
DIPLOMARBEIT

Frau B.Eng.

Jenny Engelmann

**Untersuchungen zum Fügen
von hybriden
Materialkombinationen**

Mittweida, 2024

Fