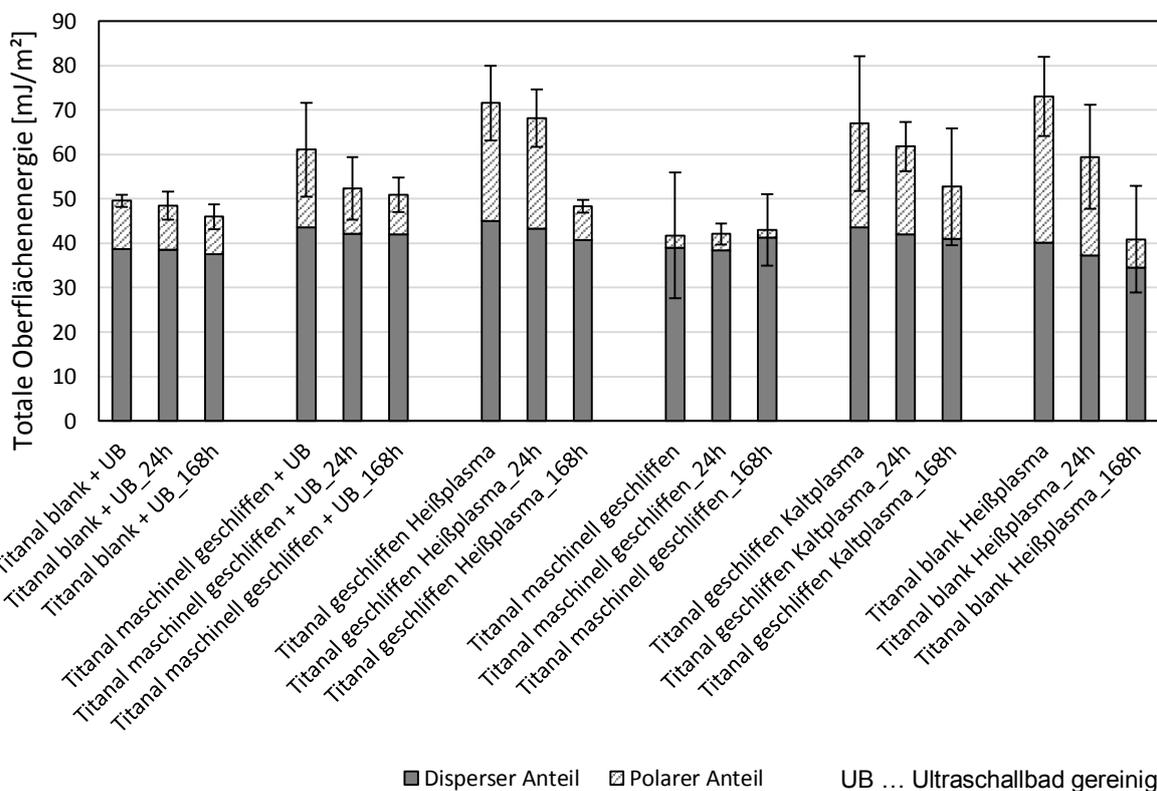


Abbildung 3-19: Anteile der Oberflächenenergie über einen Zeitraum von einer Woche

Aus oben dargestellter Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass es, sowohl bei der Reinigung mittels Ultraschallbad, als auch bei der Aktivierung mittels Kalt- bzw. Heißplasmas zu einem Abfall des polaren Anteils der Oberflächenenergie kommt, wenn die Proben über einen Zeitraum von einer Woche nicht verklebt werden. Aufgrund der Wechselwirkungen der Umgebung mit der Oberfläche der Proben, werden die bei der Reinigung / Aktivierung hergestellten pola-

ren Wechselwirkungen wieder rückgängig gemacht – es kommt zu einem Abfall der Oberflächenenergie. Der disperse Anteil hingegen ändert sich bei allen untersuchten Proben nur geringfügig.

3.5 Klebeversuche

Für die Bestimmung der Haftfestigkeit und zur Validierung des geeignetsten Vorbehandlungsverfahrens für Titanal wird der Schälwiderstand verschiedener Klebproben experimentell ermittelt. Dazu werden 10 Proben mit den Abmessungen 120 x 200 x 1,8 mm vorbereitet. Eine Übersicht über die Proben gibt Abbildung 3-20. Die Proben müssen unter definiertem Druck und Temperatur verklebt und bei definierter Abkühlzeit aushärten. Deshalb werden die Klebe- und Abzugsversuche ausschließlich bei Fa. Atomic durchgeführt.

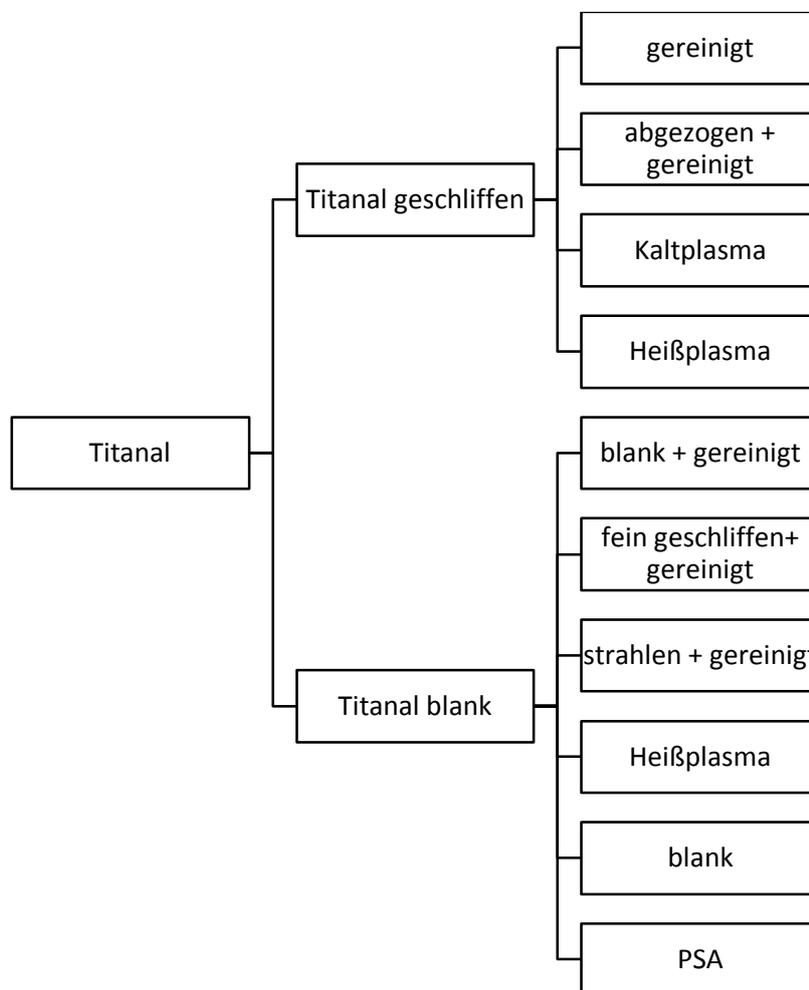


Abbildung 3-20: Übersicht über die Klebproben Titanal

Um voneinander abweichende Ergebnisse bei der Schälprüfung zu vermeiden und Vergleiche zwischen den unterschiedlichen Proben machen zu können, werden alle Proben unter gleichen Bedingungen hergestellt. Ebenso werden alle Proben gleich belastet und weisen gleiche Geometrien auf [8].

Der Klebeverbundaufbau ist in Abbildung 3-21 dargestellt und besteht aus folgenden Komponenten:

- Oberfläche ICP 5276
- Kleber LY5086
- Titanal
- Kleber AW1137
- Sinter Belag IS 7515 C11

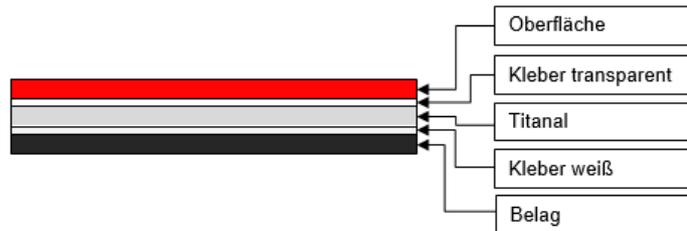


Abbildung 3-21: Klebeverbundaufbau

Herstellung der Klebproben

Da die Proben zerstörend mittels einer Trommelschälprüfung geprüft werden, müssen sie dementsprechend für die Prüfung vorbereitet werden. Vor dem Verkleben wird auf eine Breitseite des Titanals ein 4 cm breites Klebeband geklebt. Durch das Klebeband kann keine ausreichende Haftung zwischen dem Titanal und der Oberfläche bzw. dem Belag ausgebildet werden und die jeweilige Schicht, die anschließend geprüft wird, kann leichter vom Verbund gelöst und in die Trommel eingespannt werden.

Nach der Präparation mittels Klebeband werden die Proben schichtweise von unten nach oben zusammengelegt, wobei der Klebstoffauftrag händisch mittels Walzen erfolgt. Die fertigen Proben werden zwischen zwei Schutzfolien, welche die Pressen vor dem Auslaufen des Klebstoffes schützen sollen, in die hydraulische Presse gelegt.

Der Pressvorgang wird bei einem Druck von 10 bar und einer Temperatur von 135°C durchgeführt (Abbildung 3-22). Nach Erreichen der vorgegebenen Temperatur baut sich der Druck in der Presse auf und die Proben werden 6 Minuten unter diesen Bedingungen gehalten. Danach erfolgt das langsame Abkühlen (ca. 25 °C/min) auf Anfangstemperatur; die Presse öffnet sich nach Erreichen dieser Temperatur und die Proben können entnommen werden. Der Aushärtvorgang des Verbundes nach der Entnahme aus der Presse sollte ca. 24 Stunden bei Raumtemperatur betragen.



Abbildung 3-22: In die Presse eingelegte Proben vor dem Pressvorgang

Ermittlung des Haftwiderstandes

Haftung ist der Widerstand gegenüber einer trennenden Beanspruchung in einem Verbund. Die häufigsten dafür eingesetzten Prüfmethode sind Schälversuche, bei denen ein definierter Schichtstreifen vom anderen unter der Messung der Trennkraft abgeschält wird. Schälversuche dienen ausschließlich der Untersuchung der Haftfestigkeit [8] und liefern keine Festigkeitswerte im klassischen Sinn. Die ermittelten Kennwerte sind auf die Probenbreite bezogen und können nur für Vergleiche herangezogen werden [33].

Im Gegensatz zu den Prüfverfahren, bei denen ein gleichmäßiger Spannungszustand über einen möglichst großen Bereich der Probe angestrebt wird, erzeugen Schälprüfungen gezielt lokale Spannungsspitzen während der Prüfung. Dies ermöglicht eine Differenzierung zwischen spröden und zähelastischen Klebstoffen aufgrund der zum Abschälen benötigten Kräfte. Schälversuche können auch dazu genutzt werden, erste Hinweise auf die Wasserbeständigkeit der Adhäsion zu erhalten [1].

Trommelschälprüfung

Die verklebten Proben werden nach dem Aushärten bei einer Breite von 20 mm beschnitten und die Lasche, die durch das Klebeband nicht am Titanal anklebt, in die Trommel eingespannt (Abbildung 3-23).

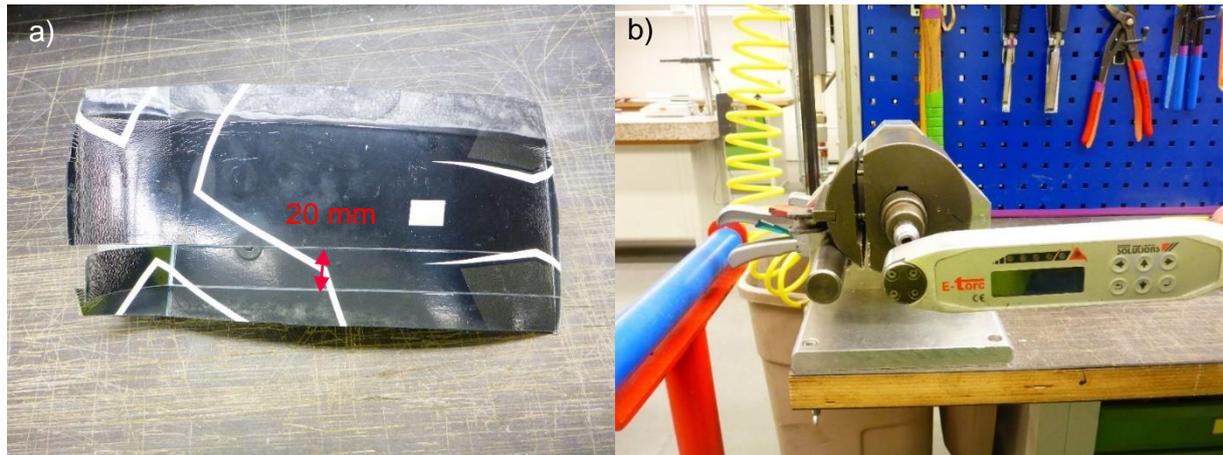


Abbildung 3-23: a) Eingeschnittene Klebproben, b) Trommel mit Drehmomentschlüssel

Die Proben werden mit einer annähernd konstanten Kraft abgeschert und das aufgebrachte Drehmoment am Drehmomentschlüssel abgelesen. Bei den am Drehmomentschlüssel ausgegebenen Werten handelt es sich um Momentanwerte, die über den Zeitraum der Prüfung gemittelt werden. Der Probenentnahmeplan ist in Abbildung 3-24 dargestellt.

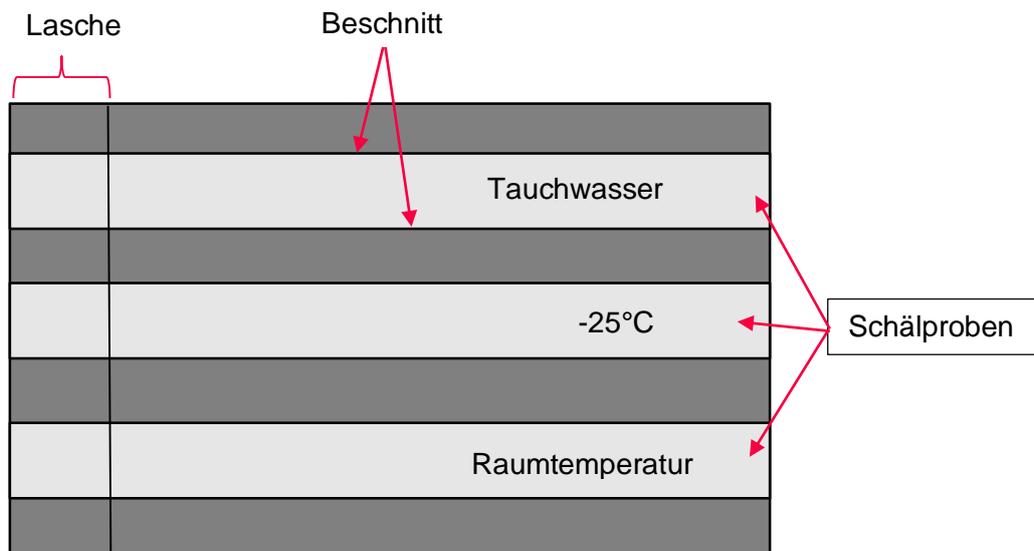


Abbildung 3-24: Probenentnahmeplan der Klebproben

Bei Schälversuchen werden üblicherweise Kraft-Weg-Diagramme erstellt mit deren Hilfe die Auswertung der Versuche erfolgt. Wie in Abbildung 3-25 zu sehen ist, werden der Anfangs- und Endbereich des Diagrammes nicht für die Auswertung herangezogen, da in diesen Bereichen keine gleichmäßigen Prüfbedingungen möglich sind. Zur Auswertung der Ergebnisse kann nur der mittlere Bereich mit der annähernd konstanten Schälkraft herangezogen werden [8].



Abbildung 3-25: Verlauf der Schälkraft über den Schälweg [8]

Für die Auswertung der Messergebnisse der 10 Klebproben werden aufgrund der von der Firma durchgeführten Prüfweise keine Kraft-Weg-Diagramme erstellt; die gemessenen Momentanwerte des Schermomentes werden über die Dauer der Prüfung gemittelt und notiert. Durch dieses Verfahren ist das mittlere Schermoment leicht erhöht. Zusätzlich kann durch diese Vorgehensweise die tatsächliche Streuung nicht ermittelt werden. Aus diesem Grund wird für die Streuung des Minimal- und Maximalwertes ein Wert von 10% abgeschätzt.

Die ermittelten Schermomente (Gleichung 3.1) werden für die weitere Auswertung auf die kleinste vorhandene Bruchfläche (Abbruch = 8 cm²) der Klebproben bezogen, um die benötigten Schälwiderstände, die zum Vergleich der Proben untereinander herangezogen werden, berechnen zu können.

$$W_s = \frac{M}{A} \quad (3.1)$$

W_s ... Schälwiderstand [N/mm]

M ... Schermoment [Nmm]

A ... Bruchfläche [mm²]

Aufgrund der Umwelteinflüsse, denen Ski ausgesetzt sind, werden in der Skiindustrie Trommelschälversuche bei unterschiedlichen Zuständen an einer Probe durchgeführt. Die Prüfung wurde bei allen 10 Klebproben vorgenommen. Der Prüfablauf ist strikt einzuhalten und ist wie folgt gegliedert:

1. Raumtemperatur
2. 3 stündige Lagerung bei -25°C
3. 24 stündige Tauchwasserbehandlung

Ergebnisse der Trommelschälprüfung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Schälversuche bei Raumtemperatur, bei -25°C und nach der Tauchwasserbehandlung diskutiert. Getestet wird der Schälwiderstand der beiden Kleber-Typen auf der Oberseite und der Unterseite der Klebprobe. Es werden 6 Schälversuche je Probe (3 auf der Oberseite und 3 auf der Unterseite) durchgeführt, wobei zuerst die Versuche bei Raumtemperatur, danach bei -25°C und zum Schluss nach einer 24 stündigen Tauchwasserbehandlung erfolgen.

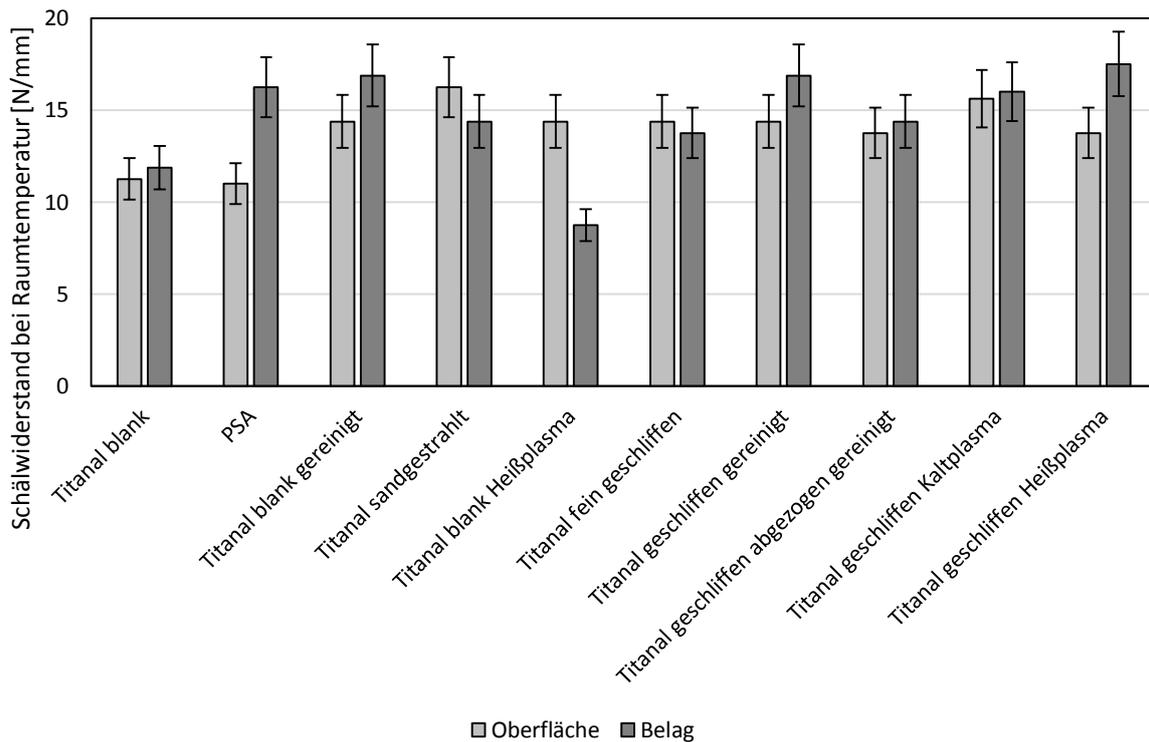


Abbildung 3-26: Schälwiderstand bei Raumtemperatur

Die Ergebnisse der Schälversuche bei Raumtemperatur sind in Abbildung 3-26 zu sehen.

Betrachtet man zuerst die Ergebnisse auf der Oberseite der Proben, so ist festzustellen, dass, verglichen mit der PSA Referenzprobe, alle Proben sehr gute Schälwiderstandswerte erreichen, die alle über dem der Referenzprobe liegen. Bei allen Proben auf der Oberseite kam es zu einem „Folienriss“. Unter „Folienriss“ versteht man das während des Schälvorgangs auftretende Abreißen bzw. Abbrechen des Schälstreifens von der Probe. Bei allen Proben hielt die Klebung durch die Reinigung bzw. Vorbehandlung so gut, dass es zu einem Versagen der PA-Oberfläche kam.

Auf der Unterseite der Proben – belagseitig – können durch die Vorbehandlung bzw. die Reinigung vergleichsweise auch gute Haftungswerte erreicht werden, die um die *PSA* Referenzprobe schwanken. Das Maximum auf der Belagseite stellt die Klebprobe *Titalan geschliffen Heißplasma* dar, welche die Referenzprobe um ca. 5 % übersteigt. Bei den Proben *Titalan blank gereinigt*, *Titalan blank Heißplasma* sowie *Titalan geschliffen gereinigt* trat ein „Folienriss“ des Belages auf.

Abbildung 3-27 verdeutlicht die Ergebnisse der Trommelschälprüfung bei -25°C . Bei den Schälprüfungen kommt es bei allen Klebproben auf der Ober- und der Unterseite zum „Folienriss“. Bei den drei Proben *Titalan blank (Oberfläche)*, *Titalan blank gereinigt (Belag)* und *Titalan geschliffen Kaltplasma (Oberfläche)* tritt sogar ein Direktbruch ein. Beim Direktbruch kommt es beim Aufbringen der Kraft zum sofortigen Bruch der abziehenden Lasche von der Probe; der Schälstreifen wird im Vergleich zum „Folienriss“ gar nicht von der Probe abgezogen. Aus diesem Grund können für o.g. Proben keine Schälwiderstände berechnet werden.

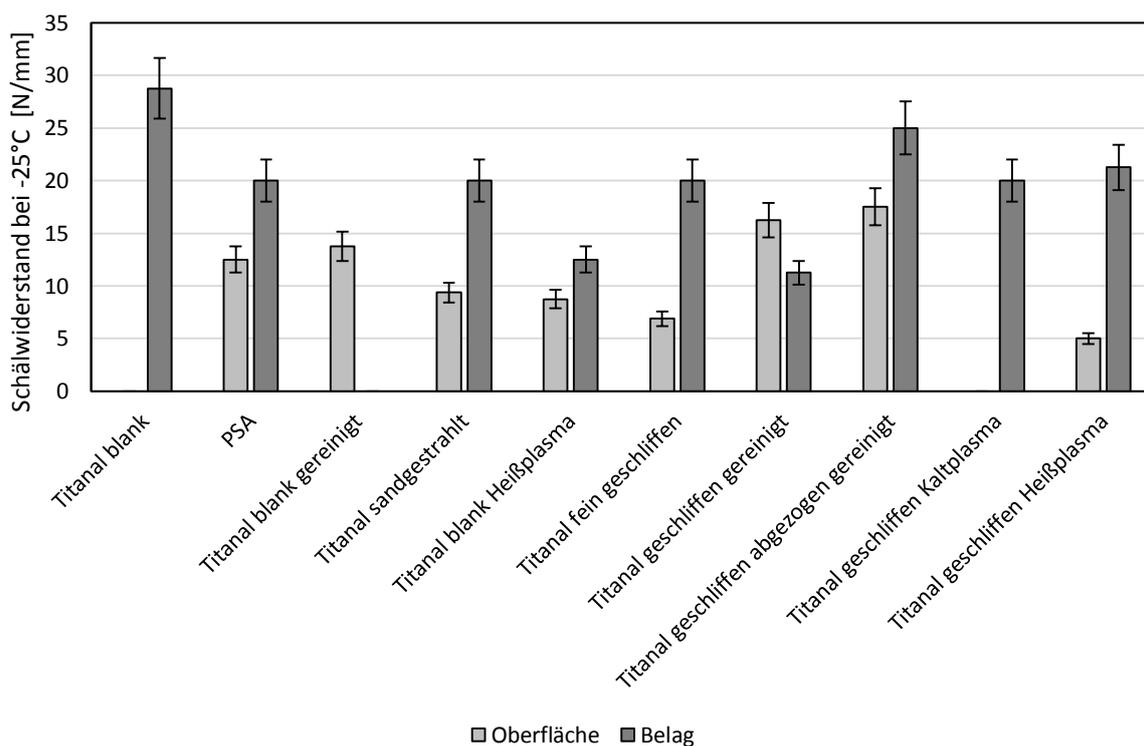


Abbildung 3-27: Schälwiderstand bei -25°C

Wie auch schon bei den Schälprüfungen bei Raumtemperatur tritt bei den Proben auf der Oberseite ein Versagen der PA-Oberfläche auf. Die Ergebnisse auf der Oberseite der Proben weisen eine große Streuung untereinander auf; die Werte liegen zwischen 5 N/mm und 17,5 N/mm. Bezogen auf die *PSA* Referenzprobe erreichen nur drei Proben einen höheren Schälwiderstand wovon *Titalan geschliffen abgezogen gereinigt* das Maximum, mit einem Wert von

17,5 N/mm, darstellt. *Titanal geschliffen Heißplasma* stellt mit einem Schälwiderstand von 5 N/mm das Minimum auf Seite der Oberfläche dar. Auf der Unterseite der Proben können deutlich höhere Schälwiderstände als auf der Oberseite der Proben erreicht werden. Auffällig ist der sehr hohe Schälwiderstand von *Titanal blank*, welcher das Maximum aller Messungen darstellt. Verglichen mit der *PSA* Referenzprobe zeigen bis auf *Titanal blank Heißplasma* und *Titanal geschliffen gereinigt* Schälwiderstände auf gleichem bzw. höherem Niveau.

Die Ergebnisse der Tauchwasserprüfung sind in Abbildung 3-28 dargestellt. Auf Seite der Oberfläche werden, verglichen mit der *PSA* Referenzprobe, annähernd gleiche bzw. bessere Schälwiderstände erreicht. Auch hier hat nicht die Klebung sondern die PA-Oberfläche versagt. Bei der Probe *Titanal geschliffen Kaltplasma* kann auf Grund eines Direktbruches der Probe, keine Auswertung der Ergebnisse erfolgen. Oberflächenseitig stellt *Titanal sandgestrahlt* das Maximum mit einem Widerstand von 18,75 N/mm dar. Die Schälwiderstände auf der Unterseite der Proben haben mit *PSA* ein Maximum bei einem Widerstand von 25 N/mm. Die übrigen Proben liegen alle unter diesem Niveau, jedoch zeigen die übrigen Proben nur eine kleine Streuung untereinander. Im Allgemeinen werden nach der Tauchwasserbehandlung sehr hohe Schälwiderstände erreicht.

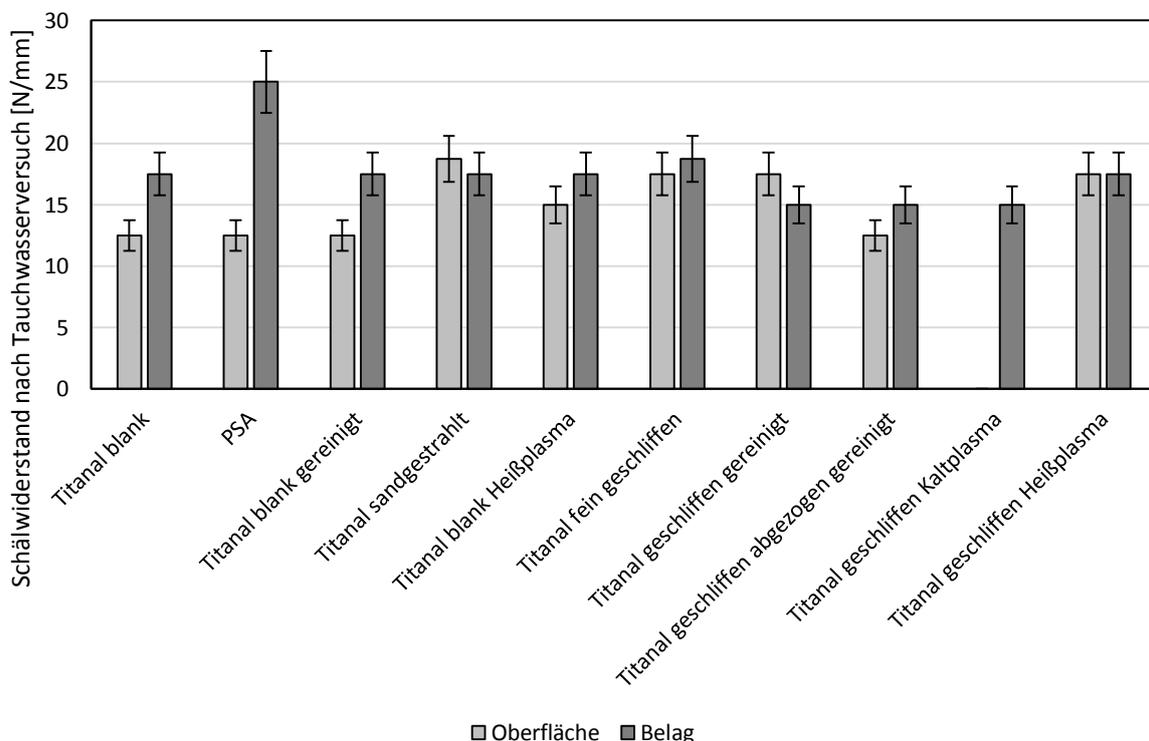


Abbildung 3-28: Schälwiderstand nach der Tauchwasserbehandlung

Makroanalyse der Bruchflächen

Bei der Belastung einer Klebverbindung über ihre Tragfähigkeit, kann es einerseits zum Ablösen des Klebstoffes von der Oberfläche des Fügeteils (adhäsives Versagen), andererseits zu einem Bruch innerhalb der Klebschicht (kohäsives Versagen) kommen. Es kann ebenso zu einer Kombination dieser beiden Fälle kommen (Mischbruch). Um bei der Auswertung der zerstörenden Prüfverfahren nicht nur die gemessenen Kennwerte zu dokumentieren, ist es sinnvoll, auch eine Analyse der Bruchbilder durchzuführen [1].

Bei der Bruchbildanalyse wird repräsentativ eine Probe (*Titanal fein geschliffen*) veranschaulicht und diskutiert. Die Aufnahmen der restlichen neun Proben sind im Anhang D (Seite 103 – 111) zu finden. Auf der linken Seite der Probe in Abbildung 3-29 erkennt man den 4 cm breiten Streifen, der vor der Anfertigung der Klebproben, durch das Anbringen des Klebebandes verursacht wird und dem besseren Abziehen der 20 mm breiten Streifen dient. Der oberste Streifen, an dem noch die abgezogene Oberfläche hängt, ist die Tauchwasserprobe. Man sieht, dass es zu einem Versagen der Oberfläche gekommen ist. Auf dem Titanal befindet sich eine dunklere Schicht, bei der es sich um den Rest der Oberfläche handelt. Auf der oberen Kante des abgezogenen Streifens kann man leicht metallische Bereiche (siehe Markierung) erkennen, die durch das Beschneiden entstanden sein dürften. In der Mitte der Probe wurde die Schälprüfung bei -25°C durchgeführt. Es kam bei dieser Probe zu einem Direktbruch der Oberfläche, weshalb sich die Oberfläche auch noch auf der Probe befindet und kein Schälwiderstand ermittelt werden kann. Beim untersten Streifen handelt es sich um die Probe, die bei Raumtemperatur durchgeführt worden ist. Es kam hier zu einem „Folienriss“ der Oberfläche, weshalb der abgezogene Streifen nicht mehr abgebildet ist. Wie auch schon bei der Tauchwasserprobe ist hier ein Versagen der Oberfläche zu erkennen. Zusätzlich ist es durch das Beschneiden zu adhäsiven Ablösungen im Randbereich (siehe Markierung) des Probenstreifens gekommen.



Abbildung 3-29: Bruchfläche *Titanal fein geschliffen + UB* oberflächenseitig

Der Bruch auf der Belagseite der Probe zeigt ein ähnliches Bruchbild (Abbildung 3-30). Ganz oben auf der Klebprobe ist der Probenstreifen der Tauchwasserprüfung zu sehen. Man erkennt sehr deutlich, dass es sich hierbei um einen Adhäsionsbruch handelt. Der Schälstreifen weist keine Klebstoffrückstände auf, es sind schwarze Rückstände des Belages auf dem Titanal zu erkennen und auf der Bruchfläche sind keine blanken, metallischen Stellen ersichtlich. In der Mitte der Probe befindet sich der Probenstreifen, welcher bei -25°C geprüft wurde. Hier ist es zu einem Direktbruch der Probe gekommen und es konnte kein Schälwiderstand ermittelt werden. Ganz unten auf der Probe wurde die Prüfung bei Raumtemperatur durchgeführt, wobei es auch hier zu einem „Folienriss“ des Belages gekommen ist – der Schälstreifen befindet sich nicht mehr auf der Probe. Die Bruchfläche zeigt ein identes Bruchbild wie auch schon bei der Tauchwasserbehandlung.

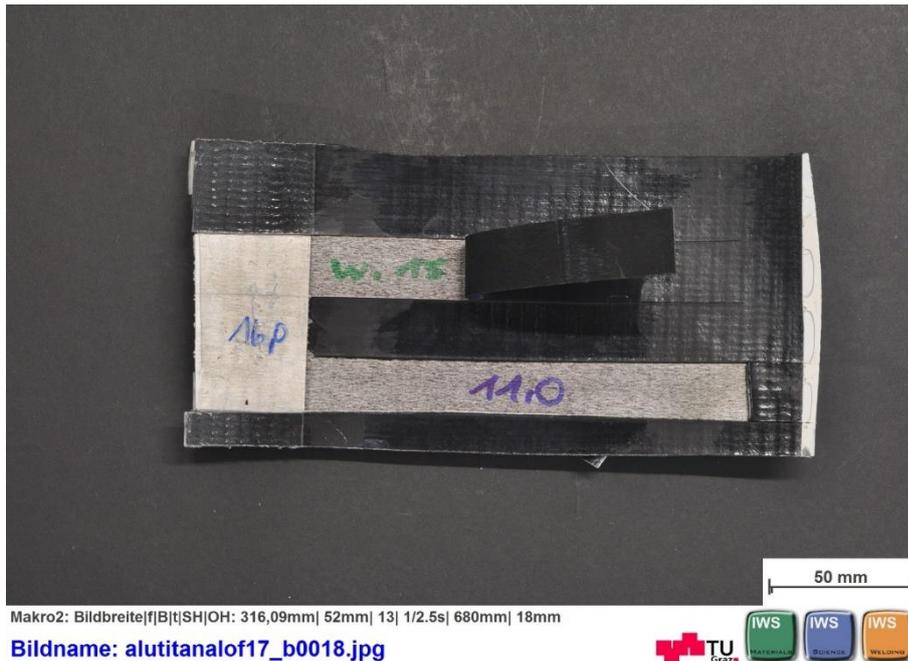


Abbildung 3-30: Bruchfläche *Titanal fein geschliffen* + UB belagseitig

Zusammenhang Oberflächenenergie und Schälwiderstand

Um in weiterer Folge eine Aussage über die positiven Effekte der Oberflächenvorbehandlung und der Reinigung treffen zu können, werden die Ergebnisse der Oberflächenenergieberechnung mit denen der Schälwiderstände in Zusammenhang gebracht. Prinzipiell gilt: Je höher die Oberflächenenergie ist, desto höhere Schälwiderstände können erreicht werden.

Repräsentativ wird nur die Auswertung bei Raumtemperatur erklärt, die übrigen Diagramme (-25°C und Tauchwasserbehandlung) stellen einen ähnlichen Sachverhalt dar und sind im Anhang E ab Seite 112 zu finden.

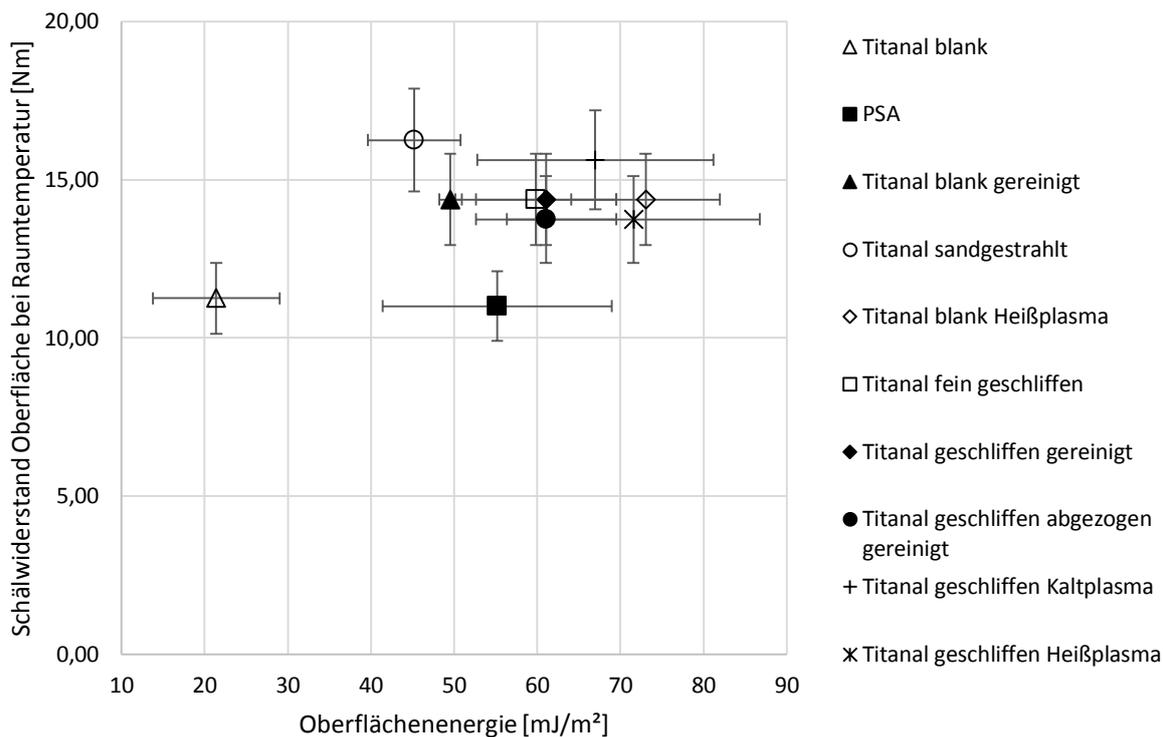


Abbildung 3-31: Zusammenhang von Schälwiderstand und Oberflächenenergie bei RT (oberflächenseitig)

Abbildung 3-31 zeigt den Schälwiderstand aufgetragen über die Oberflächenenergie für verschiedene Oberflächenzustände von Titanal. Die Werte wurden bei Raumtemperatur ermittelt. Idealerweise müsste ein hoher erreichter Widerstand gleichbedeutend mit einer hohen Oberflächenenergie sein. *Titanal blank* liefert die schlechtesten Ergebnisse hinsichtlich Oberflächenenergie und, wie erwartet, wird der geringste Schälwiderstand mit diesem Material im Verbund erreicht. Überrascht hat mit einem sehr geringen Widerstand die *Titanal PSA* Probe, die mit einer fast doppelt so hohen Oberflächenenergie der abschälenden Kraft sogar noch weniger Widerstand entgegenbringt. Im mittleren Bereich der Abbildung liegen die sechs Proben *Titanal blank gereinigt*, *Titanal fein geschliffen*, *Titanal geschliffen gereinigt*, *Titanal blank Heißplasma*, *Titanal geschliffen abgezogen gereinigt* und *Titanal geschliffen Heißplasma* knapp beieinander. Diese Proben liefern alle annähernd gleich hohe Widerstände bei ähnlichen Oberflächenenergien. Den größten Schälwiderstand konnte *Titanal sandgestrahlt* der Abscherung entgegenbringen, dicht gefolgt von *Titanal geschliffen Kaltplasma*, wobei die kaltplasmaaktivierte Probe die größere Oberflächenenergie aufweist.

Der Zusammenhang von Schermoment und Oberflächenenergie auf der Seite des Belags ist in Abbildung 3-32 dargestellt.

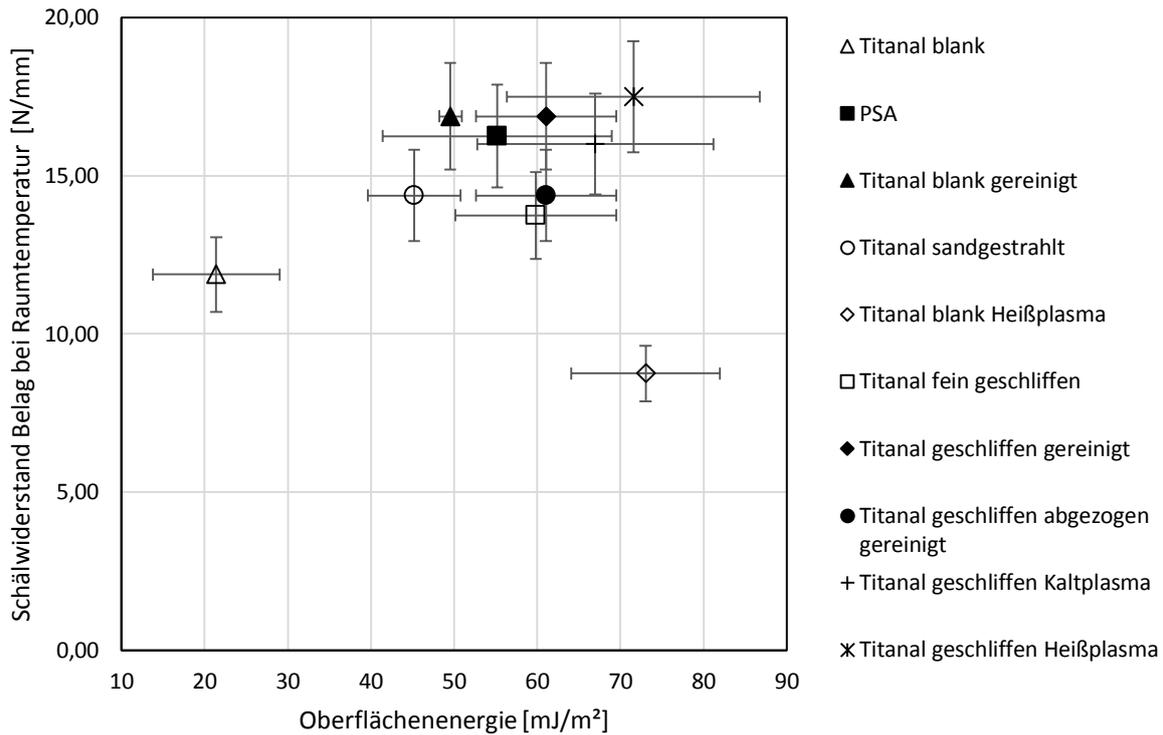


Abbildung 3-32: Zusammenhang von Schälwiderstand und Oberflächenenergie bei RT (belagseitig)

Trotz einer hohen Oberflächenenergie kann die Probe *Titanal blank Heißplasma* den geringsten Widerstand von 8,75 N/mm aufbringen. Auf der Belagseite erreicht *Titanal blank*, wie auch schon bei der Oberfläche, einen geringen Widerstand von 11,88 N/mm. Am besten schneidet bei den Versuchen auf der Belagseite die Probe von *Titanal geschliffen Heißplasma* ab. Die Probe weist nicht nur eine hohe Oberflächenenergie auf, sie erreicht auch den höchsten Schälwiderstand. Die restlichen Proben gruppieren sich abermals in der Mitte des Diagrammes. Jene Proben, die höhere Oberflächenenergien (~ 60 mJ/m²) erzielen (*Titanal blank gereinigt*, *Titanal geschliffen gereinigt*, *Titanal PSA*, *Titanal geschliffen Kaltplasma*) weisen Schälwiderstände der Größenordnung 16 N/mm auf. Die übrigen drei Proben (*Titanal Sandgestrahlt*, *Titanal geschliffen abgezogen gereinigt*, *Titanal fein geschliffen*) gruppieren sich bei Oberflächenenergien um 55 mJ/m² mit annähernd gleichen Schälwiderständen um 14 N/mm.

4 Investitionskostenvergleich

Unter Investition versteht man allgemein die Beschaffung von Gegenständen bzw. den Aufbau von immateriellen Werten. Da die Beschaffung neuer Betriebsmittel in der Regel sehr teuer ist, muss eine Fehlentscheidung unter allen Umständen vermieden werden. Prinzipiell unterscheidet man zwischen statischer und dynamischer Investitionsrechnung, wie sie in Abbildung 4-1 dargestellt sind [56].

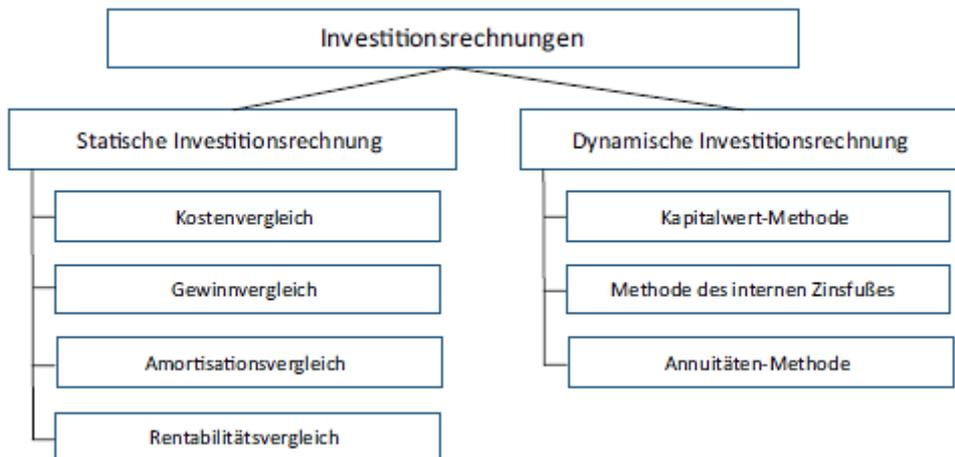


Abbildung 4-1: Übersicht der Investitionsverfahren [56]

Bei der statischen Investitionsrechnung handelt es sich um Verfahren, die zur Entscheidungsfindung über die Vorteilhaftigkeit von Investitionsobjekten helfen sollen. Für den Vergleich der Kosten der genannten Investitionsobjekte bei gegebener Kapazität wird die Kostenvergleichsrechnung herangezogen. Der wesentlichste Vorteil der Kostenvergleichsrechnung gegenüber anderen Verfahren ist die einfache Berechnung der Handlungsalternativen. Sie ist für Entscheidungsvorbereitungen ein gutes Instrument um sich einen ersten Überblick über die Alternativen zu verschaffen. Als nachteilig erweist sich, dass eine strikte Trennung von fixen und variablen Kosten durchgeführt werden muss und der tatsächliche Anfall der Kosten unberücksichtigt bleibt. Mit der Kostenvergleichsrechnung ist im Vergleich zu den dynamischen Methoden auch keine exakte Bestimmung von kostenrechnerischen Größen möglich. Ebenso wird eine Verzinsung bei der Berechnung nicht berücksichtigt [56–58].

Im Zuge der vorliegenden Arbeit soll eine statische Investitionskostenanalyse von unterschiedlichen Oberflächenvorbehandlungsmethoden durchgeführt werden und die Verfahren hinsichtlich Anschaffungs- und Prozesskosten miteinander verglichen werden. Zur Datenbeschaffung wurden von diversen externen Unternehmen Preise als Richtwerte eingeholt.

Eine Vergleichsanalyse wurde für eine Ultraschallbadreinigung, eine Durchlaufreinigung, eine Sandstrahlanlage, sowie die Heiß- und Kaltplasmaaktivierung durchgeführt.

Die Grundaussage des Kostenvergleiches ist eine Aussage darüber, ob eine Investition A der Investition B vorzuziehen ist, oder nicht. Investition A ist Investition B dann vorzuziehen, wenn die durchschnittlichen Gesamtkosten pro Periode durch Investition A geringer als die durchschnittlichen Gesamtkosten pro Periode durch Investition B sind [59].

Unter Gesamtkosten versteht man die Summe aus fixen und variablen Kosten:

- Unter fixen Kosten versteht man die mit der Investition verbundenen spezifischen Fixkosten sowie die anfallenden kalkulatorischen Zinskosten und die Abschreibungen
- Bei den variablen Kosten handelt es sich um die spezifisch für die jeweilige Investitionsalternative anfallenden Aufwendungen für Löhne, Material- oder Energieverbrauch. [59].

Diese Kosten werden auf Basis der produzierten Laufmeter Titanal berechnet und sollen nach einem Schema ähnlich dem laut Tabelle 5 erfolgen.

Die Abschreibung der Kosten erfolgt linear [58] und die Berechnung der Zinsen wird auf Nachfrage bei Firma Atomic nicht berücksichtigt, da die Investitionssumme unter 1.000.000 € beträgt. Die Liquidationserlöse werden in dieser Berechnung auch nicht weiter beachtet, da keine Angaben gemacht wurden, ob die Anlagen wiederverkauft werden sollen.

Da zumindest bei den Reinigungsverfahren die Titanalbleche unabhängig von gewählten Verfahren geschliffen und die Kontur des Skis gefräst werden muss, wurde auch die Bearbeitungszeit pro PADE (Schleifen und Konturfräsen) angegeben. Die Bearbeitungszeit beträgt 0,317 min für 3,44 m Titanal.

Die Energiekosten werden nicht berechnet, aber die Angabe der Anschlussleistung soll erfolgen.

Tabelle 5: Beispiel einer Kostenvergleichsrechnung für zwei Alternativen [58]

<u>Grundangaben</u>	Investition A	Investition B
Anschaffungskosten in €	60.000	75.000
Liquidationserlöse in €	0	5.000
Nutzungsdauer in Jahren	10	10
Leistungsmenge in km/Jahr	35.000	30.000
Kalkulatorische Zinssatz in %	8	8
<u>Ermittlung der fixen Kosten</u>		
Abschreibung [€/Jahr]	6.000	7.000
Zinsen [€/Jahr]	2.400	3.200
Wartungskosten [€/Jahr]	3.000	1.500
Steuern/Versicherung [€/Jahr]	1.550	1.500
<i>Fixe Kosten [€/Jahr]</i>	12.950	13.200
<i>Fixe Stückkosten [€/km]</i>	0,37	0,44
<u>Ermittlung der variablen Kosten</u>		
Materialkosten [€/Jahr]	1.750	1.200
Benzinkosten [€/Jahr]	4.200	3.000
<i>Variable Kosten [€/Jahr]</i>	5.950	4.200
<i>Variable Stückkosten [€/km]</i>	0,17	0,14
Gesamtkosten [€/Jahr]	18.900	17.400
Gesamt Stückkosten [€/km]	0,54	0,58

Die Materialpreise von *Titanal blank* und *PSA*, sowie der Stundensatz der Personalkosten wurden ebenfalls von der Firma Atomic zur Verfügung gestellt und sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Richtpreise des Werkstoffes Titanal

Abmessungen t x b	<i>Titanal blank</i>	<i>Titanal PSA</i>
0,4/145	1,17 €/m	
0,4/140		1,94 €/m
1,0/200	3,53€/m	4,67€/m
Personalkosten	26,08 €/h	

Die folgenden Berechnungen werden für alle Verfahren mit den Materialkosten für 0,4 mm dickes blankes Titanal durchgeführt. Die Berechnung der Personal- und Prozesskosten wird auf Basis eines zweiseichtigen Betriebes zu je 8 Stunden bei einer technischen Verfügbarkeit von 95 % sowie 50 Arbeitswochen pro Jahr durchgeführt. Dadurch ergeben sich 5.130 Betriebsstunden pro Jahr.

4.1 Ultraschallgerät Sonorex Technik L 220 der Fa. Reichmann Industrieservice (ultraschall-anlagen.de)

In den Anschaffungskosten des Ultraschallgerätes Sonorex Technik L 220 ist ein 2-Kammer Ultraschallgerät (Reinigen und Spülen) und ein passender Ablagerost enthalten.

Ultraschallgerät Sonorex Technik L 220: € 18.779,79

Passender Ablagerost LR 220: € 392,06

Die Prozesskosten, die den geeigneten Reinigungszusatz Tickopur R 33 umfassen, werden wie folgt und unter folgenden Annahmen berechnet:

Der Hersteller des Ultraschallgerätes kann ohne eine „Probewaschung“ keine Aussage darüber treffen, wie viele Bleche mit einem Bad wirklich gereinigt werden können. Als erste Schätzung wurde angeraten, nach 20 Blechen eine komplette Baderneuerung durchzuführen. Damit könnten 40 m Titanal pro Bad gereinigt werden.

Ein Kanister des Reinigungsmittelkonzentrats, mit einem Inhalt von 25 Liter kostet € 143,50. Bei einem 5%-igem Ansatz kommt man auf 9,25 l Reinigungsmittel pro Wanneninhalt. Um eine Menge von 600.000 m Titanal reinigen zu können, benötigt man 15.000 Bäder, denen in Summe 138.750 l Reinigungsmittel zugesetzt werden muss. Bei einem Wanneninhalt von 185 l ergeben sich somit 5.550 Kanister mit 25 l Inhalt. Damit belaufen sich die Kosten für den Reinigungszusatz für 600.000 m auf 796.425 € pro Jahr.

Die Reinigungszeit für ein Titanalblech mit 2 m Länge wurde mit 60 Sekunden angenommen, dabei kommt man bei gegebenem „Durchsatz“ innerhalb eines Jahres auf die bereits genannten 5000 h Betriebszeit. Bei dem genannten Personalstundensatz und unter der Annahme, dass für die Reinigung nur $\frac{1}{2}$ Person benötigt wird, ergeben sich die Personalkosten zu 66.895,2 € pro Jahr. Zu berücksichtigen sind noch die Personalkosten PADE, die den Schleif- und Fräsvorgang der Titanalbleche umfassen und die sich bei einer Bearbeitungszeit von 0,317 min für 3,44 m auf 24.033,02 € pro Jahr belaufen. Damit ergeben sich Personalkosten in der Höhe von 90.928,22 € pro Jahr.

Laut Angabe der Firma fallen bei diesem Reinigungsgerät keine Wartungskosten an, sie wurden auf Wunsch der Firma Atomic als variabel deklariert.

Die Anschlussleistung beträgt 2 kW.

4.2 Bandreinigungsanlage der Fa. SLE electronic GmbH

Die Anschaffungskosten der Bandreinigungsanlage Microclean SC S300 betragen 200.000 €. Die Bleche durchlaufen bei dieser Anlage drei Stufen: eine Spritzreinigung mit neutralen bzw. leicht alkalischen Reinigern. Im Anschluss daran erfolgt ein Spülvorgang (meist mit Ve-Wasser), dem eine Trocknung nachfolgt.

Die maximal mögliche Vorschubgeschwindigkeit der Bandreinigungsanlage beträgt 20 m/min, die kumulierte Anschlussleistung der Anlage beträgt 100kW.

Der gesamte Wartungsaufwand beläuft sich laut Angaben der Firma auf 16.425 € pro Jahr.

Die Personalkosten werden, wie bereits genannt, auf Grundlage von 5.130 h Betriebszeit pro Jahr und einem Stundensatz von 26,08 € berechnet. Wie auch schon bei der Ultraschallbadreinigungsanlage wird für das Auflegen und Abnehmen der Bleche nur ½ Person für die Personalkosten berücksichtigt. Da das Titanal vor der Reinigung geschliffen und gefräst werden muss, fallen bei dieser Reinigungsvariante ebenfalls die Kosten PADE in der Höhe von 90.928,22 € pro Jahr an.

Die Prozesskosten wurden von der Fa. SLE electronic GmbH berechnet und ergeben sich zu 22.110,20 € pro Jahr.

4.3 Injektor-Strahlkabine der Fa. SLF Oberflächentechnik GmbH

Die Strahlkabine besteht aus einem mechanischen Strahlmitteltransport, einer Aufbereitung des Strahlmittels, der notwendigen Filteranlage und Kompressor, einem angetriebenen Rollgang für den Werkstücktransport, 10 Strahldüsen und einer horizontalen Düsenoszillation. Die Durchlaufgeschwindigkeit der Werkstücke erfolgt ca. mit 5 m/min.

Der Preis für die Anlage beträgt ca. 300.000,-€ bei manuellem Auf- und Ablegen der Teile auf den Rollengang.

Der Strahlmittelverbrauch der Anlage liegt bei ca. 0,14 kg/min. Dadurch ergibt sich ein jährlicher Strahlmittelbedarf von 43.092 kg. Für die Berechnung wurden Glasperlen als Strahlmittel mit einem Kilopreis von 0,81 € angenommen. Damit ergeben sich jährliche Strahlmittelkosten in Höhe von 34.904,52 €. Die elektrische Anschlussleistung der Anlage inkl. Kompressor liegt bei ca. 70 kW. Die Wartungskosten der gesamten Anlage inkl. der Verschleißteile liegen bei ca. 30.000,-€ pro Jahr unter der Annahme eines 2-schichtigem Betriebes.

Die Personalkosten werden unter der Annahme berechnet, dass für das Auflegen und das Abnehmen der Bleche vom Rollengang nur ½ Person benötigt wird. Damit ergeben sich die Personalkosten für die Stahlmaschine von 66.895,2 € pro Jahr. Da bei dieser Vorbehandlung

das Schleifen nicht notwendig ist, aber die Bleche trotzdem gefräst werden müssen, werden die Kosten PADE nur zur Hälfte berücksichtigt. Damit belaufen sich die gesamten Personalkosten auf 78.911,71 € pro Jahr.

4.4 Kaltplasma MCP der Fa. Inocon

Die Anschaffungskosten der Kaltplasmaanlage mit 30 Düsensätzen liegen ca. bei 280.000 €.

Die Prozesskosten der Druckluft sind abhängig von der jeweiligen Vorschubgeschwindigkeit mit der sich die Titanbleche unter den Plasmadüsen fortbewegen. Prinzipiell kann jede beliebige Vorschubgeschwindigkeit eingestellt werden, allerdings müssen der Gasdurchsatz sowie der Düsenabstand zum Substrat dementsprechend variiert werden um eine optimale Aktivierung bzw. Reinigung zu erhalten und um die Temperaturen unter den gewünschten 200 °C zu halten. Die Berechnung der Druckluftkosten wird für die bereits genannten 5.130 Betriebsstunden durchgeführt. Bei einem Durchsatz von 21 l/min benötigt man für die geforderte Anzahl an Betriebsstunden 6.463.800 l Druckluft pro Jahr. Bei einem durchschnittlichen Preis von 2,5 Cent/Nm³ kostet die Druckluft 161,60 €.

Bei diesem Durchsatz müsste man den kompletten Düsenatz rund 10 mal pro Jahr wechseln; diese Wartungskosten belaufen sich auf 89.569,80 € pro Jahr.

Die Anschlussleistung der Kaltplasmaanlage beträgt 500W.

Nachdem die Kaltplasmaaktivierung auf jeden Fall an den geschliffenen Blechen erfolgen muss, müssen neben den Personalkosten für die Aktivierung, die für ½ Person berechnet werden, auch die Kosten PADE dazugerechnet werden. Damit ergeben sich die Personalkosten für dieses Verfahren zu 90.928,22 € pro Jahr.

4.5 Heißplasma IC3 der Fa. Inocon

Die Anschaffungskosten für eine Düse des Heißplasmabrenners IC3 betragen ca. 43.397,4 €. Unter der Annahme, dass bei einer Aktivierungsbreite von 2 cm 15 Düsensätze benötigt werden, ergeben sich somit Anschaffungskosten von ca. 651.000 €.

Die Prozesskosten sind abhängig vom verwendeten Prozessgas. Auch hier kann man sich sicherlich Kosten einsparen, indem man die optimalen Parameter durch Versuche ermittelt. Durch die Vorschubgeschwindigkeit und die Stromstärke können die Kosten vorwiegend reguliert werden. PADE Kosten werden bei den Personalkosten vollständig miteinberechnet.

Für die Berechnung werden folgende Annahmen getroffen: Der Gasdurchsatz beträgt 10 l/min, die Vorschubgeschwindigkeit der Bleche wird ebenfalls mit 5 m/min angenommen. Bei einem Literpreis für Argon von 0,904 € kommt man damit auf Prozesskosten von 2.782.512 €.

Die Wartungskosten betreffen die Kathode und die Düse. Laut Aussage der Firma Inocon beträgt die Standzeit der Düse in etwa 2 Monate. Es wird somit ein Kathoden- und Düsentausch 6 mal pro Jahr vorgeschlagen. Bei größeren Abnahmemengen sind von den im Angebot angegebenen Kathoden folgende Rabatte möglich:

- Ab 10 Stück -20%
- Ab 50 Stück -35%
- Ab 100 Stück -60%

Für die jährlich benötigten Kathoden ergibt sich somit ein Rabatt von 35%, wodurch Wartungskosten in Höhe von 23.085,68 € pro Jahr ergeben.

Die Anschlussleistung der Stromquelle liegt zwischen 500-700 W.

Die Gegenüberstellung der Kosten aller Verfahren ist in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Kosten-Gegenüberstellung aller Verfahren

<u>Grundangaben</u>	Ultraschallreinigung (Reichmann Industrie- service)	Durchlaufreinigung (SLE electronic GmbH)	Bandstrahlanlage (SLF Oberflächen- technik GmbH)	Kaltplasma (Inocon Technologie GmbH)	Heißplasma (Inocon Technologie GmbH)
Anschaffungskosten [€]	19.171,85	200.000,00	300.000,00	280.000,00	651.000,00
Nutzungsdauer [Jahre]	10	10	10	10	10
Leistungsmenge [m/Jahr]	600.000	600.000	600.000	600.000	600.000
<u>Ermittlung der fixen Kosten</u>					
Abschreibung [€/Jahr]	1.917,19	20.000,00	30.000,00	28.000,00	65.100,00
Wartungskosten [€/Jahr]	variabel	16.425,00	30.000,00	89.569,80	23.085,68
<i>Fixe Kosten [€/Jahr]</i>	1.917,19	36.425,00	60.000,00	117.569,80	88.185,68
<i>Fixe Stückkosten [€/m]</i>	0,003	0,06	0,10	0,20	0,15
<u>Ermittlung der variablen Kosten</u>					
Materialkosten [€/Jahr]	677.793,10	677.793,10	677.793,10	677.793,10	677.793,10
Prozesskosten [€/Jahr]	796.425,00	22.119,20	34.904,52	161,60	2.782.512,00
Personalkosten [€/Jahr]	90.928,22	90.928,22	78.911,71	90.928,22	90.928,22
<i>Variable Kosten [€/Jahr]</i>	1.565.146,33	790.840,53	791.609,34	768.882,92	3.551.233,33
<i>Variable Stückkosten [€/m]</i>	2,61	1,32	1,32	1,28	5,92
Gesamtkosten [€/Jahr]	1.567.063,51	827.265,53	828.824,51	886.452,72	3.639.419,00
Gesamt Stückkosten [€/m]	2,613	1,38	1,42	1,48	6,07

5 Zusammenfassung

Für die vorliegende Arbeit wurde eine makroskopische Analyse, Untersuchungen am Rasterelektronenmikroskop und EDX Analysen von der hochfesten Aluminiumlegierung Titanal durchgeführt. Dabei wurde der Fokus auf die Ursache für das Auftreten von lokalen Haftungs-löchern im Skiverbund gelegt. Die Untersuchungen zeigten deutliche Spuren von organischen und anorganischen Fremdpartikel, welche auch in der chemischen Analyse nachgewiesen werden konnten. Zusätzlich konnten nicht abgelöste Späne auf den geschliffenen Blechen gefunden werden. Diese Fehlstellen, sowie undefinierte Lagerbedingungen und ein Fehlen von Handschuhen in der Fertigung können ein möglicher Ausgangspunkt für lokale Haftungs-löcher sein. Durch einen definierten Oberflächenzustand des Titanals kann die Häufigkeit des Auftretens solcher Fehlstellen reduziert werden. Dazu wurden unterschiedliche Oberflächenvorbehandlungs- sowie ein Reinigungsverfahren untersucht und Benetzungsuntersuchungen in Form von Kontaktwinkelmessungen durchgeführt, um eine Vergleichbarkeit dieser Behandlungsverfahren zu generieren. Alle Oberflächenvorbehandlungen konnten die Benetzbarkeit bzw. die Oberflächenenergie im Vergleich zum Ausgangszustand deutlich verbessern.

Neben mechanischen Oberflächenvorbehandlungen wurden auch Oberflächenaktivierungen bzw. -reinigungen mittels Plasmas durchgeführt. Die notwendige Ausrüstung wurde von der Firma Inocon zur Verfügung gestellt. Einerseits wurde eine Kaltplasmaaktivierung mit Druckluft, andererseits die Heißplasmaaktivierung mit Argon als Prozessgas untersucht.

Probleme bei den Kontaktwinkelmessungen nach den Plasmabehandlungen traten vor allem bei den geschliffenen Proben auf, da durch die große Rautiefe und die gerichtete Oberfläche die Tropfen nicht gemessen werden konnten. Hier wurden die Grenzen der Messmethode deutlich und es ergeben sich dadurch relativ große Messabweichungen.

Um das transiente Verhalten der Oberflächenbehandlungen zu ermitteln, wurden von 6 Proben die zeitlichen Verläufe der Oberflächenenergie über den Zeitraum einer Woche ermittelt. Die Verläufe zeigen deutlich, dass sich bereits innerhalb der ersten 24 Stunden nach der Oberflächenvorbehandlung die Oberflächenenergien verringern und sich ein quasistationärer Zustand einstellt.

Mit ausgewählten Verfahren wurden im Anschluss an die Kontaktwinkelmessungen bzw. die Bestimmung der Oberflächenenergien 10 Klebproben angefertigt. Alle Proben wurden unter den gleichen Bedingungen mittels einer zerstörenden Trommelschälprüfung geprüft. Insgesamt wurden drei Trommelschälversuche unter verschiedenen Umgebungsbedingungen durchgeführt:

- Bei Raumtemperatur
- Nach einer 3 stündigen Lagerung bei -25°C
- Nach einer 24 stündigen Tauchwasserbehandlung in Leitungswasser

Die ermittelten Kennwerte des Schälwiderstandes können aufgrund der gleichwertigen Prüflinge gegenübergestellt werden. Bei allen vorbehandelten Proben konnten gute Haftungswerte ermittelt werden. Es wurde zusätzlich eine Makrodokumentation der Bruchflächen durchgeführt, bei der festgestellt werden konnte, dass es bei der Klebung auf der Oberseite immer zu einem Versagen der PA-Oberfläche gekommen ist, während die Brüche auf der Belagseite adhäsiv erfolgt sind. Aufgrund der Messmethode und der Messauswertung wurden durchschnittliche Schälwiderstandswerte gemessen.

Die Oberflächenaktivierung mittels Plasmas brachte mitunter die besten Ergebnisse hinsichtlich dem Zusammenhang von Oberflächenenergie und Haftfestigkeit.

Nach den praktischen Versuchen wurden noch die Gesamtkosten von einer Ultraschallbadreinigung, einer Durchlaufreinigungsanlage, einer Bandstrahlanlage sowie der Kalt- und Heißplasmaaktivierung ermittelt und einander gegenübergestellt. Dadurch konnte eine Reihung der unterschiedlichen Verfahren nicht nur hinsichtlich der Effektivität, sondern auch der anfallenden Kosten vorgenommen werden (Abbildung 5-1).

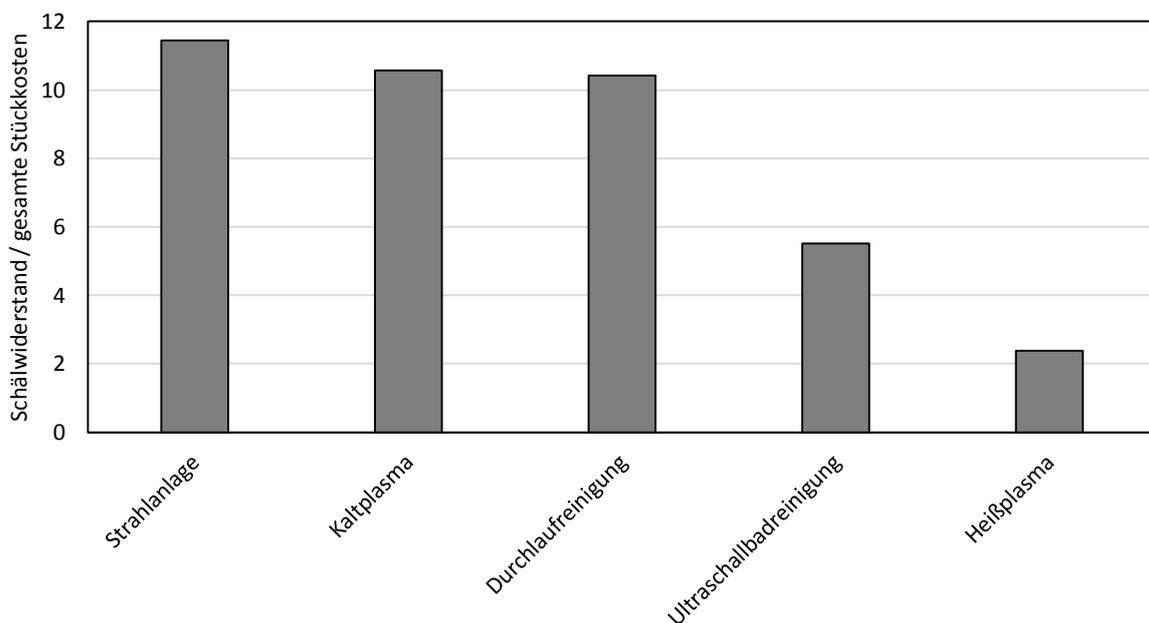


Abbildung 5-1: Reihung der Vorbehandlungsverfahren hinsichtlich des erreichten Schälwiderstandes bezogen auf die gesamten Stückkosten

Abbildung 5-2 stellt die unterschiedlichen Verfahren bezogen auf den Schälwiderstand und die gesamten Stückkosten pro Laufmeter Titanal gegenüber. Dabei zeigt sich, dass das Sandstrahlen nicht nur hinsichtlich der erreichten Haftfestigkeit positiv zu bewerten, sondern auch die Kosten betreffend ein sehr attraktives Vorbehandlungsverfahren ist.

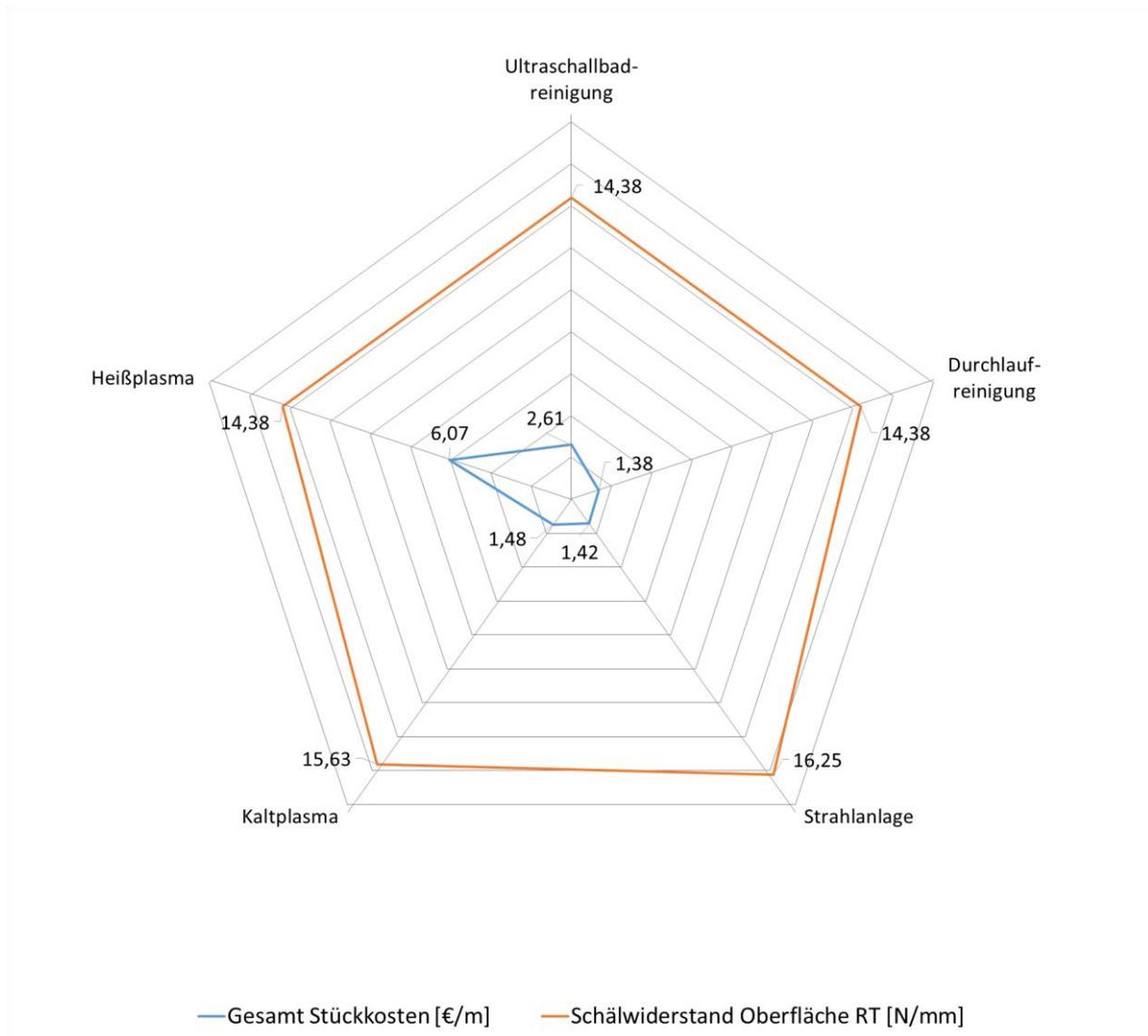


Abbildung 5-2: Gegenüberstellung der gesamten Stückkosten mit dem erreichten Schälwiderstand auf der Oberfläche der Klebproben bei Raumtemperatur mittels der unterschiedlichen Vorbehandlungsverfahren

6 Ausblick

Um eine Aussage über den Einfluss von unterschiedlichen Aktivierungsgasen treffen zu können, wurden gegen Ende der Arbeit hin noch zwei weitere Prozessgase der Fa. Air Liquide getestet. Zum einen wurde ein Argon-Wasserstoff Gemisch (10 % H₂) – INARC H10 – und zum anderen ein Argon-Wasserstoff-Kohlendioxid-Gemisch (5 % H₂ und 0,11 % CO₂) – ARCAL 15 – bei der Aktivierung mittels Heißplasmas getestet, um herauszufinden, ob diese Prozessgase eine bessere Aktivierung nach sich ziehen. Als nachteilig erweist sich allerdings bei beiden Gasen, dass die Kosten deutlich höher als bei Argon, und daher für Serienprodukte eher uninteressant sind. Trotzdem wurden die Aktivierungsversuche mittels der Heißplasmaanlage durchgeführt und die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen ausgewertet und dokumentiert.

Bei der Aktivierung mittels Mischgasen mit erhöhtem Aktivgasanteil ist es wichtig darauf zu achten, dass die Anpassung der Aktivierungsparameter an die jeweilige Aufgabenstellung gewährleistet ist. Aufgrund der hohen Leistungsdichte von Mischgasen mit Aktivgasanteil kann es zu einer ungewollten Zerstörung des Substrates kommen (Abbildung 6-1), weshalb die Anpassung der Prozessparameter außerordentlich wichtig ist.



Abbildung 6-1: Zerstörung des Substrates aufgrund falscher Aktivierungsparameter (zu hoher Energieeintrag)

Die Prozessparameter für die durchgeführten Versuche sind Tabelle 8 zu entnehmen.

Tabelle 8: Prozessparameter IC3 für Mischgase mit Aktivgasanteil

Abstand Düse – Substrat	40 mm
Stromstärke	50 A
Vorschubgeschwindigkeit	1 m/min
Gasdurchfluss	10 l/min

Abbildung 6-2 zeigt die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung 18 Stunden nach der Plasmaaktivierung mit INARC H10 und ARCAL 15 auf *Titanal blank*. Wie auch schon bei Hauptversuchen wurden zur statistischen Auswertung 3 Proben je Aktivierungsgas vermessen. Die Kontaktwinkel zeigen untereinander keine großen Abweichungen voneinander und auch verglichen mit den Kontaktwinkeln, die mit Argon erreicht werden, sind keine wesentlichen Unterschiede ersichtlich.

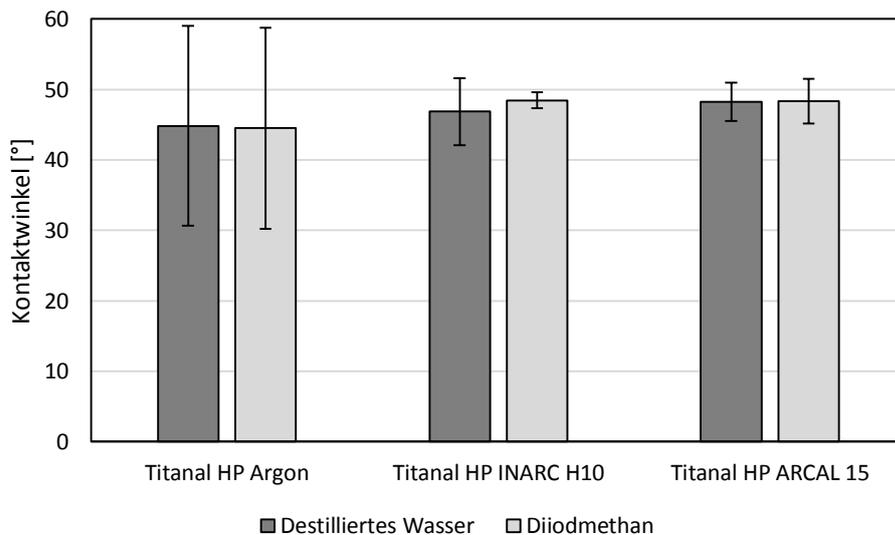


Abbildung 6-2: Kontaktwinkelmessungen mit unterschiedlichen Aktivierungsgasen an Titanal blank

Die Oberflächenenergien (Abbildung 6-3) betreffend werden sowohl bei den beiden Aktivierungsgasen INARC H10 und ARCAL 15, als auch bei Argon Werte um 60 mJ/m² erreicht, wodurch sich hinsichtlich der Oberflächenenergie auch keine Unregelmäßigkeit ergibt.

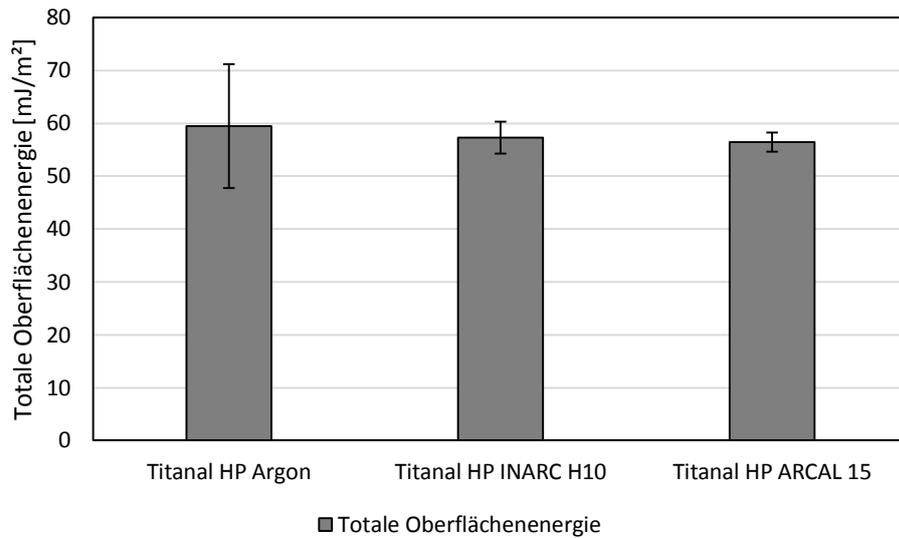


Abbildung 6-3: Totale Oberflächenenergie - aktiviert mit unterschiedlichen Gasen

Um die Auswirkung von Haftschichten auf die Haftfestigkeit zu untersuchen, wurde das Aufbringen von Haftvermittlungsschichten in Auftrag gegeben. Die Auswertung erfolgt mittels abschließenden Klebeversuchen bei Fa. Atomic.

Durch die Ermittlung der zeitlichen Verläufe der Oberflächenenergie und der Erkenntnis, dass die polaren Anteile der Oberflächenenergie über die Zeit absinken, wäre es auf jeden Fall sinnvoll, die Effektivität von Primern und Haftvermittlern zu testen und dadurch die Klebungen einige Tage haltbar zu machen, sollten diese nicht am selben Tag verklebt werden können.

7 Literaturverzeichnis

- [1] W. Brockmann, P. L. Geiß, J. Klingen, und B. Schröder, *Klebtechnik - Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005.
- [2] G. Habenicht, *Kleben - erfolgreich und fehlerfrei*, 6. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2012.
- [3] S. Charaf-Eddine, „Von der Herstellung bis zur Anwendung der Klebstoffe anhand von ausgewählten Beispielen“, Ratingen, 2005.
- [4] Statistisches Bundesamt, „Produktion von Klebstoffen in Deutschland in den Jahren 2002 bis 2015 (in 1.000 Tonnen)“, *Statista*, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/182471/umfrage/produktion-von-klebstoffen-in-deutschland-seit-2002/>. [Zugegriffen: 10-Apr-2017].
- [5] Henkel AG & Co, „Presseinformation - Klebtechnologien im Maschinenbau“, 2015.
- [6] M. Holfeld, „Kunststoffe im Sport“, *Chemie-und-Sport.de*. [Online]. Verfügbar unter: <http://chemie-und-sport.de/flip/kunststoffe/files/assets/common/downloads/publication.pdf>. [Zugegriffen: 17-Feb-2017].
- [7] R. Vallant, *Skriptum zur Vorlesung: Kleben und Löten im Maschinenbau*. Graz: Technische Universität Graz, 2016.
- [8] M. Rasche, *Handbuch Klebtechnik*. München: Hanser, 2012.
- [9] K. Feldmann, V. Schöppner, und G. Spur, Hrsg., *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*, 2. Aufl. München: Hanser, 2014.
- [10] „AMAG - Austria Metall AG“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.amag.at/unser-aluminium/sportartikel-konsumgueter/sportartikel/amag-titanalr.html>. [Zugegriffen: 01-Feb-2017].
- [11] U. Rubasch, „Früher Wintereinbruch lässt Handel und Ski-Industrie wieder hoffen“, *Oberösterreichische Nachrichten*, 2016. [Online]. Verfügbar unter: www.nachrichten.at/nachrichten/wirtschaft/wirtschaftsraumooe/Fruerher-Wintereinbruch-laesst-Handel-und-Ski-Industrie-wieder-hoffen;art467,2399296. [Zugegriffen: 24-März-2017].
- [12] „APA-OTS“. [Online]. Verfügbar unter: http://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20161110_OTS0042/oesterreichische-skiindustrie-weltweite-marktentwicklung-und-vorreiter-bei-produktinnovationen. [Zugegriffen: 24-März-2017].
- [13] „Atomic (Unternehmen)“, *Wikipedia*. [Online]. Verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Atomic_\(Unternehmen\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Atomic_(Unternehmen)). [Zugegriffen: 24-März-2017].
- [14] B. Schörghofer, „In dieser Firma ist immer Winter“, *Salzburger Nachrichten*, S. 1 S., 24-März-2017.
- [15] „Amer Sports Financial Review 2016“, 2016.
- [16] Statista, „Anzahl der verkauften Paar Alpin-Skier nach Skih Herstellern in der Saison 2010/11“. [Online]. Verfügbar unter:

- <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/247749/umfrage/anzahl-der-verkauften-skippaare-nach-hersteller/>. [Zugegriffen: 24-März-2017].
- [17] G. Strobl, „Weltgrößte Skifabrik: Wo Marcel Hirschers Ski gebaut werden“, *der Standard*, 21-März-2017.
- [18] „T-Online“. [Online]. Verfügbar unter: http://www.t-online.de/ratgeber/reisen/reisearten/id_52068370/ski-modelle-die-unterschiede-der-verschiedenen-typen.html. [Zugegriffen: 27-März-2017].
- [19] Snow&Tech, „Skiaufbau“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.ibl.fh-muenster.de/snowwiki/index.php/Kategorie:Skiaufbau>. [Zugegriffen: 27-März-2017].
- [20] N. Werdenigg-Spieß, „Ski ist nicht gleich Ski“, *Kunstpiste - Das Skimagazin mit Kurvengeist*, 2010. [Online]. Verfügbar unter: <http://kunstpiste.com/2010/10/ski-ist-nicht-gleich-ski/>. [Zugegriffen: 27-März-2017].
- [21] K. Hopferwieser, „Materialkunde Ski-Alpin“, *EDUCATION GROUP GMBH*, 2008. [Online]. Verfügbar unter: http://www.eduhi.at/dl/MATERIALKUNDE_Ski_alpin_-_Klaus_Hopferwieser.PDF. [Zugegriffen: 02-Feb-2017].
- [22] „Ski MAGAZIN“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.skimagazin.de/de,de/service-und-wissen/technik-und-material/high-tech-holz-und-handarbeit,article00003877@0.html>. [Zugegriffen: 02-Feb-2017].
- [23] M. Rehbein und T. Huckfeldt, „IF Holz - Institut für Holzqualität und Holzschäden“. [Online]. Verfügbar unter: http://www.ifholz.de/Holz_Information.htm. [Zugegriffen: 30-Apr-2017].
- [24] „Material-Check: Alles, was du über Ski wissen musst!“, *Skimagazin auf Skigebiete-Test.de*, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.skigebiete-test.de/skimagazin/material-check-alles-was-du-ueber-ski-wissen-musst-.htm>. [Zugegriffen: 27-März-2017].
- [25] U. Lohmann, Hrsg., *Holzlexikon*, 4. Aufl. Hamburg: Nikol Verlag, 2003.
- [26] R. Mesle, „Carvingski.info“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.carvingski.info/centix/de/startseite.html>. [Zugegriffen: 01-Feb-2017].
- [27] „Mechanics of Sport“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.mechanicsofsport.com/>. [Zugegriffen: 01-Feb-2017].
- [28] Atomic, „Ski-Technologie“, *Atomic.com*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.atomic.com/de-at/ski-technologie>. [Zugegriffen: 02-Feb-2017].
- [29] ISOSPORT - Innovative Plastic Solutions, „ISOCAP Oberflächen“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.isosport.com/de/kategorien/isocap>. [Zugegriffen: 04-Apr-2017].
- [30] AMAG - Austria Metall AG, „Datenblatt Titanal“ . .
- [31] W. Wörndle, „Alpiner Skilauf“, *Vorarlberg Online*, 2005. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.vol.at/2005/01/AlpinerSkilauf.pdf>. [Zugegriffen: 01-Feb-2017].
- [32] Industrieverband Klebstoffe e.V., „Werkstoffeigenschaften beachten - Aluminiumlegierungen“, *Leitfaden Klebstoffe*. [Online]. Verfügbar unter: http://leitfaden.klebstoffe.com/index.php?section=2_9. [Zugegriffen: 04-Apr-2017].
- [33] G. Habenicht, *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*, 6. Aufl. Berlin:

- Springer-Verlag, 2005.
- [34] C. Waibel, P. Spitzenpfeil, A. Huber, T. Braun, und M. Rieder, „DSV - Deutscher Skiverband“, 2003. [Online]. Verfügbar unter: http://www.dsv-datenzentrale.de/rahmentrainingsplan/44-Biomechanik_Geradeausfahrt-.htm. [Zugegriffen: 01-Feb-2017].
- [35] N. Werdenigg-Spieß, „Flex und Co.“, *Kunstpiste - Das Skimagazin mit Kurvengeist*, 2010. [Online]. Verfügbar unter: <http://kunstpiste.com/2010/10/flex-co/>. [Zugegriffen: 07-Apr-2017].
- [36] N. Werdenigg-Spieß, „Skieigenschaften wirken“, *Kunstpiste - Das Skimagazin mit Kurvengeist*, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <http://kunstpiste.com/2014/10/skieigenschaften/>. [Zugegriffen: 07-Apr-2017].
- [37] H. Hofmann und J. Spindler, *Verfahren in der Beschichtungs- und Oberflächentechnik*, 3. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2015.
- [38] K. Bobzin, *Oberflächentechnik für den Maschinenbau*, 1. Aufl. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013.
- [39] N. Enzinger, *Skriptum zur Vorlesung: Fügetechnik*. Graz: Technische Universität Graz, 2010.
- [40] „IBZ Industrie AG - Kleben, Schleifen, Arbeitsschutz“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.ibzag.ch/de/top/service/downloads/grundlagen-des-klebens.html>. [Zugegriffen: 01-Feb-2017].
- [41] Kruss GmbH - Advancing your Surface Science, „Methode nach Owens, Wendt, Rabel und Kaelble (OWRK)“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kruss.de/de/service/schulung-theorie/glossar/methode-nach-owens-wendt-rabel-und-kaelble-owrk/>. [Zugegriffen: 01-Feb-2017].
- [42] Kruss GmbH - Advancing your Surface Science, „Tropfenkonturanalyse“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kruss.de/de/service/schulung-theorie/glossar/tropfenkonturanalyse/>. [Zugegriffen: 01-Feb-2017].
- [43] Kruss GmbH - Advancing your Surface Science, „Young-Laplace-Fit“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kruss.de/de/service/schulung-theorie/glossar/young-laplace-fit/>. [Zugegriffen: 02-Feb-2017].
- [44] Kruss GmbH - Advancing your Surface Science, „Dispersiver Anteil“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kruss.de/de/service/schulung-theorie/glossar/dispersiver-anteil/>. [Zugegriffen: 02-Dez-2016].
- [45] Kruss GmbH - Advancing your Surface Science, „Polarer Anteil“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kruss.de/de/service/schulung-theorie/glossar/polarer-anteil/>. [Zugegriffen: 02-Dez-2016].
- [46] Industrieverband Klebstoffe e.V., „Leitfaden / Kleben - aber richtig“. [Online]. Verfügbar unter: http://leitfaden.klebstoffe.com/index.php?section=5_5. [Zugegriffen: 16-Nov-2016].
- [47] K. H. Adams, *Oberflächenvorbehandlung: Lackieren, Kleben, Emaillieren*. Weinheim [u.a.]: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1999.
- [48] K.-P. Müller, *Praktische Oberflächentechnik: Vorbehandeln - Beschichten - Prüfen*, 3. Aufl. Braunschweig [u.a.]: Vieweg, 1999.

- [49] Fraunhofer Institut, „Was sind Plasmen und wie wirken sie?“ [Online]. Verfügbar unter: <https://www.igb.fraunhofer.de/de/forschung/kompetenzen/grenzflaechentechnik/plasma-verfahren/wirkung-plasmen.html>. [Zugegriffen: 15-Apr-2017].
- [50] M. Stummer, T. Eichinger, P. Stögmüller, und N. Enzinger, „Improving the Wetting Behaviour of Steel Substrates by Use of Atmospheric Pressure Plasma“, *Int. J. Mech. Eng. Autom.*, Bd. 3, Nr. 12, S. 482–490, 2016.
- [51] J. Bieleman, *Lackadditive*. Weinheim [u.a.]: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1998.
- [52] *Umformen von Aluminium Werkstoffen, Gießen von Aluminium-Teilen, Oberflächenbehandlung von Aluminium, Recycling und Ökologie*, 15. Aufl. Düsseldorf: Aluminium-Zentrale, 1999.
- [53] Inocon Technologie, „PLASMA-Aktivierung und Oberflächenreinigung“.
- [54] C. Brell, J. Brell, und S. Kirsch, *Statistik von Null auf Hundert - Mit Kochrezepten schnell zum Statistik-Grundwissen*, 2. Aufl. Berlin: Springer Spektrum, 2017.
- [55] E. Cramer und U. Kamps, *Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik*, 4. Aufl. Berlin: Springer Spektrum, 2017.
- [56] E. Hering, *Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [57] K. Poggensee, *Investitionsrechnung: Grundlagen - Aufgaben - Lösungen*, 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler, 2015.
- [58] S. Ott, *Investitionsrechnung in der öffentlichen Verwaltung - Die praktische Bewertung von Investitionsvorhaben*, 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2011.
- [59] U. Ermschel, C. Möbius, und H. Wengert, *Investition und Finanzierung*, 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler, 2016.

8 Abkürzungsverzeichnis

PrePreg	Preimpregnated Fibers
PSA	phosphorsäureanodisiert
PA	Polyamid
PE	Polyethylen
UHMW-PE	Ultrahochmolekulargewichtes Polyethylen
REM	Rasterelektronenmikroskop
EDX	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
UB	Ultraschallbad
OWRK	Owens-Wendt-Rabel-Kaelble

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Einteilung der Fügeverfahren nach der Verbindungsbildung [2]	1
Abbildung 1-2: Produktion von Klebstoffen in Deutschland in den Jahren 2002 bis 2015 (in 1.000 Tonnen) [4]	2
Abbildung 2-1: Anzahl der verkauften Paar Alpin-Ski nach Skiherstellern in der Saison 2010/11 [16]	5
Abbildung 2-2: Ski-Bauweisen: a) Injektionsbauweise, b) Torsionsbauweise, c) Sandwichbauweise, d) Schalenbauweise [21]	7
Abbildung 2-3: Querschnitt einer Sandwichkonstruktion mit Seitenwangen [22]	8
Abbildung 2-4: Geradeausfahrt [34]	12
Abbildung 2-5: Schrägfahrt [34]	13
Abbildung 2-6: Druckverteilung [26]	14
Abbildung 2-7: Taillierung [26]	14
Abbildung 2-8: Biegehärtete [26]	14
Abbildung 2-9: Torsionssteifigkeit [26]	15
Abbildung 2-10: Bindungskräfte in einer Klebung [2]	16
Abbildung 2-11: Wechselwirkungskräfte in Grenzflächenschichten und ihre Reichweite [1] ..	17
Abbildung 2-12: Benetzungswinkel von Flüssigkeiten auf Oberflächen [2]	19
Abbildung 2-13: Oberflächen- und Grenzflächenspannung bei Benetzungsvorgängen [38] ..	20
Abbildung 2-14: Liegender Tropfen mit gefitteter Kontur (grüne Kontur) [42]	21
Abbildung 2-15: Ausgleichsgerade - Berechnung der Oberflächenenergie nach OWRK	22
Abbildung 2-16: Verfahren der Oberflächenbehandlung [33]	23
Abbildung 2-17: Zusammenhang zw. Haftfestigkeit und Rauhtiefe [8]	26
Abbildung 3-1: Ablauf der Vorgehensweise bei den experimentellen Untersuchungen	29
Abbildung 3-2: Materialzustände der Proben für die Ursachenfindung der Haftungslöcher ...	30
Abbildung 3-3: Titanal Probenmaterial: a) Titanal blank, b) Titanal PSA	31
Abbildung 3-4: Nicht abgelöste Späne auf Titanal geschliffen	31
Abbildung 3-5: REM Aufnahme 2000-fache Vergrößerung a) Titanal blank, b) Titanal PSA ..	32
Abbildung 3-6: REM Aufnahme 100.000-fache Vergrößerung a) Titanal blank, b) Titanal PSA ..	33
Abbildung 3-7: REM Aufnahme 500-fache Vergrößerung Titanal geschliffen a) ungereinigt, b) Ultraschallbad gereinigt	33
Abbildung 3-8: EDX Spektrum Titanal geschliffen a) ungereinigt, b) Ultraschallbad gereinigt ..	34
Abbildung 3-9: a) organischer Rest, b) Eisenpartikel auf Substrat	34
Abbildung 3-10: Temperaturmessung der Aktivierung mittels MCP	37

Abbildung 3-11: Messaufbau der MCP-Aktivierung (IMAT TU Graz)	38
Abbildung 3-12: Meßaufbau der IC3-Aktivierung (IMAT TU Graz)	39
Abbildung 3-13: Variantenbaum	40
Abbildung 3-14: Kontaktwinkelmessgerät DSA 100	41
Abbildung 3-15: Aufbringen der Tropfen	42
Abbildung 3-16: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen.....	44
Abbildung 3-17: Totale Oberflächenenergie der unterschiedlichen Proben im unbehandelten Zustand und die entsprechende Erhöhung durch Reinigung in %. Basis der Untersuchung ist der jeweilige unbehandelte Zustand der Probe	47
Abbildung 3-18: Zeitlicher Verlauf der Oberflächenenergien über den Zeitraum einer Woche	49
Abbildung 3-19: Anteile der Oberflächenenergie über einen Zeitraum von einer Woche	50
Abbildung 3-20: Übersicht über die Klebproben Titanal	51
Abbildung 3-21: Klebeverbundaufbau.....	52
Abbildung 3-22: In die Presse eingelegte Proben vor dem Pressvorgang.....	53
Abbildung 3-23: a) Eingeschnittene Klebproben, b) Trommel mit Drehmomentschlüssel....	54
Abbildung 3-24: Probenentnahmeplan der Klebproben	54
Abbildung 3-25: Verlauf der Schälkraft über den Schälweg [8]	55
Abbildung 3-26: Schälwiderstand bei Raumtemperatur	56
Abbildung 3-27: Schälwiderstand bei -25°C.....	57
Abbildung 3-28: Schälwiderstand nach der Tauchwasserbehandlung	58
Abbildung 3-29: Bruchfläche <i>Titanal fein geschliffen</i> + UB oberflächenseitig	60
Abbildung 3-30: Bruchfläche <i>Titanal fein geschliffen</i> + UB belagseitig.....	61
Abbildung 3-31: Zusammenhang von Schälwiderstand und Oberflächenenergie bei RT (oberflächenseitig).....	62
Abbildung 3-32: Zusammenhang von Schälwiderstand und Oberflächenenergie bei RT (belagseitig).....	63
Abbildung 4-1: Übersicht der Investitionsverfahren [56].....	64
Abbildung 5-1: Reihung der Vorbehandlungsverfahren hinsichtlich des erreichten Schälwiderstandes bezogen auf die gesamten Stückkosten.....	74
Abbildung 5-2: Gegenüberstellung der gesamten Stückkosten mit dem erreichten Schälwiderstand auf der Oberfläche der Klebproben bei Raumtemperatur mittels der unterschiedlichen Vorbehandlungsverfahren	75
Abbildung 6-1: Zerstörung des Substrates aufgrund falscher Aktivierungsparameter (zu hoher Energieeintrag).....	76
Abbildung 6-2: Kontaktwinkelmessungen mit unterschiedlichen Aktivierungsgasen an Titanal blank	77

Abbildung 6-3: Totale Oberflächenenergie - aktiviert mit unterschiedlichen Gasen.....	78
Abbildung 11-1: Datenblatt Titanal unbehandelt (blank) Seite 1/2	89
Abbildung 11-2: Datenblatt Titanal unbehandelt (blank) Seite 2/2	90
Abbildung 11-3: Datenblatt Titanal phosphorsäureanodisiert Seite 1/2	91
Abbildung 11-4: Datenblatt Titanal phosphorsäureanodisiert Seite 2/2	92
Abbildung 11-5: Datenblatt Araldite AW 1137 Seite 1/2.....	93
Abbildung 11-6: Datenblatt Araldite AW 1137 Seite 2/2.....	94
Abbildung 11-7: Datenblatt Araldite LY 5085 Seite 1/2	95
Abbildung 11-8: Datenblatt Araldite LY 5085 Seite 2/2	96
Abbildung 11-9: EDX Analyse von Titanal blank a) Übersicht, b) EDX Punkt 1, c) EDX Punkt 2, d) EDX Punkt 3, e) EDX Punkt 4, f) EDX Punkt 5	97
Abbildung 11-10: EDX Analyse von Titanal blank Ultraschallbad gereinigt a) Übersicht, b) EDX Punkt 1, c) EDX Punkt 2, d) EDX Punkt 3, e) EDX Punkt 4, f) EDX Punkt 5	98
Abbildung 11-11: Titanal geschliffen Kaltplasma a) Übersicht, b) EDX Punkt 1, c) EDX Punkt 2, d) EDX Punkt 3, e) EDX Punkt 4, f) EDX Punkt 5	99
Abbildung 11-12: Titanal sandgestrahlt a) Übersicht, b) EDX Punkt 1, c) EDX Punkt 2, d) EDX Punkt 3, e) EDX Punkt 4, f) EDX Punkt 5	100
Abbildung 11-13: Titanal geschliffen gebürstet a) Übersicht, b) EDX Punkt 1, c) EDX Punkt 2, d) EDX Punkt 3, e) EDX Punkt 4, f) EDX Punkt 5, g) EDX Punkt 6.....	101
Abbildung 11-14: Titanal sandgestrahlt Atomic a) Übersicht, b) EDX Punkt 1, c) EDX Punkt 2, d) EDX Punkt 3, e) EDX Punkt 4, f) EDX Punkt 5	102
Abbildung 11-15: Bruchfläche <i>Titanal blank Heißplasma</i> – (oben) Oberfläche / (unten) Belag	103
Abbildung 11-16: Bruchfläche <i>Titanal blank gereinigt</i> – (oben) Oberfläche / (unten) Belag.....	104
Abbildung 11-17: Bruchfläche <i>Titanal geschliffen gereinigt</i> – (oben) Oberfläche / (unten) Belag.....	105
Abbildung 11-18: Bruchfläche <i>Titanal gestrahlt gereinigt</i> – (oben) Oberfläche / (unten) Belag	106
Abbildung 11-19: Bruchfläche <i>Titanal PSA</i> – (oben) Oberfläche / (unten) Belag.....	107
Abbildung 11-20: Bruchfläche <i>Titanal geschliffen Kaltplasma</i> – (oben) Oberfläche / (unten) Belag.....	108
Abbildung 11-21: Bruchfläche <i>Titanal geschliffen Heißplasma</i> – (oben) Oberfläche / (unten) Belag.....	109
Abbildung 11-22: Bruchfläche <i>Titanal blank</i> – (oben) Oberfläche / (unten) Belag	110
Abbildung 11-23: Bruchfläche <i>Titanal geschliffen abgezogen gereinigt</i> – (oben) Oberfläche / (unten) Belag.....	111

Abbildung 11-24: Zusammenhang von Schälwiderstand und Oberflächenenergie -25°C – (oben) Oberfläche / (unten) Belag	112
Abbildung 11-25: Zusammenhang von Schälwiderstand und Oberflächenenergie Tauchwasser – (oben) Oberfläche / (unten) Belag	113

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Nominalzusammensetzung in Massen-% [31].....	11
Tabelle 2: Prozessparameter MCP	38
Tabelle 3: Prozessparameter IC3	39
Tabelle 4: Benetzungsflüssigkeiten	42
Tabelle 5: Beispiel einer Kostenvergleichsrechnung für zwei Alternativen [59]	66
Tabelle 6: Richtpreise des Werkstoffes Titanal	67
Tabelle 7: Kosten-Gegenüberstellung aller Verfahren	72
Tabelle 8: Prozessparameter IC3 für Mischgase mit Aktivgasanteil.....	77

11 Anhang

Anhang A

		AMAG rolling			
Datenblatt		TITANAL®			
Unbehandelt, (AlZn7MgCuZr)					
Unter der Bezeichnung Titanal® liefern wir Bänder und Zuschnitte aus einer hochfesten, wärmehärtbaren Aluminium-Knetlegierung. Typische Anwendungsfälle dieser Legierung sind tragende Elemente im Skibau, insbesondere für Ober- und Untergurte, für Ski- und Snowboardbindungsteile, Zahnkränze, Kettanräder und Teile für den Maschinenbau.					
Nominalzusammensetzung in % der Masse (Gew.%)					
Al %	Cu %	Mg %	Zn %	Zr %	
~98,5	~1,7	~2,5	~7	~0,1	
Mechanische Festigkeitswerte (parallel zu Walzrichtung)					
Zustand	Dicke (mm)	Zugfestigkeit <i>R_m</i> (MPa)	0,2-Dehngrenze <i>R_{p0,2}</i> (MPa)	Bruchdehnung <i>A5</i> (%) / <i>A50</i> (%)	
Wärmegehärtet					
T8	0,4 - 0,6	ca. 630	≥ 580	≥ 12	
T6	0,7 - 1,2	ca. 650	≥ 600	≥ 12	
Gereckt					
T651	5,5 - 7,5	min. 560	min. 520	≥ 8	
Überaltert					
T7	0,4 - 0,6	ca. 600	540 - 580	≥ 12	
T7	0,7 - 1,2	ca. 630	580 - 620	≥ 12	
Weich					
O	1,2 - 3,0	max. 210	max. 115	≥ 20	
Wärmebehandlung beim Kunden vom Ausgangszustand O					
T6	1,2 - 3,0	ca. 560	≥ 520	≥ 8	
Das Titanal® im Zustand weich erreicht durch eine Wärmebehandlung auf den Zustand T6 (erfolgt beim Kunden) die oben angeführten mechanischen Kennwerte.					
Technisch-physikalische Eigenschaften					
Dichte	Mittlerer linearer		Elastizitätsmodul		
g/cm ³	Wärmeausdehnungskoeffizient		MPa		
	20 bis 100°C in cm/cm°C				
2,82	23·10 ⁻⁵		ca. 72000		
Ausführung					
a) TITANAL® – Zustand T6 und T7					
	Ringe (B < 50 mm)	Bänder		Streifen (< 310mm)	Bleche
Dicke D [mm]	0,4 - 1,2	0,4 - 1,2		0,4 - 1,2	0,4 - 1,2
Breite B [mm]	20 - 50	50 - 1200		10 - 310	310 - 1150
Länge L [mm]	--	--		Max. 2430	max. 9000
Innendurchmesser [mm]	400 / 500	400	500 / 600	--	--
Außendurchmesser [mm]	max. 1300	max. 1550	max. 1900	--	--

Abbildung 11-1: Datenblatt Titanal unbehandelt (blank) Seite 1/2

Datenblatt **TITANAL**

Unbehandelt, (AlZn7MgCuZr)

Ausführung				
b) TITANAL® – Zustand weich (O)				
	Ringe (B < 50mm)	Bänder		Bleche
				(< 310mm)
Dicke D [mm]	1.2 – 3.0	1.2 – 3.0		1.2 – 3.0
Breite B [mm]	20 – 50	50 – 1150		untere Grenze nach Vereinbarung max. 2430
Länge L [mm]	--	--		max. 4400
Innendurchmesser [mm]	400 / 500	400	500 / 600	--
Außendurchmesser [mm]	Max. 1300	max. 1550	max. 1900	--
Toleranzen – Zustand T6 und T7				
	Dicke [mm]	Breite [mm]	Länge [mm]	
Bänder, Ringe (<50 mm)	+ / -0.03	+0.8 / -0.0	--	
Streifen (< 310mm)	+ / -0.03	+1.0 / -0.0	+3.0 / -0.0	
Bleche	+ / -0.03	nach Vereinbarung	+3.0 / -0.0	

Andere Abmessungen bzw. zusätzliche Toleranzsprüche nach Vereinbarung.
 Dickentoleranzen für den Zustand weich sind abhängig von der Enddicke.



Oberfläche
 Beidseitig matt gewalzt. Die Dicke 0.40 bis 1.20 mm kann auch oberflächenvorbehandelt (durch phosphorsäureanodisieren) geliefert werden. Als Ausführungen stehen Bänder oder Streifen mit einer Breite von 10 mm (in Streifenform) bzw. 20 mm (in Bandform) bis 310 mm zur Verfügung. Anwendungszweck der oberflächenbehandelten Teile ist das direkte Verkleben. Bei Interesse fordern Sie bitte das Datenblatt TITANAL® phosphorsäureanodisiert an! Wann immer ein anderer Einsatz als oben angeführt für diese Legierung beabsichtigt wird und falls dabei bestimmte Eigenschaften gefordert werden, wird dem Anwender nachdrücklich empfohlen, mit uns zwecks geeigneter Auswahl des Werkstoffes Rücksprache zu nehmen.

Abbildung 11-2: Datenblatt Titanal unbehandelt (blank) Seite 2/2

Datenblatt **TITANAL[®]**

Phosphorsäureanodisiert, (AlZn7MgCuZr)

Unter der Bezeichnung "TITANAL[®], phosphorsäureanodisiert" liefern wir Bänder und Streifen aus einer hochfesten, warmverformbaren Aluminium-Knetlegierung mit vorbehandelter Oberfläche zur Verwendung im Ski-, Skateboard- und Snowboardbau, insbesondere als tragende Elemente für Ober- und Untergurte.

Mechanische Festigkeitswerte (parallel zur Walzrichtung)					
Zustand	Dicke (mm)	Zugfestigkeit R _m (MPa)	0,2-Dehngrenze R _{p0.2} (MPa)	Bruchdehnung A ₅ (%)	Brinellhärte HBW _{2,5/62,5}
T6	0,4 – 0,6	ca. 630	≥ 560	≥ 12	ca. 172
T7	0,4 – 0,6	ca. 600	540 – 580	≥ 12	
T6	0,7 – 1,2	ca. 650	≥ 600	≥ 12	ca. 174
T7	0,7 – 1,2	ca. 630	580 – 620	≥ 12	

Kerbzugfestigkeit nach internem Prüfstandard = ca. 450 MPa

Verlebbarkait

Geprüft werden Probeverklebungen (Phosphorsäureanodierschicht gegen Phosphorsäureanodierschicht) mit Versteifung im Trommelschälversuch nach DIN 53 295, Klebefläche 50 x 250 mm

Klebstoff: AW 1137, Härter HY5049 von CIBA, Mischungsverhältnis = 100:30.

Klebeauftrag = 100 g/m², Aushärtung bei 100°C/20 min, 3,8 bar = 283 kp

Verklebung: Mittleres Schälmoment gegen TITANAL[®] mind. 20 Nm/mm

Technisch-physikalische Eigenschaften

Dichte g/cm ³	Mittlerer lin. Wärmeausdehnungskoeffizient 20 bis 100°C in cm/cm°C	Elastizitätsmodul MPa
2,82	23 · 10 ⁻⁶	ca. 72000

Ausführung

	Ringe (< 50 mm)	Bänder	Streifen (< 310mm)
Dicke [mm]	0,4 – 1,2	0,4 – 1,2	0,4 – 1,2
Breite [mm]	20 – 50	50 – 310	10 – 310
Länge [mm]	–	–	max. 2430
Innendurchmesser [mm]	400 / 500	500	–
Außendurchmesser [mm]	max. 1300	max. 1300	–

Toleranzen

	Dicke [mm]	Breite [mm]	Länge [mm]
Bänder, Ringe (< 50 mm)	+/- 0,03	+0,8 / -0,0	–
Streifen (< 310 mm)	+/- 0,03	+1,0 / -0,0	+3,0 / -0,0
Bleche	+/- 0,03	nach Vereinbarung	+3,0 / -0,0

Abbildung 11-3: Datenblatt Titanal phosphorsäureanodisiert Seite 1/2

Datenblatt **TITANAL[®]**

Phosphorsäureanodisiert, (AlZn7MgCuZr)

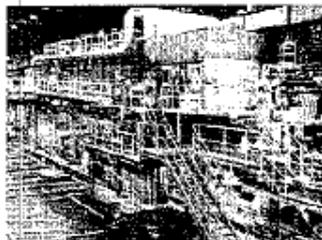
Toleranzen und andere Abmessungen nach Vereinbarung.

Wann immer ein anderer Einsatz als oben angeführt für diese Legierung beabsichtigt wird, wird dem Anwender empfohlen mit uns Rücksprache zu halten.

Allgemeines

Das Phosphorsäureanodisieren dient zur Oberflächenvorbereitung für Dauerverklebungen und wird mit Erfolg im Flugzeug- und Skibau eingesetzt. An das dekorative Aussehen können keine Anforderungen gestellt werden.

Phosphorsäureanodisierschichten sind sehr dünn und weisen aufgrund ihrer offenporigen Struktur eine sehr gute Verklebbarkeit (Epoxi- u. Phenolharzklebstoffe) auf. Sie enthalten keine organischen Bestandteile, sind umweltfreundlich und gut lagerfähig.



Lagerfähigkeit

TITANAL[®], phosphorsäureanodisiert wird ohne Papierzwischenlagen mit SILIKAGEL (Trocknungsmittel) in Kunststoffolie eingeschweißt angeliefert. Die Lagerung hat mit entsprechender Sorgfalt, aluminiumgerecht bei Raumtemperatur in staubfreier und trockener Atmosphäre zu erfolgen. Vor Entnahme der Ware aus der Verpackung ist zu achten, dass sich diese der Umgebungstemperatur angepasst hat. Auf die Gefahr von Schwitzwasserbildung wird hingewiesen, wenn kalte Ware in feuchtwarme Räume gebracht wird. Durch Schwitzwasser kann sich die Oberfläche verfärben und die Klebehaftung darunter leiden. Bei längerer Lagerung als 6 Monate, kann die Oberfläche beeinträchtigt werden.

Weiterverarbeitung

Die sehr dünnen Schichten ($\leq 0,1 \mu\text{m}$) sind empfindlich gegen mechanische Beschädigungen. Die Oberflächen müssen von Verunreinigungen, insbesondere von Staub, Fingerabdrücken (saubere Lederhandschuhe verwenden), Fett und Schmiermitteln, sowie von Trennmitteln (silikonisierte Papiere, Formen-Trennmittel) und Feuchtigkeit freigehalten werden. Kopierfräsen, Stanzan ist problemlos möglich, jedoch darf kein Schmiermittel verwendet werden. Unter Berücksichtigung dieser Voraussetzungen können auch Umformungen durchgeführt werden.

Verhalten bei thermischer Belastung

TITANAL[®], phosphorsäureanodisiert kann bei der üblichen Temperatur (bis $\sim 140^\circ\text{C}$) verklebt werden. Höhere Temperaturen führen je nach Zeit zu Festigkeitsverlusten. Dazu können wir Entfestigungskurven zur Verfügung stellen. Bei eisfälliger Kaschierung oder Lackbeschichtung der Oberfläche ist der Erhalt der Verklebbarkeit der freiliegenden Oberfläche zu überprüfen.

Diese Angaben gelten als Richtlinie. Der Anwender muß zusätzlich seine eigenen Fertigungsbedingungen berücksichtigen. Weiters muß der Verarbeiter die Voraussetzung schaffen, dass das ausgewählte Material für den Anwendungszweck geeignet ist.

Abbildung 11-4: Datenblatt Titanal phosphorsäureanodisiert Seite 2/2

Anhang B

Epoxy adhesive systems based on Araldite AW 1136 / Araldite AW 1137 / Aradur 5049-1

Advanced Materials

HUNTSMAN

Structural Composites

MATRIX SYSTEMS FOR RECREATIONAL COMPOSITES

DATA SHEET

Epoxy adhesive systems based on Araldite® AW 1136 * / Araldite® AW 1137 * / Aradur® 5049-1*

Araldite AW 1136 is an epoxy resin
Araldite AW 1137 is an epoxy resin
Aradur 5049-1 is a hardener based on polyamide

Applications	<ul style="list-style-type: none"> Recreational composites Adhesives 																																																						
Properties	Good adhesive for sky industry																																																						
Processing	<ul style="list-style-type: none"> Adhesive Wet lay-up 																																																						
Key data	<table border="1"> <tr> <td colspan="3">Araldite AW 1136</td> </tr> <tr> <td>Aspect (visual)</td> <td>black paste</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)</td> <td>23000 - 40000</td> <td>[mPa s]</td> </tr> <tr> <td>Density at 25 °C (ISO 1675)</td> <td>1.2 - 1.3</td> <td>[g/cm³]</td> </tr> <tr> <td>Flash point (ISO 2719)</td> <td>195</td> <td>[°C]</td> </tr> <tr> <td>Storage temperature (see expiry date on original container)</td> <td>2 - 40</td> <td>[°C]</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Araldite AW 1137</td> </tr> <tr> <td>Aspect (visual)</td> <td>gray paste</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)</td> <td>23000 - 40000</td> <td>[mPa s]</td> </tr> <tr> <td>Density at 25 °C (ISO 1675)</td> <td>1.2 - 1.3</td> <td>[g/cm³]</td> </tr> <tr> <td>Flash point (ISO 2719)</td> <td>195</td> <td>[°C]</td> </tr> <tr> <td>Storage temperature (see expiry date on original container)</td> <td>2 - 40</td> <td>[°C]</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Aradur 5049-1</td> </tr> <tr> <td>Aspect (visual)</td> <td>yellow to brown liquid</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)</td> <td>800 - 1200</td> <td>[mPa s]</td> </tr> <tr> <td>Density at 25 °C (ISO 1675)</td> <td>0.9 - 1.0</td> <td>[g/cm³]</td> </tr> <tr> <td>Flash point (ISO 2719)</td> <td>119</td> <td>[°C]</td> </tr> <tr> <td>Storage temperature (see expiry date on original container)</td> <td>2 - 40</td> <td>[°C]</td> </tr> </table>	Araldite AW 1136			Aspect (visual)	black paste		Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	23000 - 40000	[mPa s]	Density at 25 °C (ISO 1675)	1.2 - 1.3	[g/cm ³]	Flash point (ISO 2719)	195	[°C]	Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]	Araldite AW 1137			Aspect (visual)	gray paste		Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	23000 - 40000	[mPa s]	Density at 25 °C (ISO 1675)	1.2 - 1.3	[g/cm ³]	Flash point (ISO 2719)	195	[°C]	Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]	Aradur 5049-1			Aspect (visual)	yellow to brown liquid		Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	800 - 1200	[mPa s]	Density at 25 °C (ISO 1675)	0.9 - 1.0	[g/cm ³]	Flash point (ISO 2719)	119	[°C]	Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]
Araldite AW 1136																																																							
Aspect (visual)	black paste																																																						
Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	23000 - 40000	[mPa s]																																																					
Density at 25 °C (ISO 1675)	1.2 - 1.3	[g/cm ³]																																																					
Flash point (ISO 2719)	195	[°C]																																																					
Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]																																																					
Araldite AW 1137																																																							
Aspect (visual)	gray paste																																																						
Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	23000 - 40000	[mPa s]																																																					
Density at 25 °C (ISO 1675)	1.2 - 1.3	[g/cm ³]																																																					
Flash point (ISO 2719)	195	[°C]																																																					
Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]																																																					
Aradur 5049-1																																																							
Aspect (visual)	yellow to brown liquid																																																						
Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	800 - 1200	[mPa s]																																																					
Density at 25 °C (ISO 1675)	0.9 - 1.0	[g/cm ³]																																																					
Flash point (ISO 2719)	119	[°C]																																																					
Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]																																																					
Storage	<p>Provided that the products described above are stored in a dry place in their original, properly closed containers at the above mentioned storage temperatures they will have the shelf lives indicated on the labels.</p> <p>Partly emptied containers should be closed immediately after use.</p>																																																						

* In addition to the brand name product denomination may show different appendices, which allows us to differentiate between our production sites: e.g. BD = Germany, US = United States, IN = India, CI = China, etc. These appendices are in use on packaging, transport and invoicing documents. Generally the same specifications apply for all versions. Please address any additional need for clarification to the appropriate Huntsman contact.

March 2004

Epoxy adhesive systems based on Araldite AW 1136 SP / Araldite AW 1137 SP / Aradur 5049-1

Processing data

Mix ratio	Components	Parts by weight	Parts by volume
	Araldite AW 1136 or Araldite AW 1137	100	100
	Aradur 5049-1	30	40

We recommend that the components are weighed with an accurate balance to prevent mixing inaccuracies which can affect the properties of the matrix system. The components should be mixed thoroughly to ensure homogeneity. It is important that the side and the bottom of the vessel are incorporated into the mixing process.

When processing large quantities of mixture the pot life will decrease due to exothermic reaction. It is advisable to divide large mixes into several smaller containers.

Initial mix viscosity (Hoeppler, ISO 12058-1)	[°C]	[mPa s]
	at 25	5000 - 7000

Pot life (Tecam, 200 ml, 85 % RH)	[°C]	[min]
	at 23	70 - 80

Gel time (Hot plate)	[°C]	[min]
	at 60	18 - 24
	at 70	10 - 14
	at 80	6 - 9
	at 90	3 - 6
	at 100	2 - 4
	at 110	1.5 - 2.5
	at 120	1 - 2

The values shown are for small amounts of pure resin/hardener mix. In composite structures the gel time can differ significantly from the given values depending on the fibre content and the laminate thickness.

Gelation at 23 °C (in thin layers: 0.4 - 0.7 mm)		[h]
	Start	3 - 4
	End	4.5 - 5.5

Typical cure cycles	
	60 - 90 min 60 °C
	or 20 - 35 min 80 °C
	or 7 - 16 min 100 °C
	or 3.5 - 9 min 120 °C

The optimum cure cycle has to be determined case by case depending on the processing and the economic requirements.

Advanced Materials

Araldite® LY 5085* / Aradur® 5049-1 CH*

Araldite® LY 5085 is a low viscosity epoxy resin
 Aradur® 5049-1 is a hardener mixture of polyamines

APPLICATIONS	<ul style="list-style-type: none"> Recreational composites Structural composites 																																							
PROPERTIES	Easy-to-handle laminating system for the production of advanced composites lay-up by wet process.																																							
PROCESSING	<ul style="list-style-type: none"> Wet lay-up 																																							
KEY DATA	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Araldite® LY 5085</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Aspect (visual)</td> <td>Clear liquid</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Colour (Gardner, ISO 4630)</td> <td>≤ 3</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)</td> <td>7000 - 9000</td> <td>[mPa s]</td> </tr> <tr> <td>Density at 25 °C (ISO 1675)</td> <td>1.15-1.20</td> <td>[g/cm³]</td> </tr> <tr> <td>Flash point (ISO 2719)</td> <td>> 200</td> <td>[°C]</td> </tr> <tr> <td>Storage temperature (see expiry date on original container)</td> <td>2 - 40</td> <td>[°C]</td> </tr> <tr> <th colspan="3">Aradur® 5049-1</th> </tr> <tr> <td>Aspect (visual)</td> <td>Yellow to brown liquid</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)</td> <td>800 - 1200</td> <td>[mPa s]</td> </tr> <tr> <td>Density at 25 °C (ISO 1675)</td> <td>0.90-1.0</td> <td>[g/cm³]</td> </tr> <tr> <td>Flash point (ISO 2719)</td> <td>115</td> <td>[°C]</td> </tr> <tr> <td>Storage temperature (see expiry date on original container)</td> <td>2 - 40</td> <td>[°C]</td> </tr> </tbody> </table>	Araldite® LY 5085			Aspect (visual)	Clear liquid		Colour (Gardner, ISO 4630)	≤ 3		Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	7000 - 9000	[mPa s]	Density at 25 °C (ISO 1675)	1.15-1.20	[g/cm ³]	Flash point (ISO 2719)	> 200	[°C]	Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]	Aradur® 5049-1			Aspect (visual)	Yellow to brown liquid		Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	800 - 1200	[mPa s]	Density at 25 °C (ISO 1675)	0.90-1.0	[g/cm ³]	Flash point (ISO 2719)	115	[°C]	Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]
Araldite® LY 5085																																								
Aspect (visual)	Clear liquid																																							
Colour (Gardner, ISO 4630)	≤ 3																																							
Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	7000 - 9000	[mPa s]																																						
Density at 25 °C (ISO 1675)	1.15-1.20	[g/cm ³]																																						
Flash point (ISO 2719)	> 200	[°C]																																						
Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]																																						
Aradur® 5049-1																																								
Aspect (visual)	Yellow to brown liquid																																							
Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	800 - 1200	[mPa s]																																						
Density at 25 °C (ISO 1675)	0.90-1.0	[g/cm ³]																																						
Flash point (ISO 2719)	115	[°C]																																						
Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]																																						
STORAGE	<p>Provided that the products described above are stored in a dry place in their original, properly closed containers at the above mentioned storage temperatures they will have the shelf lives indicated on the labels.</p> <p>Partly emptied containers should be closed immediately after use.</p> <p>Araldite® LY 5085 which has crystallized and looks cloudy can be restored to its original state by heating to 60 - 80 °C.</p>																																							

In addition to the brand name product denomination may show different appendices, which allows us to differentiate between our production sites: e.g., BD = Germany, US = United States, IN = India, CI = China, etc.. These appendices are in use on packaging, transport and Invoicing documents. Generally the same specifications apply for all versions. Please address any additional need for clarification to the appropriate Huntsman contact.

Abbildung 11-7: Datenblatt Araldite LY 5085 Seite 1/2

HUNTSMAN

Enriching lives through innovation

PROCESSING DATA			
MIX RATIO	<i>Components</i>	<i>Parts by weight</i>	<i>Parts by volume</i>
	Araldite® LY 5085	100	100
	Aradur® 5049-1	44	52
<p>We recommend that the components are weighed with an accurate balance to prevent mixing inaccuracies which can affect the properties of the matrix system. The components should be mixed thoroughly to ensure homogeneity. It is important that the side and the bottom of the vessel are incorporated into the mixing process.</p> <p>When processing large quantities of mixture the pot life will decrease due to exothermic reaction. It is advisable to divide large mixes into several smaller containers.</p>			
INITIAL MIX VISCOSITY (HOEPLER, ISO 12058-1B)		<i>[°C]</i> at 25	<i>[mPa s]</i> 2300 – 2800
POT LIFE (TECAM, 200 GR, 65 % RH)		<i>[°C]</i> at 25	<i>[min]</i> 70 – 90
GEL TIME (HOT PLATE)		<i>[°C]</i> at 60 at 80 at 100	<i>[min]</i> 22 - 28 6 - 10 2 - 5
<p>The values shown are for small amounts of pure resin/hardener mix. In composite structures the gel time can differ significantly from the given values depending on the fibre content and the laminate thickness.</p>			
TYPICAL CURE CYCLES	15 – 19 min at 80°C or 7 – 9 min at 100°C or 5 – 7 min at 120°C		
<p>The optimum cure cycle has to be determined case by case depending on the processing and the economic requirements.</p>			

Abbildung 11-8: Datenblatt Araldite LY 5085 Seite 2/2

Anhang C

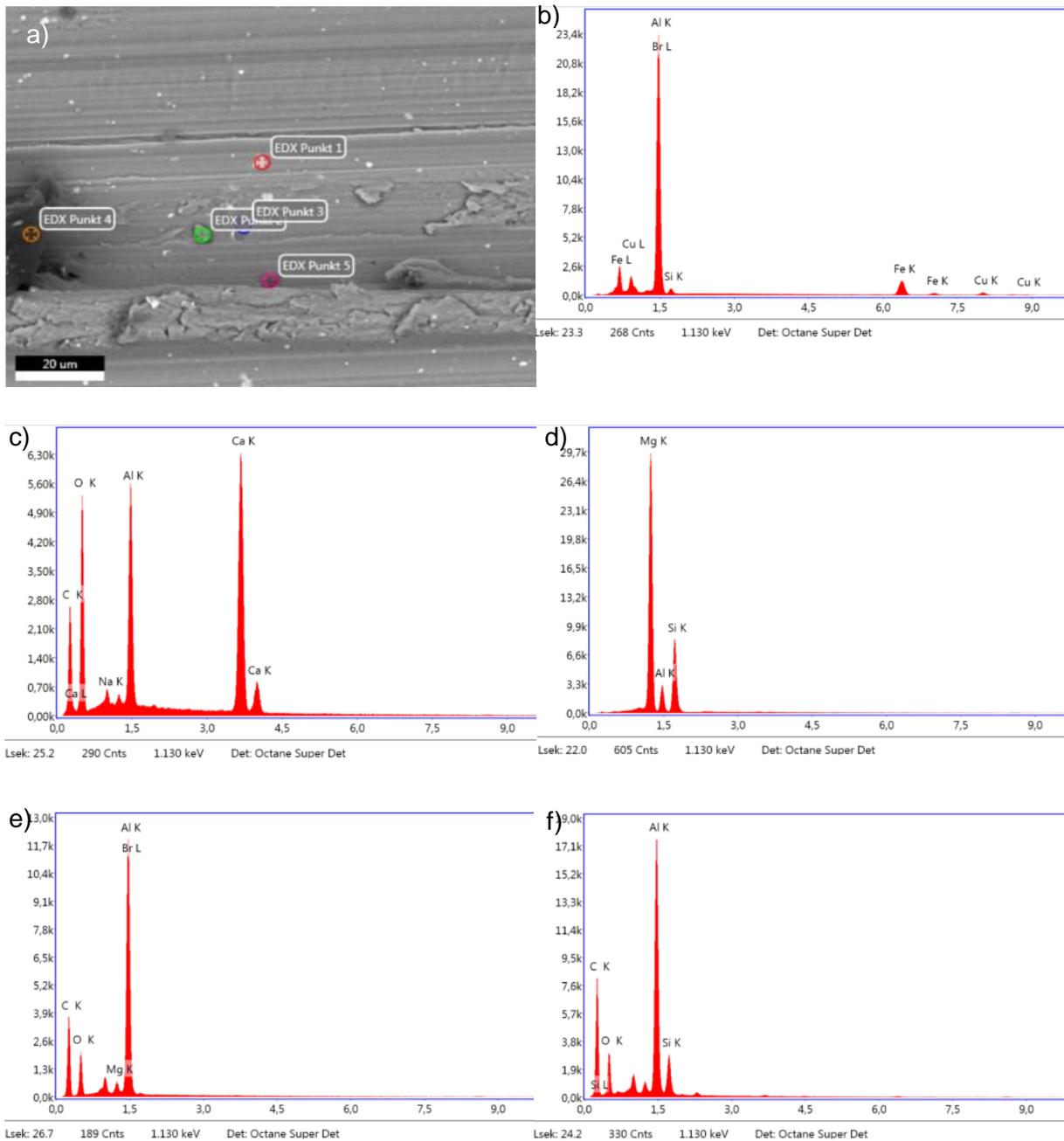


Abbildung 11-9: EDX Analyse von Titanal blank a) Übersicht, b) EDX Punkt 1, c) EDX Punkt 2, d) EDX Punkt 3, e) EDX Punkt 4, f) EDX Punkt 5

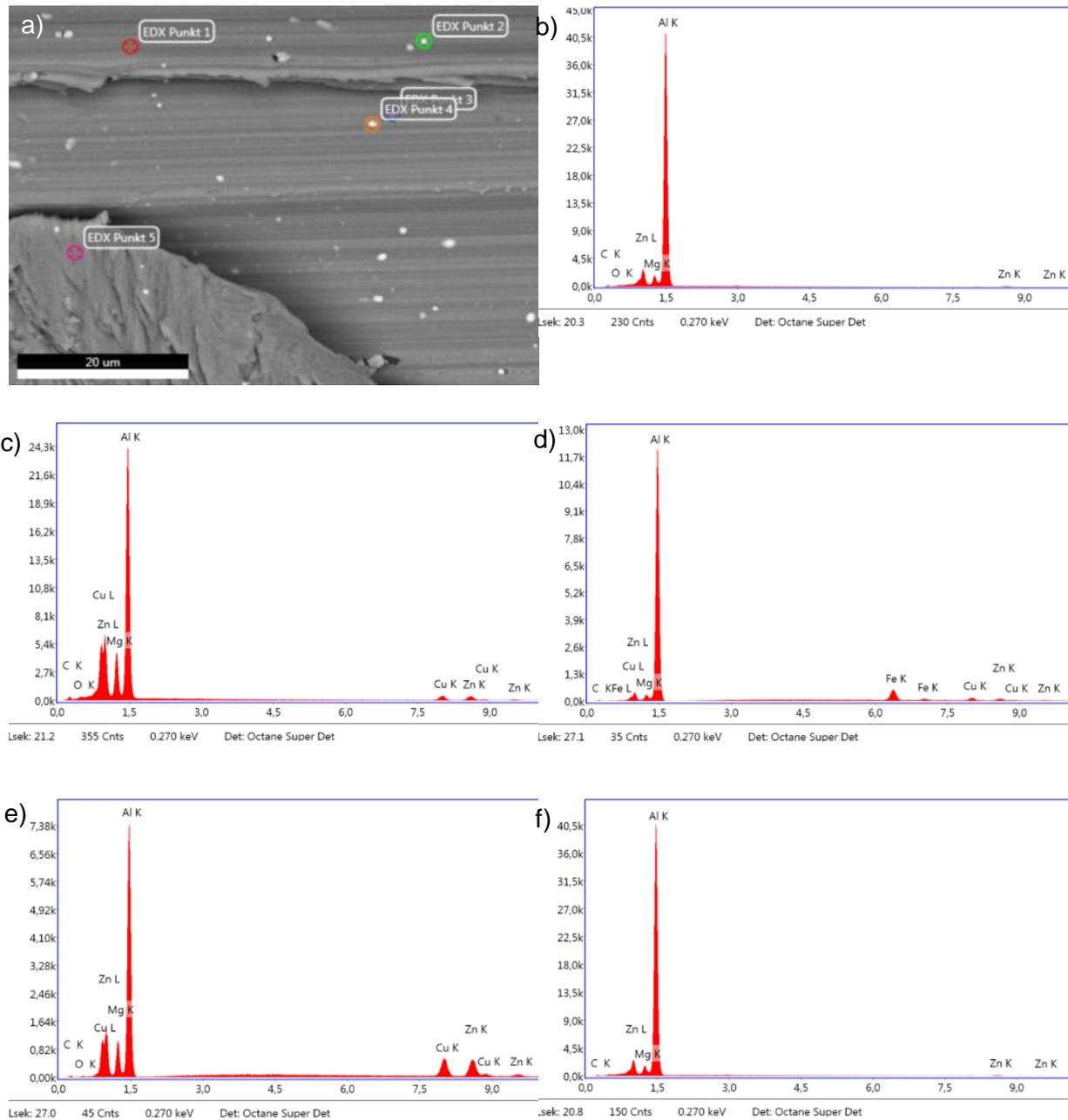


Abbildung 11-10: EDX Analyse von Titanal blank Ultraschallbad gereinigt a) Übersicht, b) EDX Punkt 1, c) EDX Punkt 2, d) EDX Punkt 3, e) EDX Punkt 4, f) EDX Punkt 5

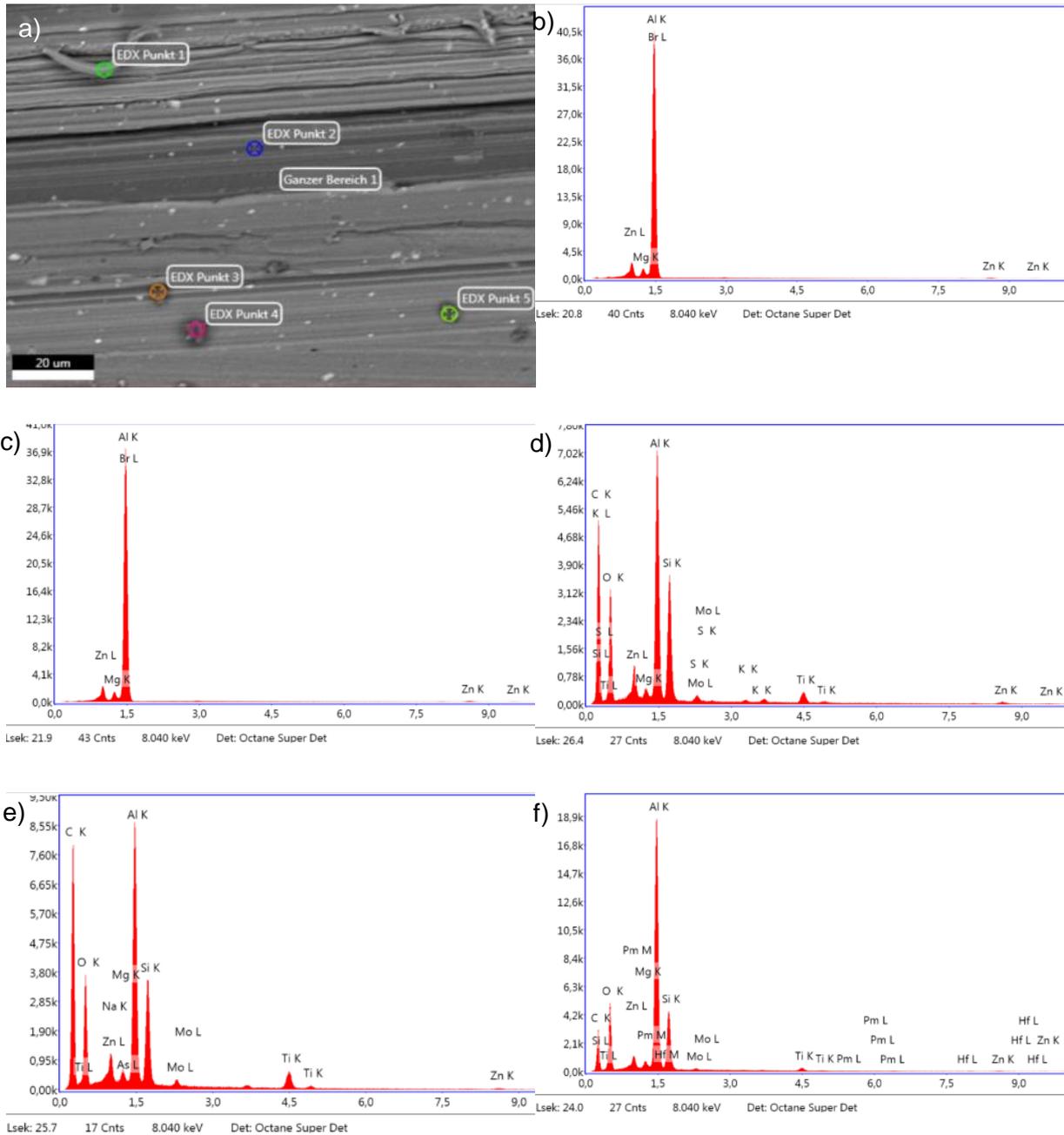


Abbildung 11-11: Titanal geschliffen Kaltplasma a) Übersicht, b) EDX Punkt 1, c) EDX Punkt 2, d) EDX Punkt 3, e) EDX Punkt 4, f) EDX Punkt 5

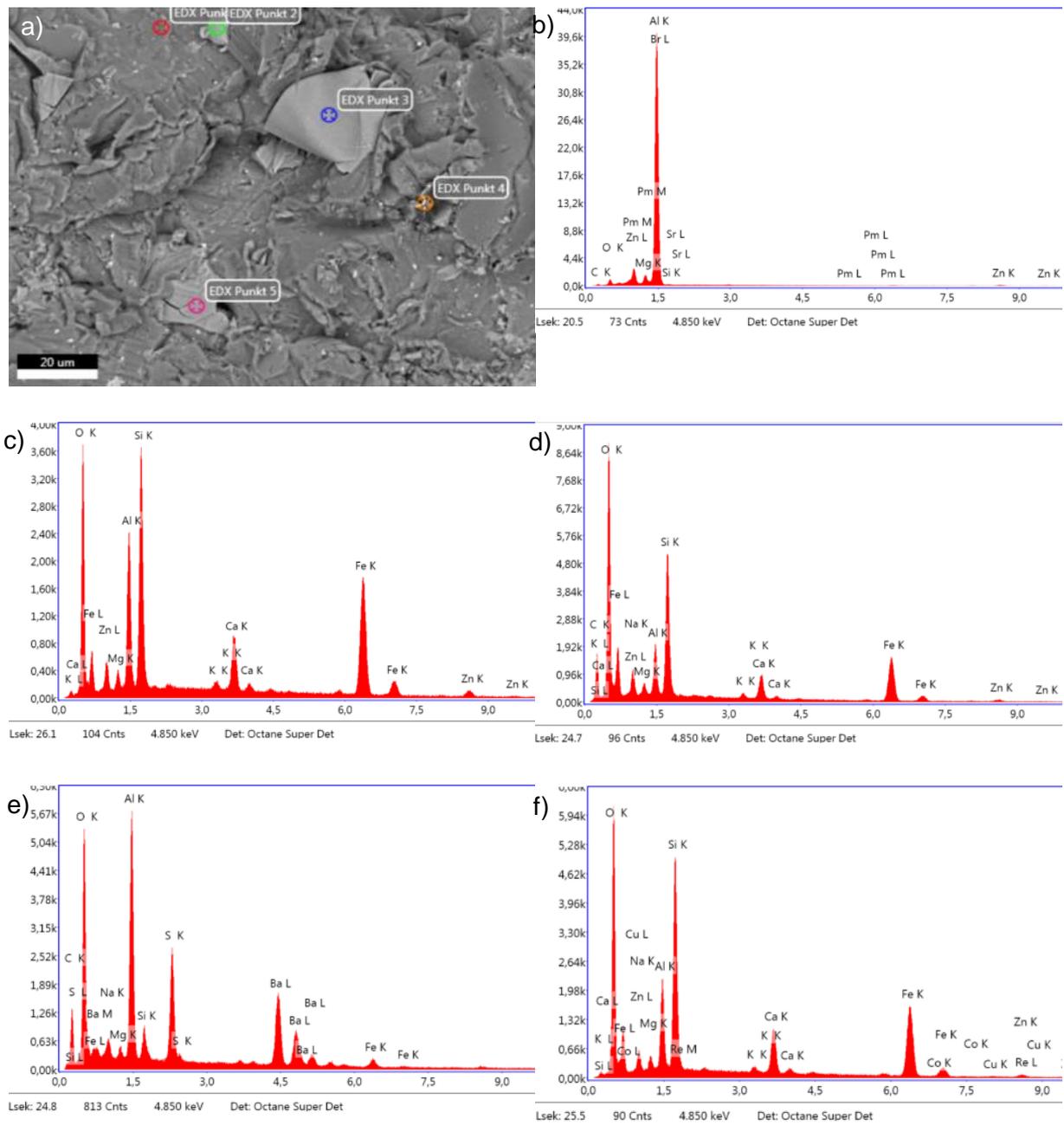


Abbildung 11-12: Titanal sandgestrahlt a) Übersicht, b) EDX Punkt 1, c) EDX Punkt 2, d) EDX Punkt 3, e) EDX Punkt 4, f) EDX Punkt 5

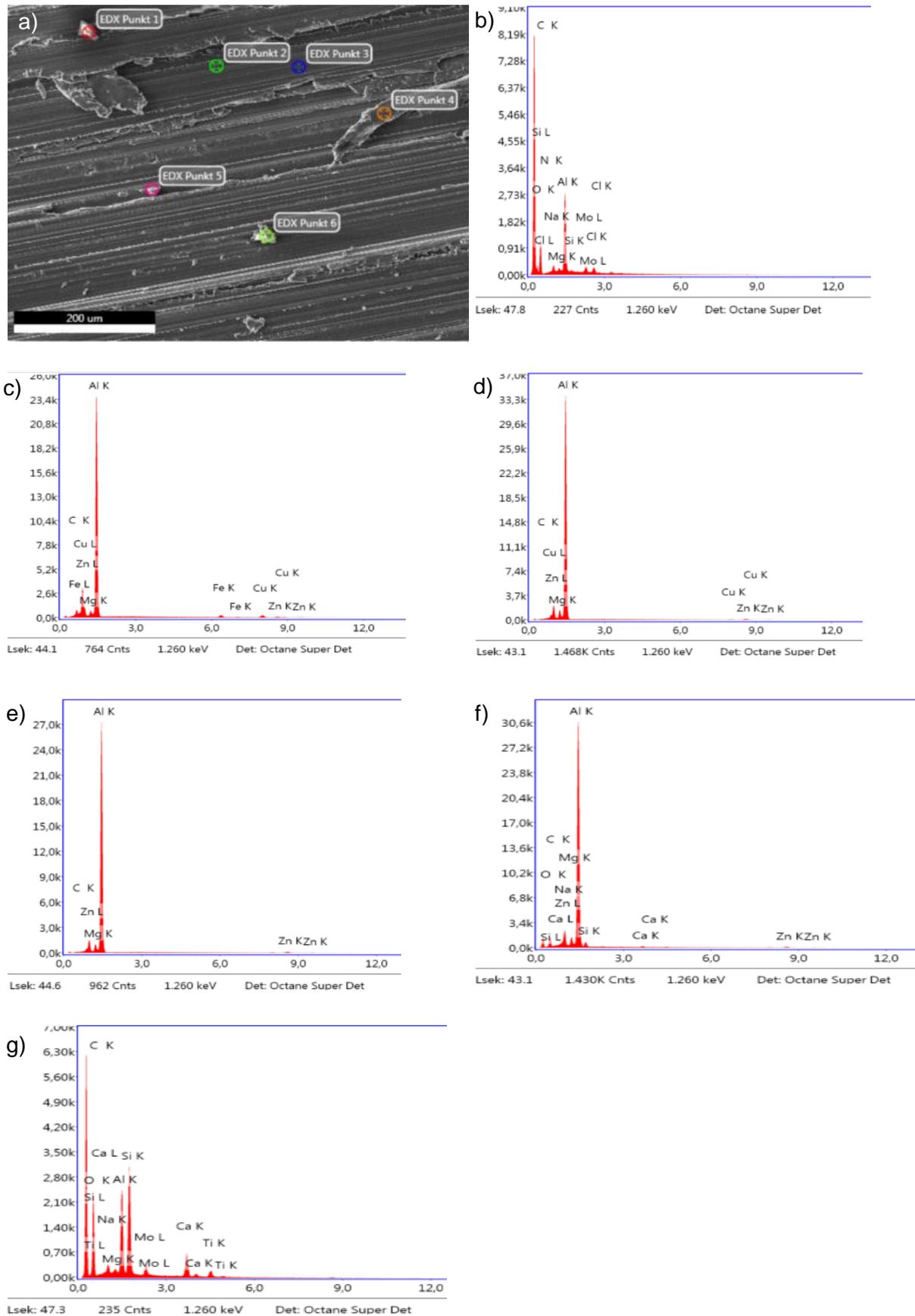


Abbildung 11-13: Titanal geschliffen gebürstet a) Übersicht, b) EDX Punkt 1, c) EDX Punkt 2, d) EDX Punkt 3, e) EDX Punkt 4, f) EDX Punkt 5, g) EDX Punkt 6

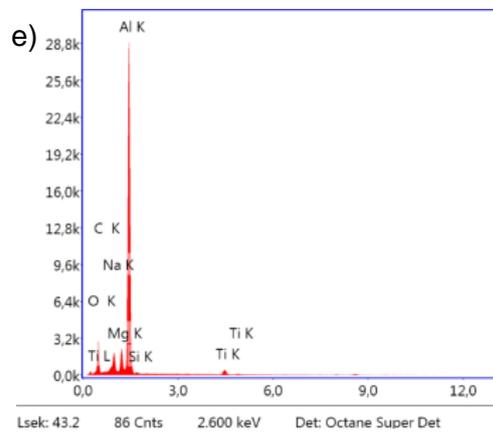
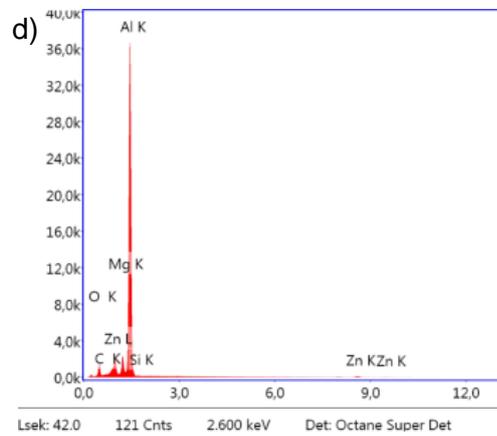
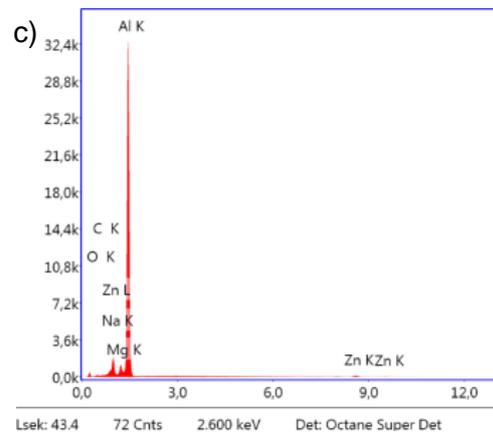
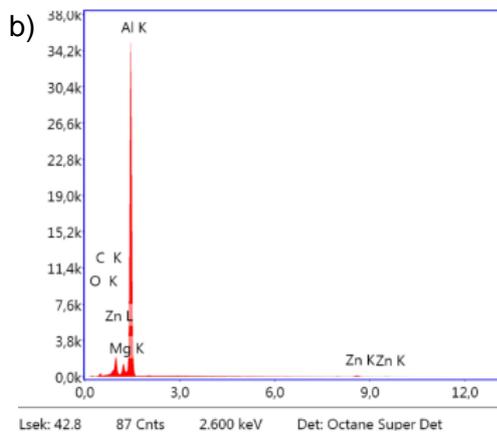
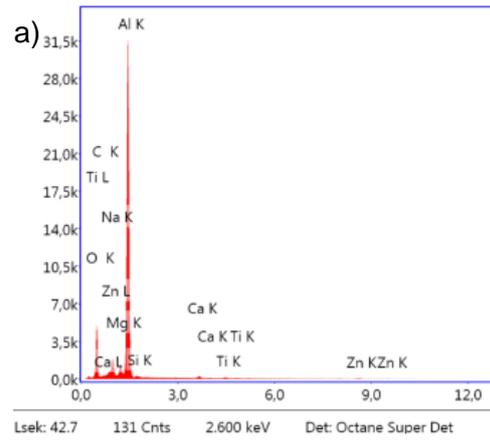
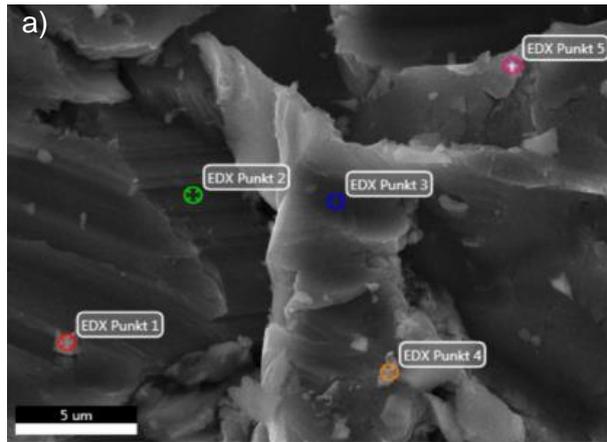
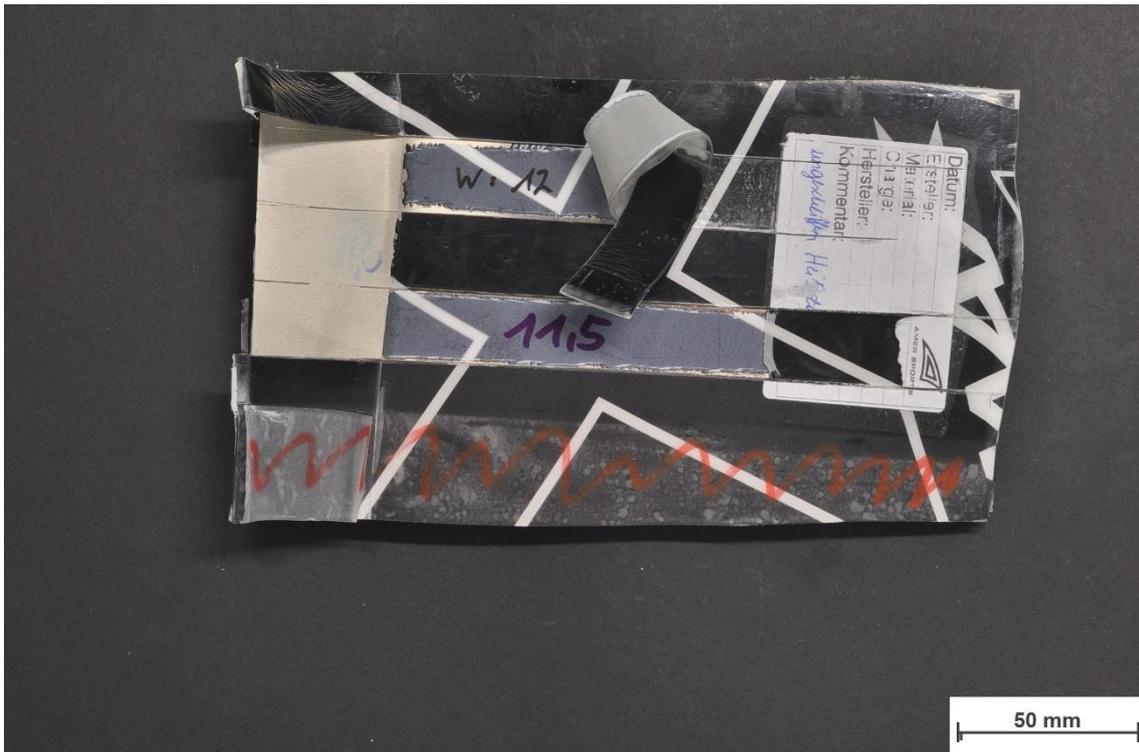


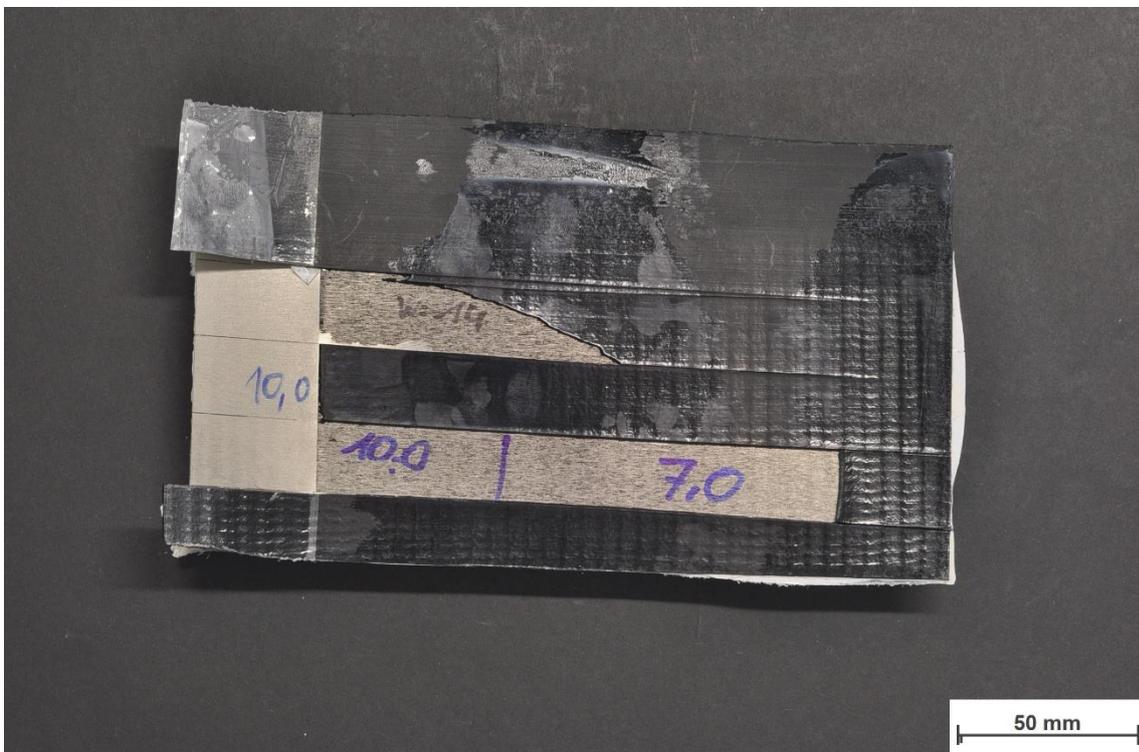
Abbildung 11-14: Titanal sandgestrahlt Atomic a) Übersicht, b) EDX Punkt 1, c) EDX Punkt 2, d) EDX Punkt 3, e) EDX Punkt 4, f) EDX Punkt 5

Anhang D



Makro2: Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 316,09mm| 52mm| 13| 1/3s| 680mm| 18mm

Bildname: [alutitanalof17_b0012.jpg](#)

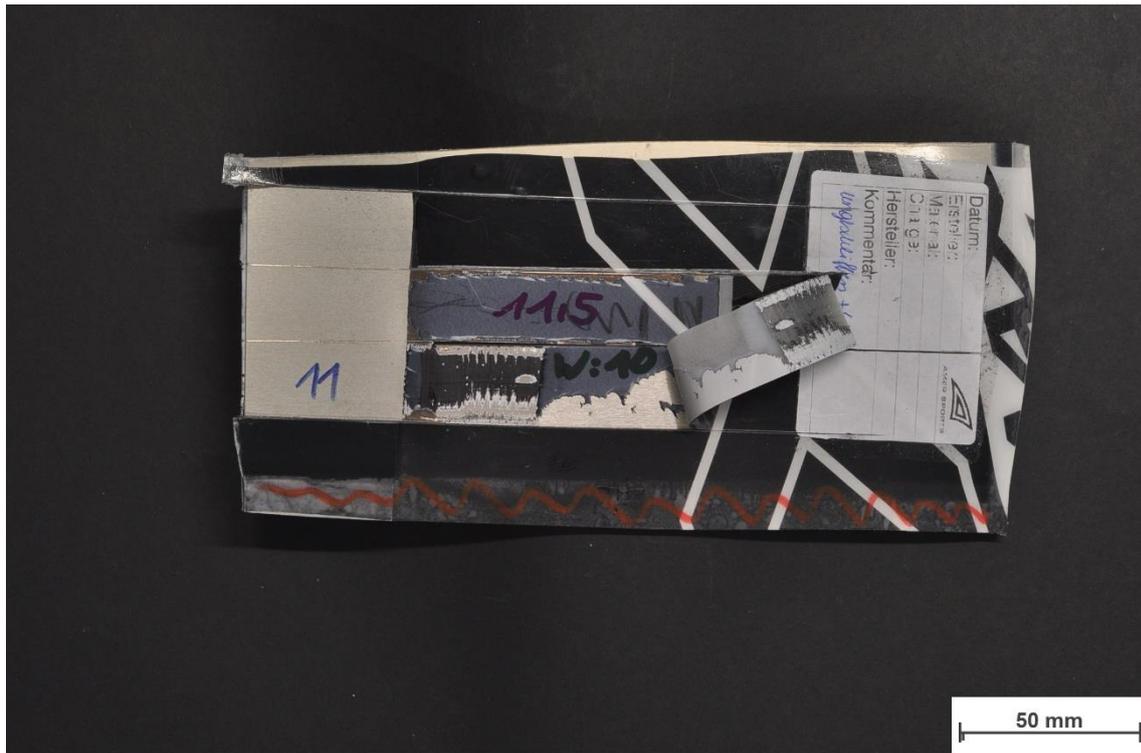


Makro2: Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 316,09mm| 52mm| 13| 1/2.5s| 680mm| 18mm

Bildname: [alutitanalof17_b0014.jpg](#)

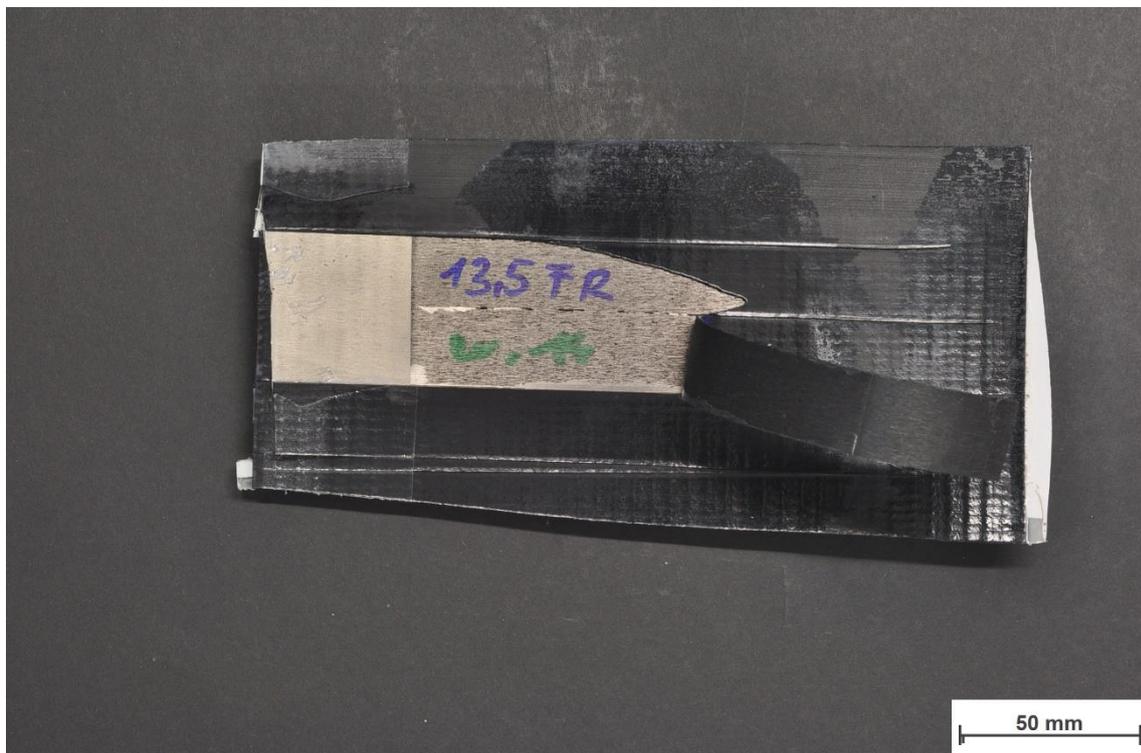


Abbildung 11-15: Bruchfläche *Titanal blank Heißplasma* – (oben) Oberfläche / (unten) Belag



Makro2: Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 316,09mm| 52mm| 13| 1/5s| 680mm| 18mm

Bildname: alutitanalof17_b0020.jpg

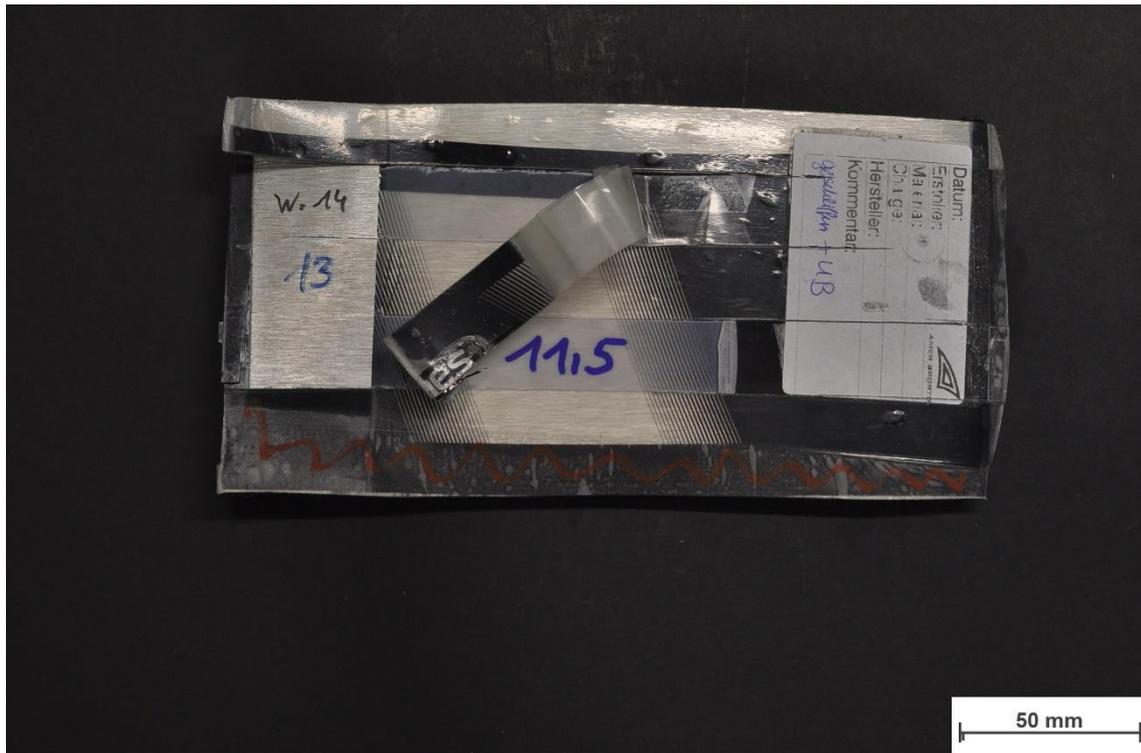


Makro2: Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 316,09mm| 52mm| 13| 1/2s| 680mm| 18mm

Bildname: alutitanalof17_b0022.jpg

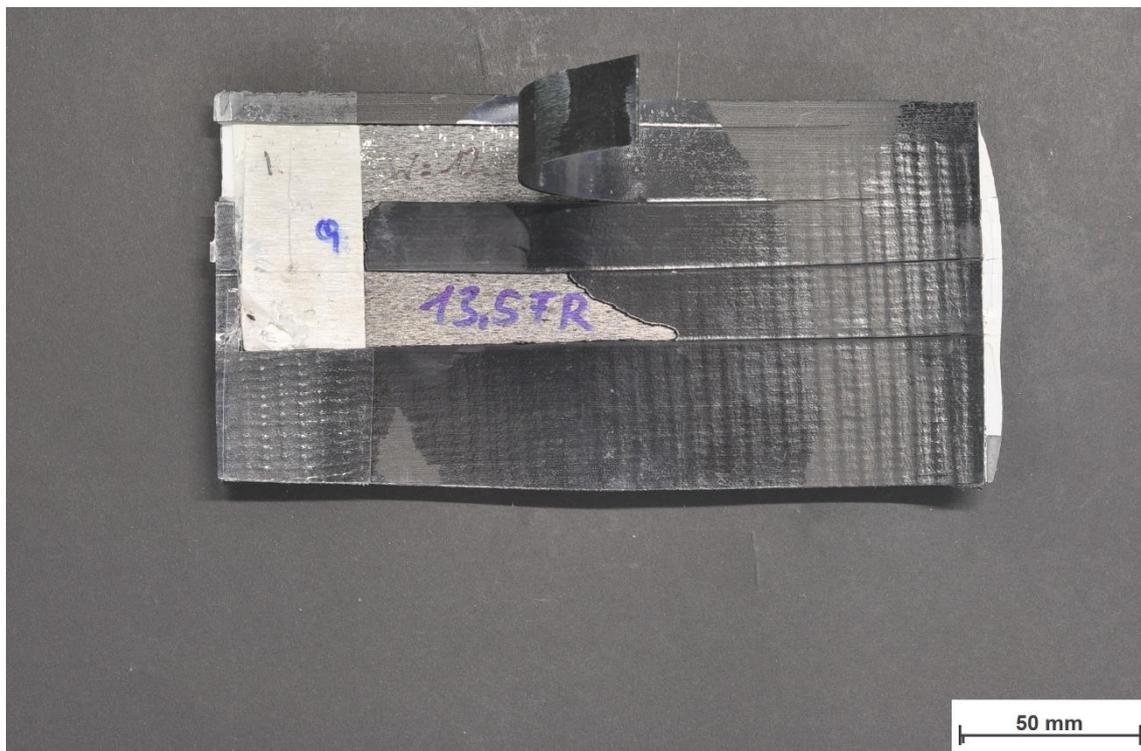


Abbildung 11-16: Bruchfläche *Titanal blank gereinigt* – (oben) Oberfläche / (unten) Belag



Makro2: Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 316,09mm| 52mm| 13| 1/8s| 680mm| 18mm

Bildname: alutitanalof17_b0024.jpg

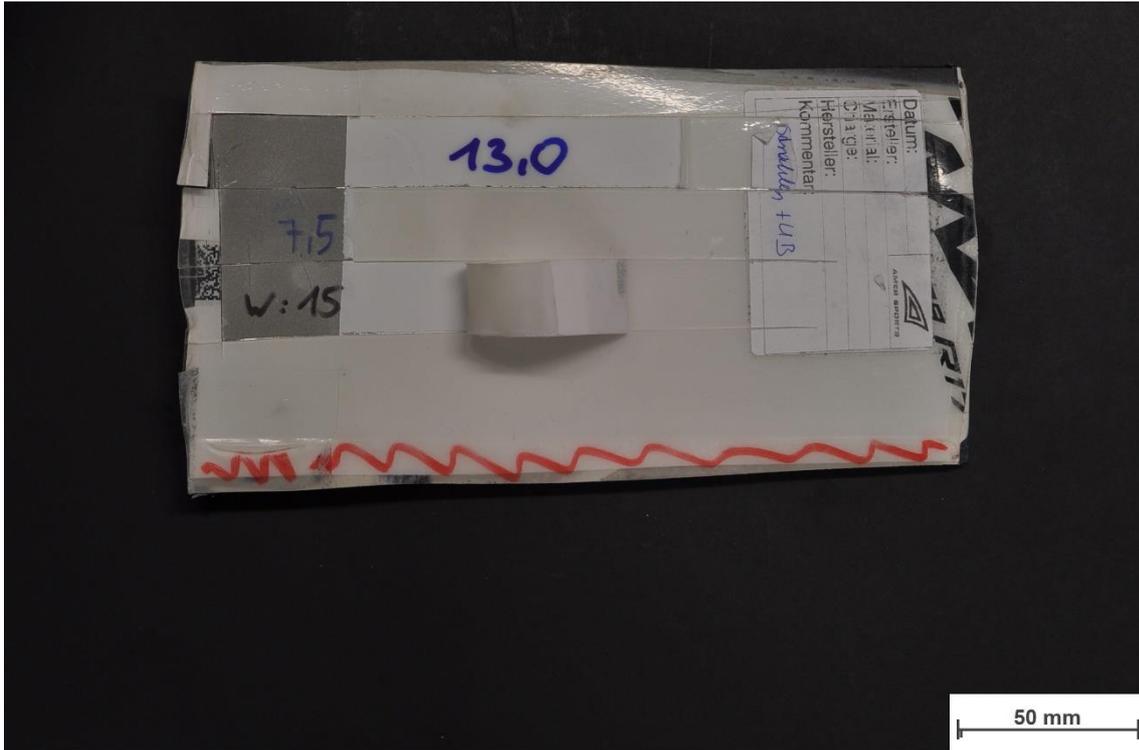


Makro2: Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 316,09mm| 52mm| 13| 1/1.3s| 680mm| 18mm

Bildname: alutitanalof17_b0026.jpg

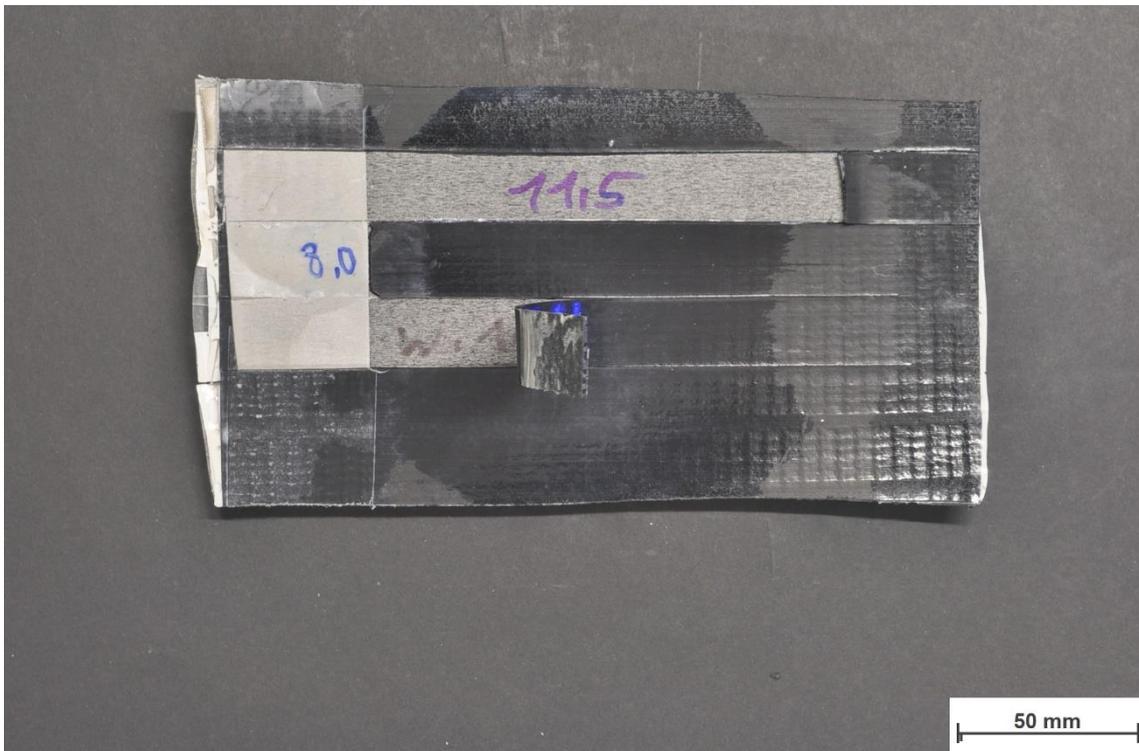


Abbildung 11-17: Bruchfläche *Titanal* geschliffen gereinigt – (oben) Oberfläche / (unten) Belag



Makro2: Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 316,09mm| 52mm| 13| 1/10s| 680mm| 18mm

Bildname: alutitanalof17_b0029.jpg

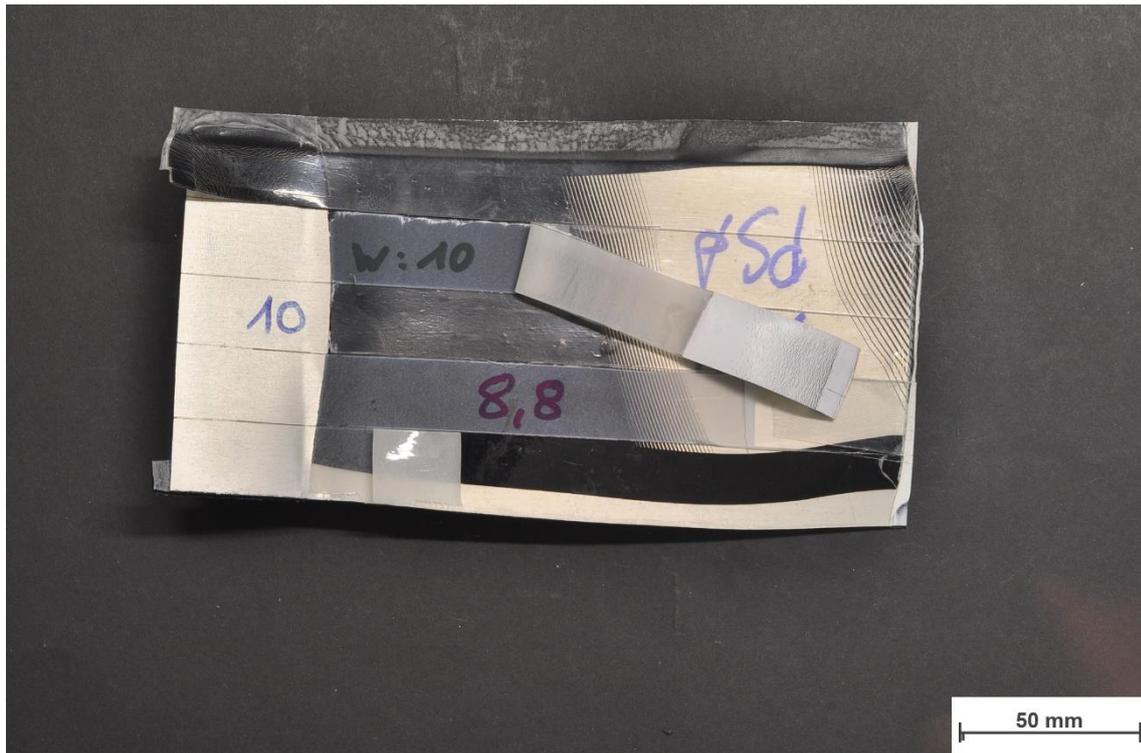


Makro2: Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 316,09mm| 52mm| 13| 1/1.3s| 680mm| 18mm

Bildname: alutitanalof17_b0031.jpg

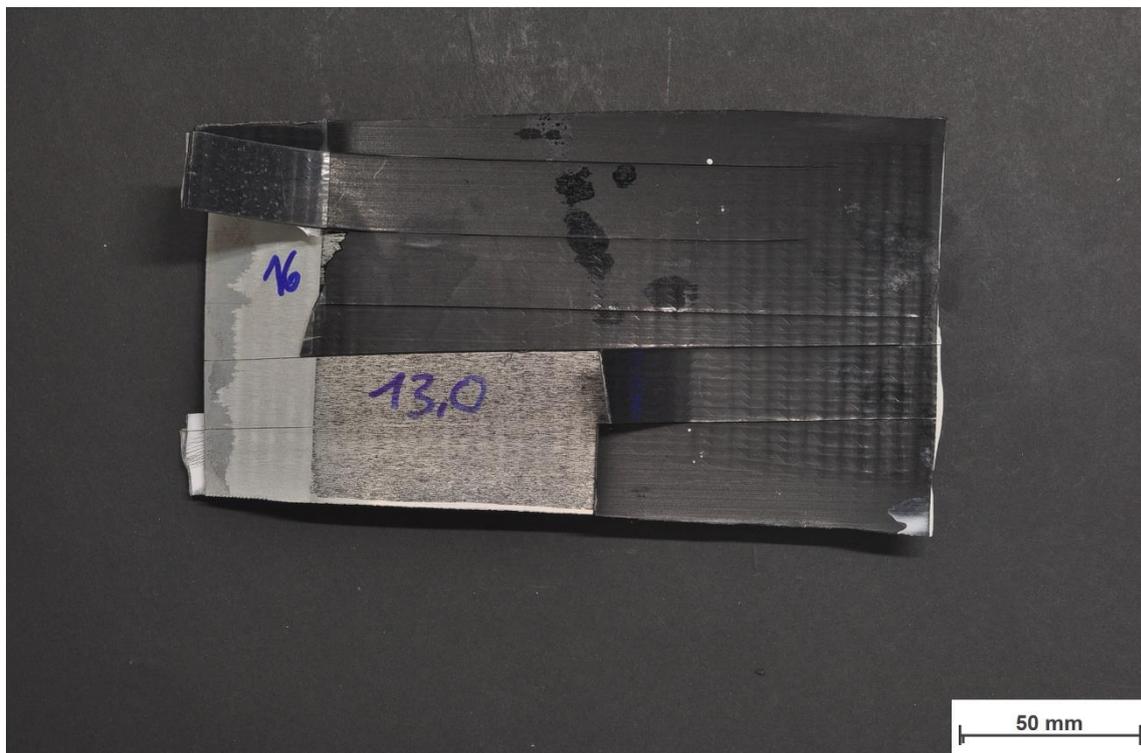


Abbildung 11-18: Bruchfläche *Titanal gestrahlt gereinigt* – (oben) Oberfläche / (unten) Belag



Makro2: Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 316,09mm| 52mm| 13| 1/2.5s| 680mm| 18mm

Bildname: alutitanalof17_b0033.jpg

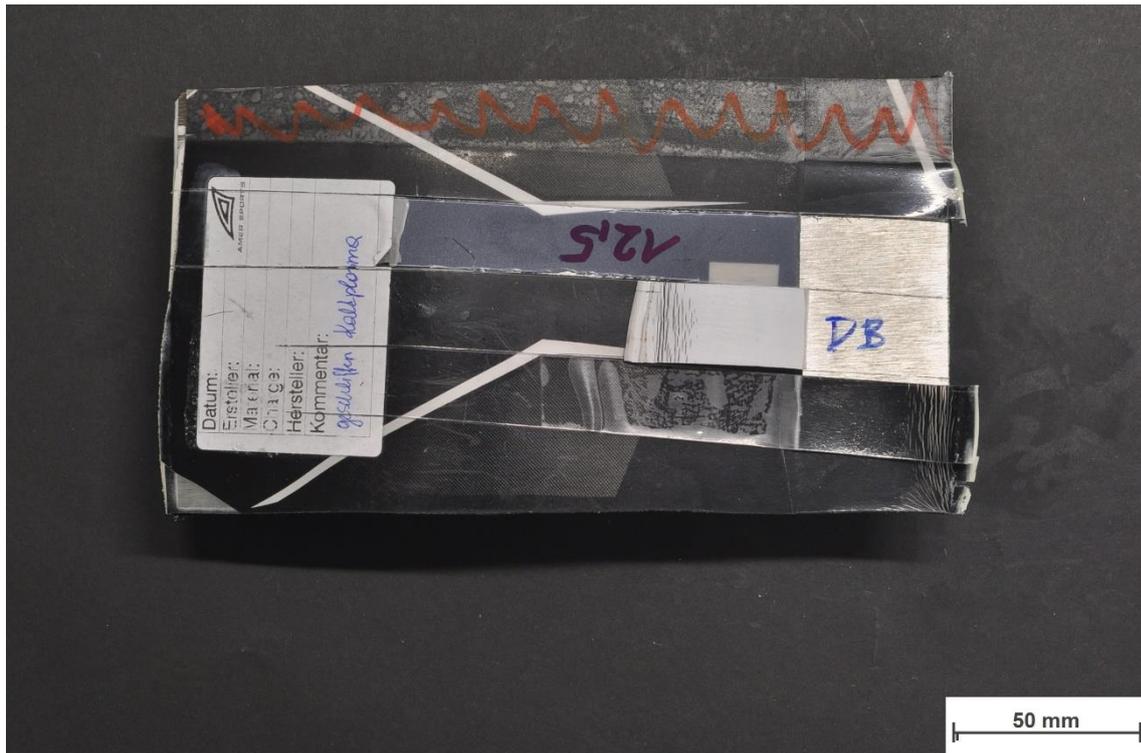


Makro2: Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 316,09mm| 52mm| 13| 1/3s| 680mm| 18mm

Bildname: alutitanalof17_b0035.jpg

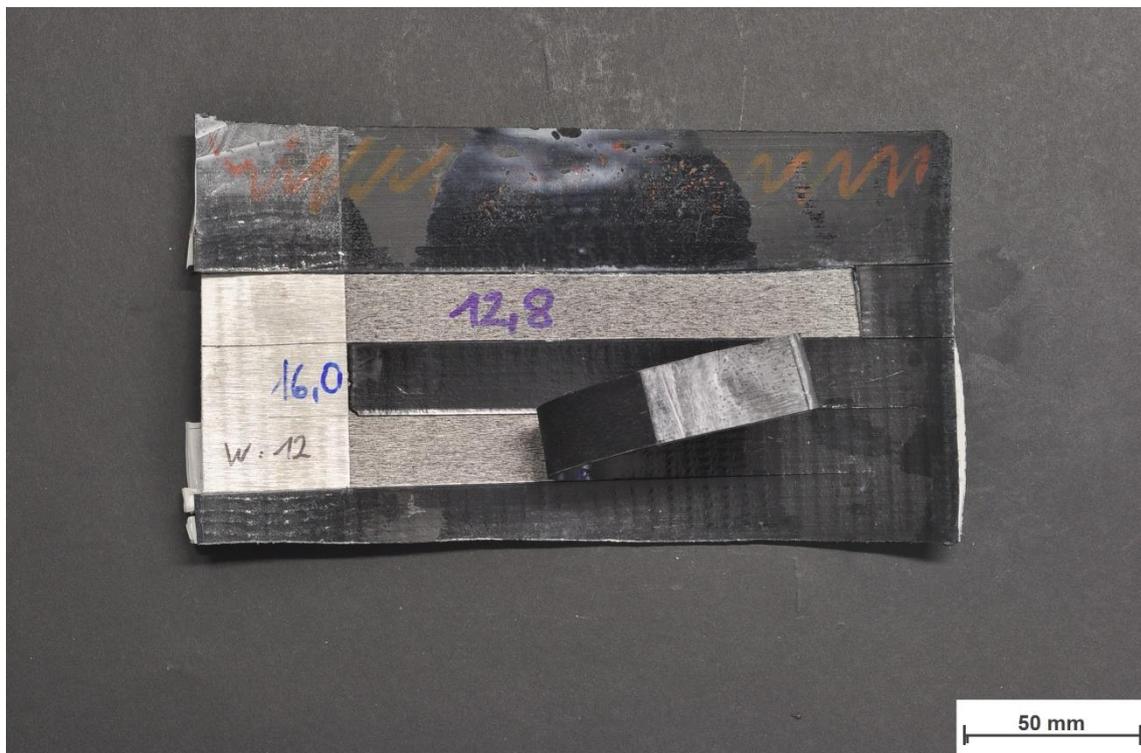


Abbildung 11-19: Bruchfläche *Titanal PSA* – (oben) Oberfläche / (unten) Belag



Makro2: Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 305,44mm| 52mm| 13| 1/3s| 680mm| 40mm

Bildname: alutitanalof17_b0037.jpg

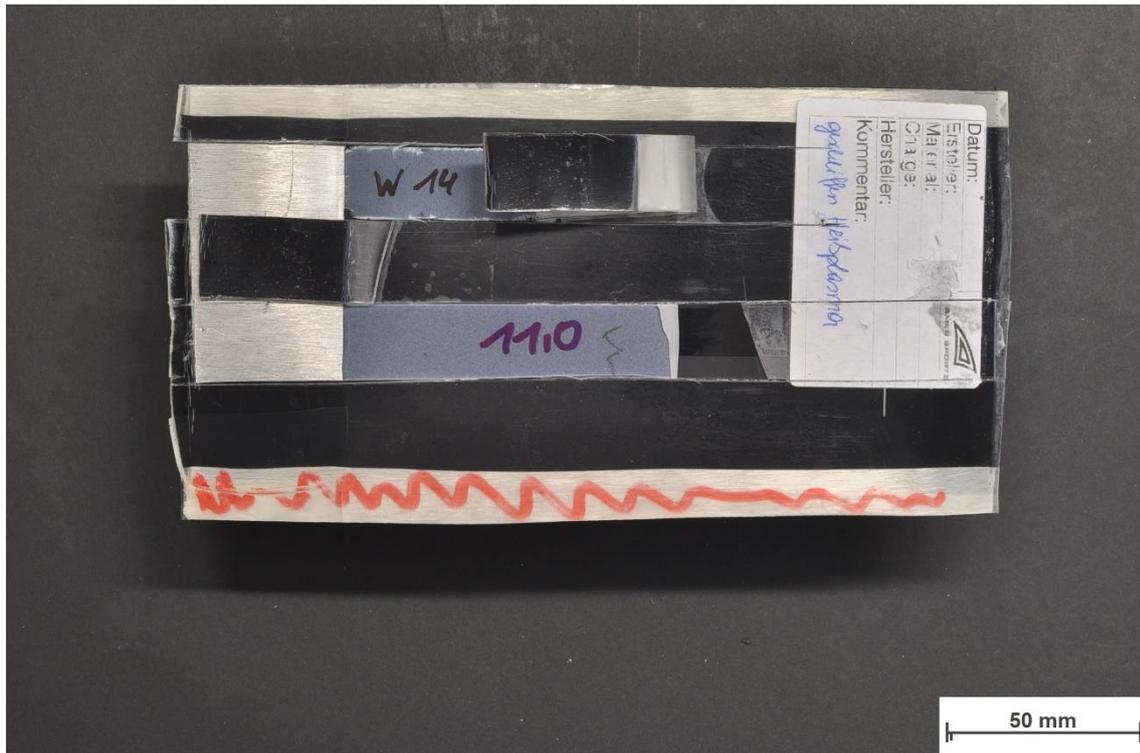


Makro2: Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 323,84mm| 52mm| 13| 1/1.6s| 680mm| 2mm

Bildname: alutitanalof17_b0039.jpg

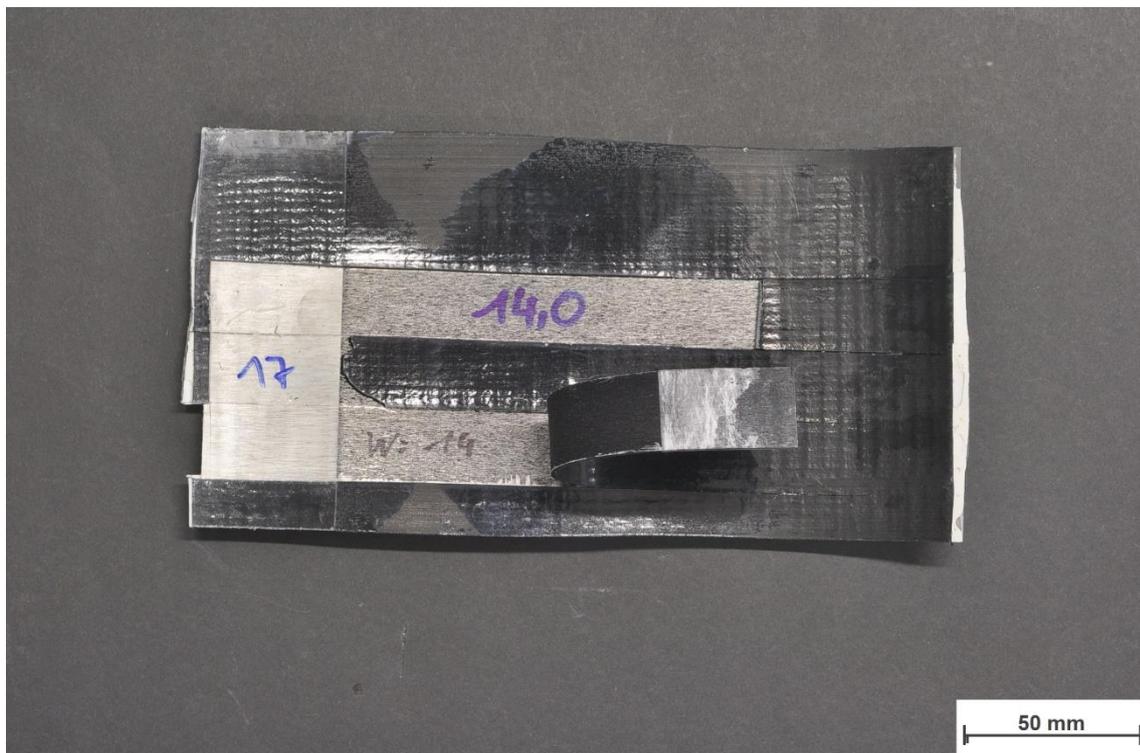


Abbildung 11-20: Bruchfläche *Titanal geschliffen Kaltplasma* – (oben) Oberfläche / (unten) Belag



Makro2: Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 295,76mm| 52mm| 13| 1/2.5s| 680mm| 60mm

Bildname: alutitanalof17_b0041.jpg

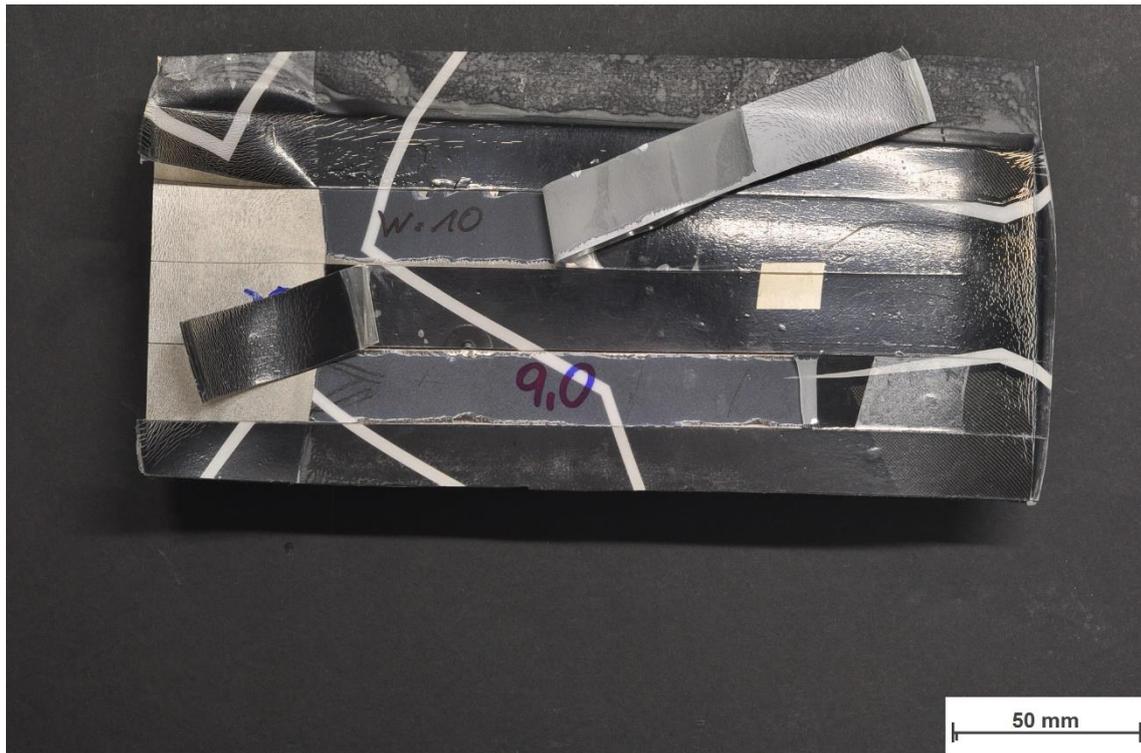


Makro2: Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 323,84mm| 52mm| 13| 1/1.6s| 680mm| 2mm

Bildname: alutitanalof17_b0043.jpg

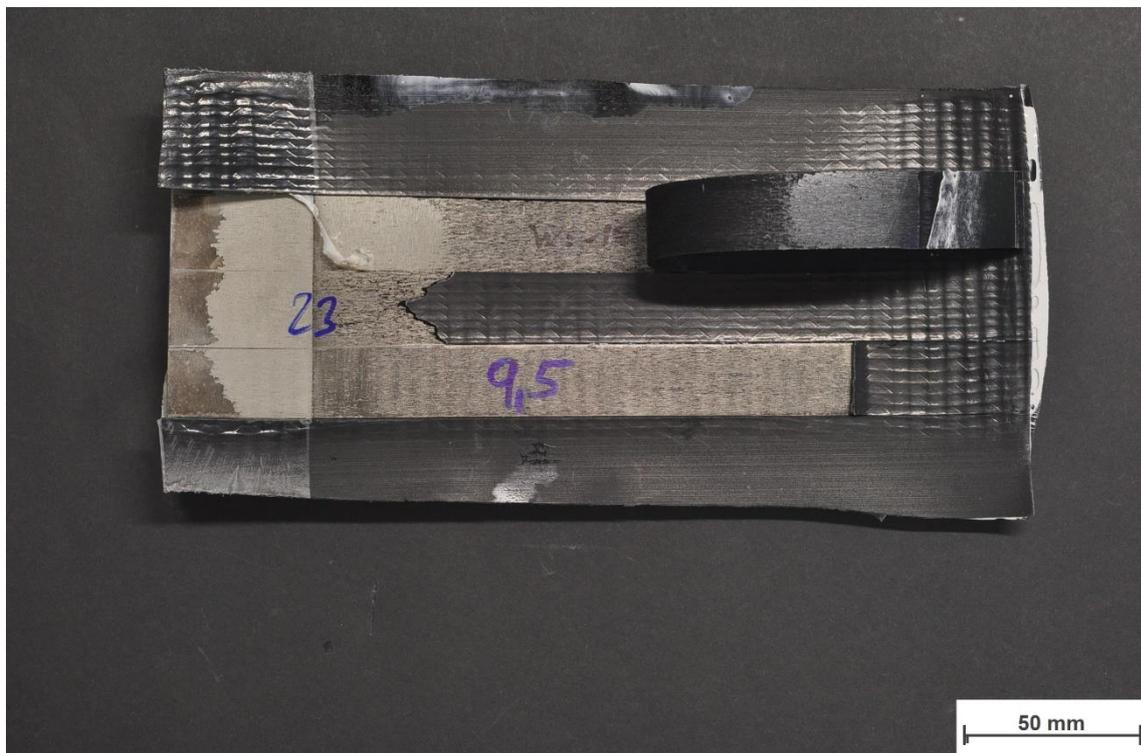


Abbildung 11-21: Bruchfläche Titanal geschliffen Heißplasma – (oben) Oberfläche / (unten) Belag



Makro2: Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 304,47mm| 52mm| 13| 1/3s| 680mm| 42mm

Bildname: alutitanalof17_b0045.jpg

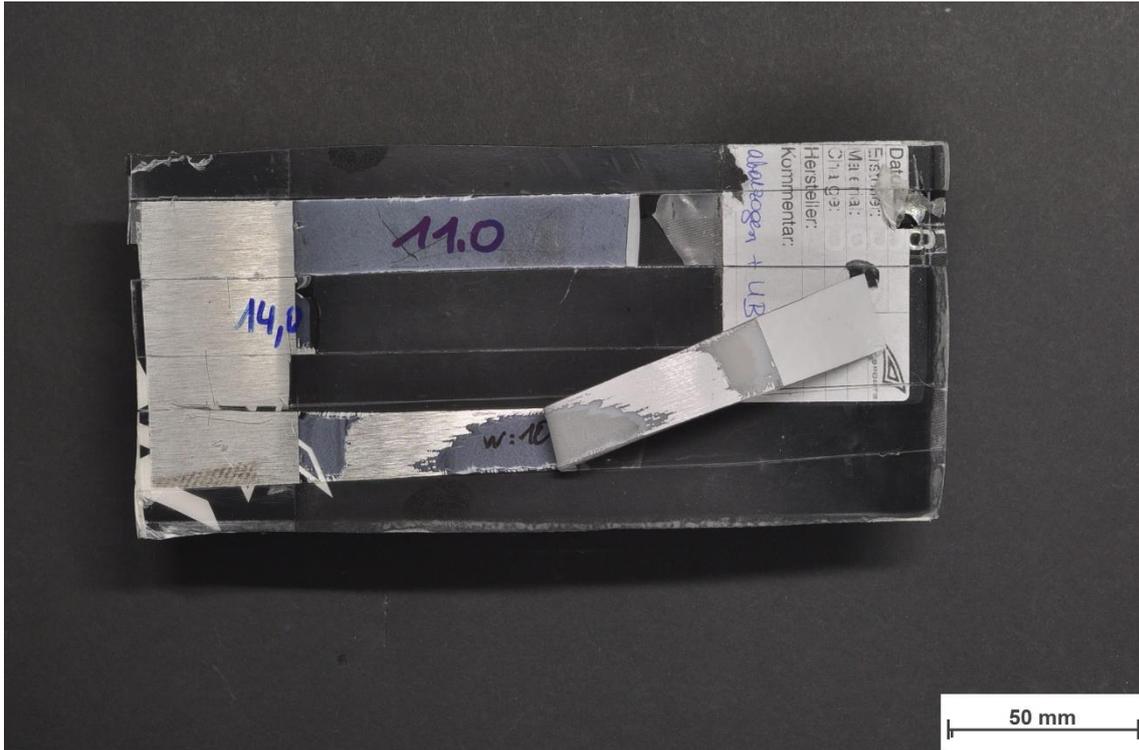


Makro2: Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 323,84mm| 52mm| 13| 1/3s| 680mm| 2mm

Bildname: alutitanalof17_b0047.jpg

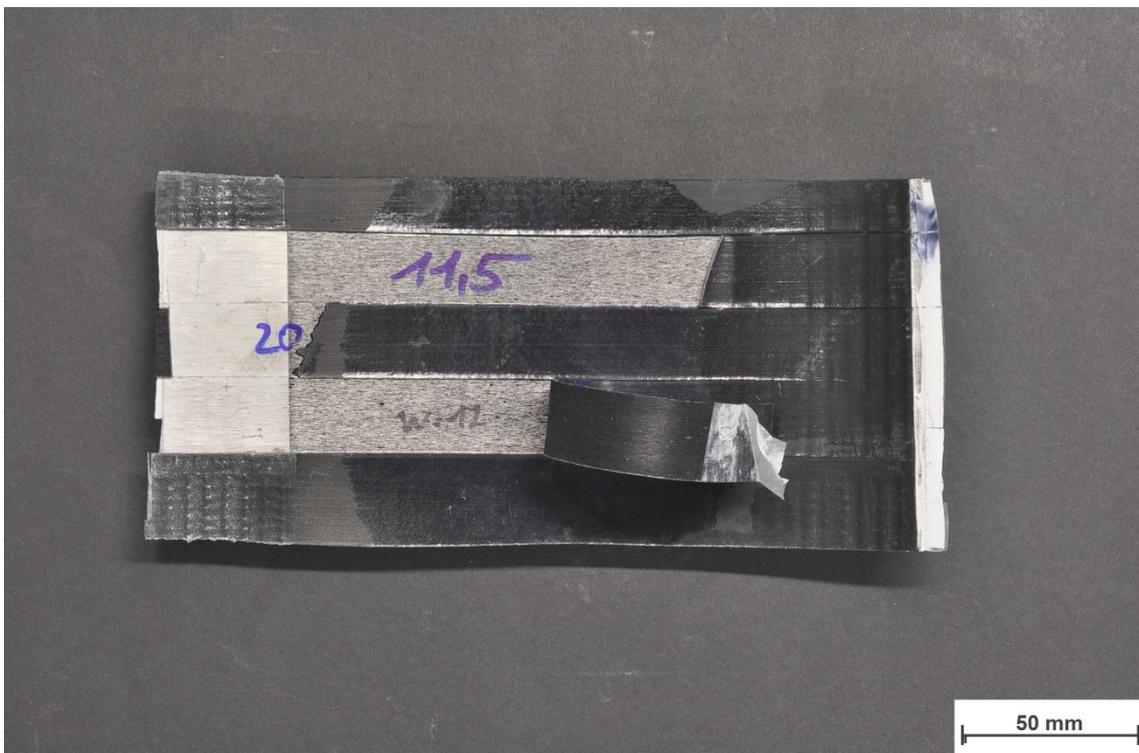


Abbildung 11-22: Bruchfläche *Titanal blank* – (oben) Oberfläche / (unten) Belag



Makro2: Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 300,60mm| 52mm| 13| 1/3s| 680mm| 50mm

Bildname: alutitanalof17_b0049.jpg



Makro2: Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 323,84mm| 52mm| 13| 1/1.6s| 680mm| 2mm

Bildname: alutitanalof17_b0051.jpg



Abbildung 11-23: Bruchfläche *Titanal* geschliffen abgezogen gereinigt – (oben) Oberfläche / (unten) Belag

Anhang E

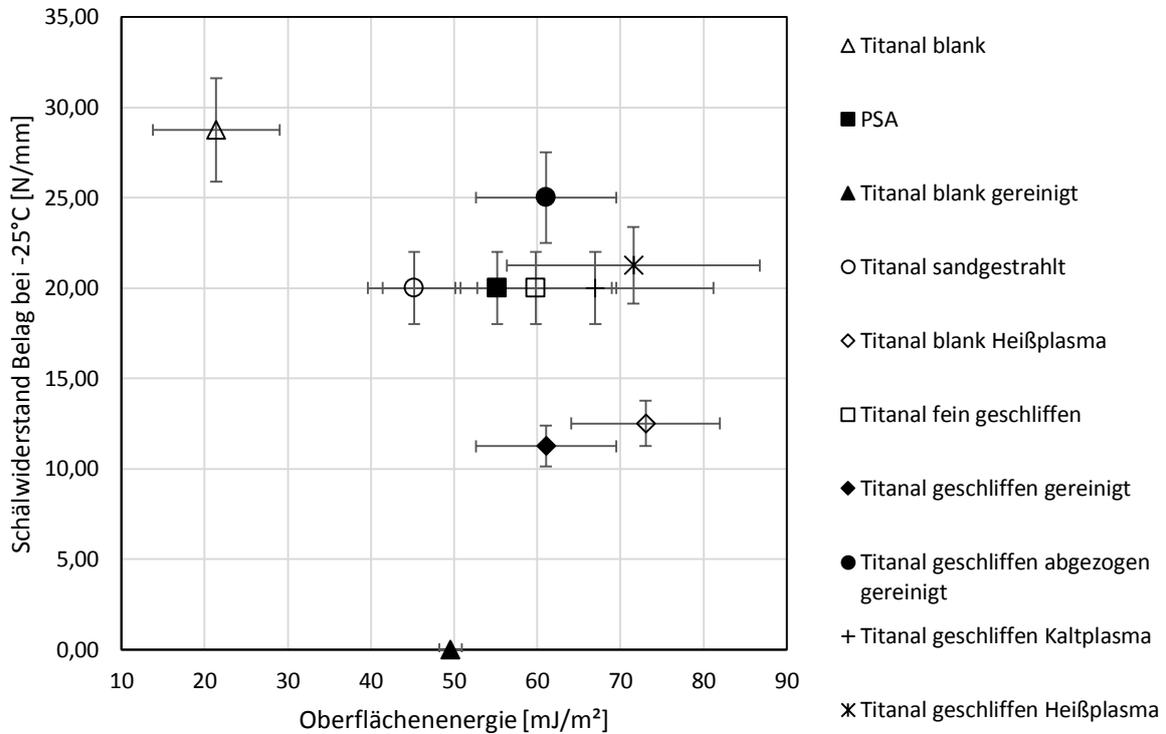
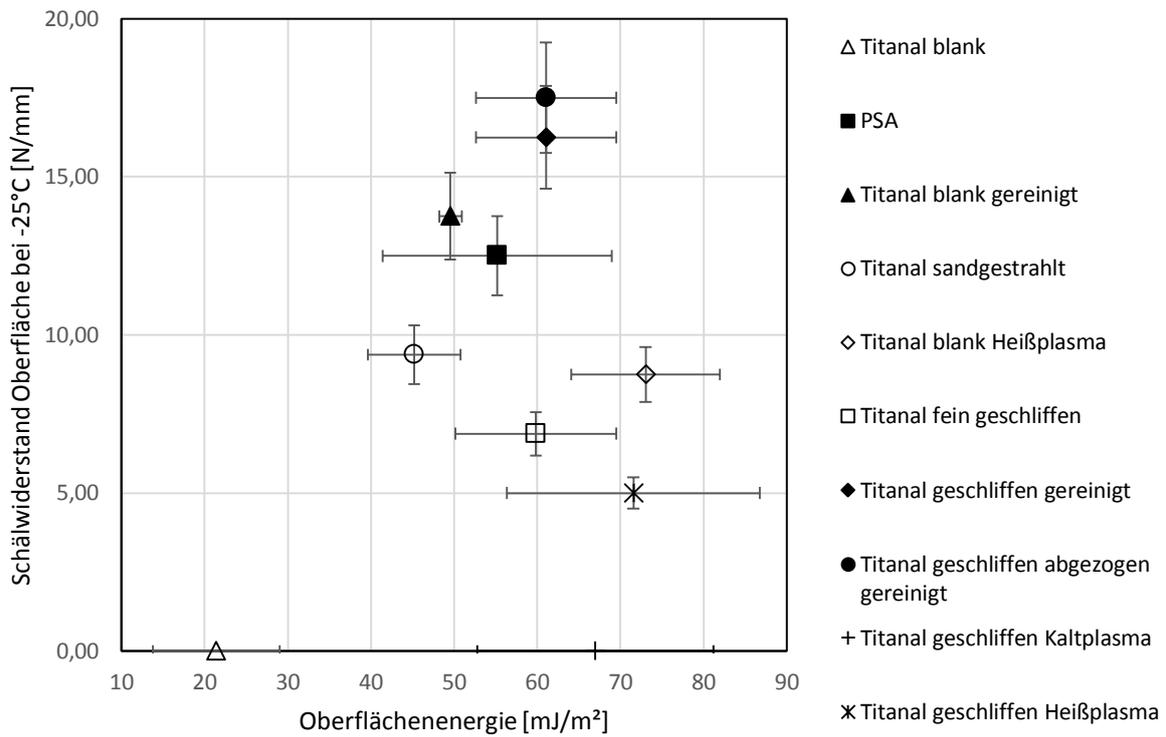


Abbildung 11-24: Zusammenhang von Schälwiderstand und Oberflächenenergie -25°C – (oben) Oberfläche / (unten) Belag

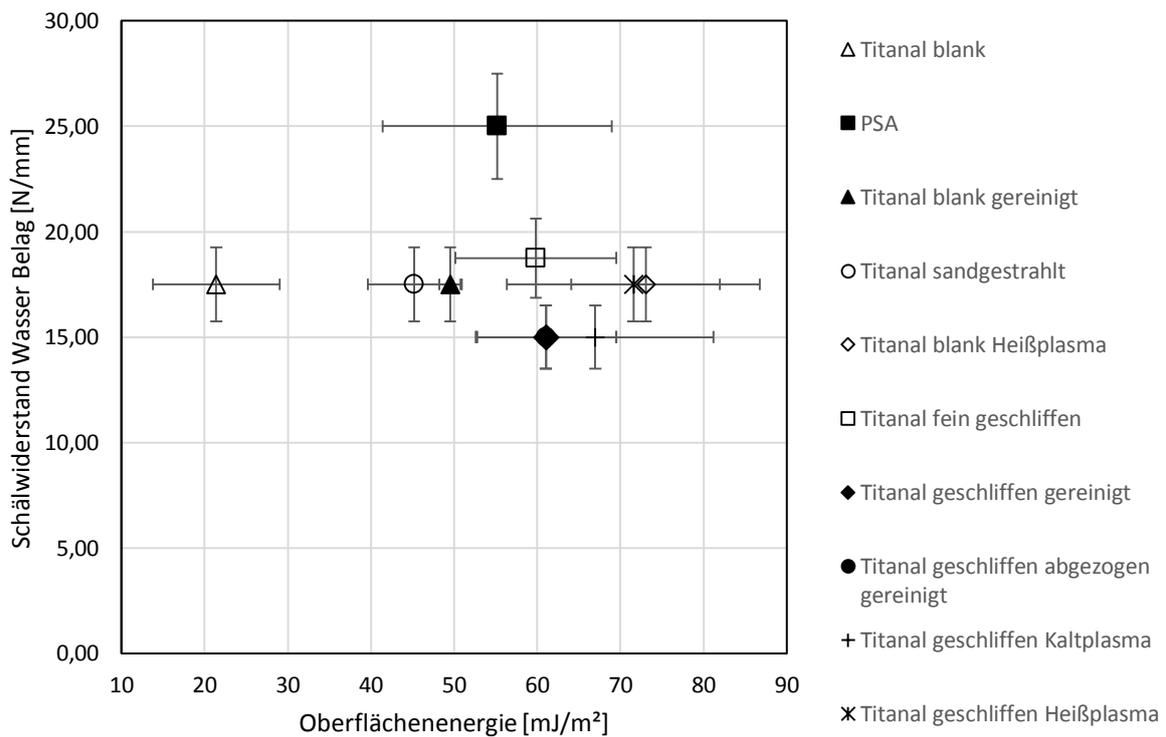
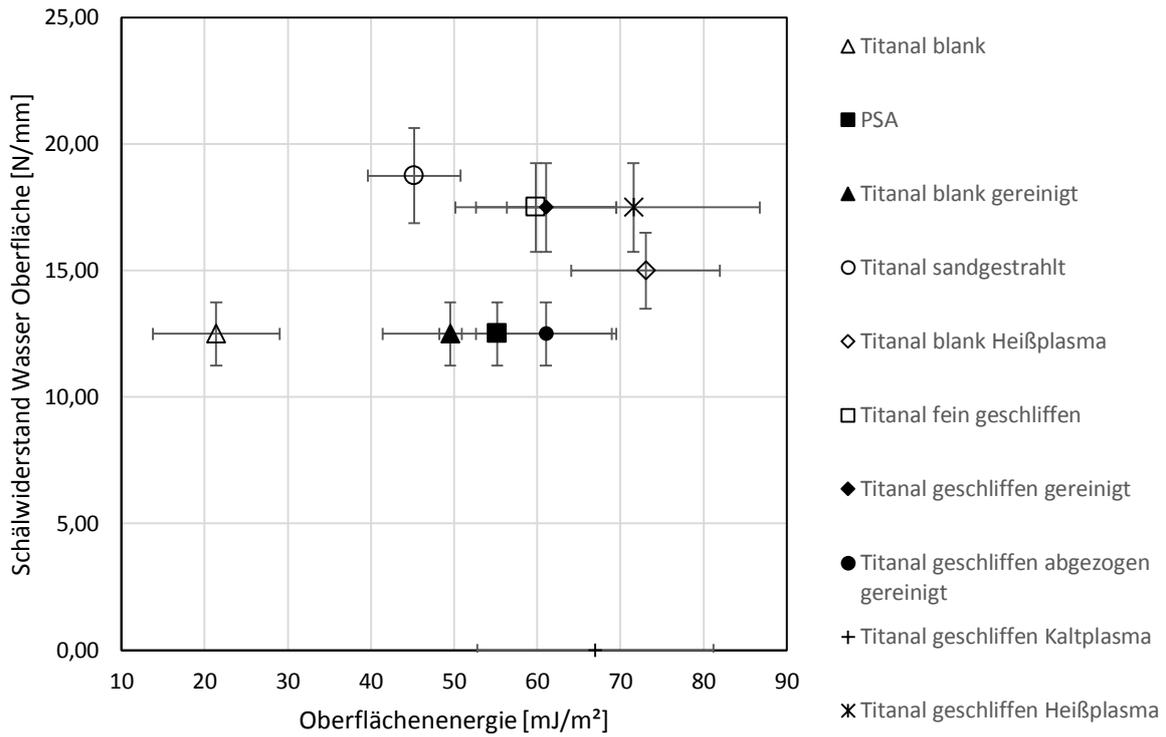


Abbildung 11-25: Zusammenhang von Schälwiderstand und Oberflächenenergie Tauchwasser – (oben) Oberfläche / (unten) Belag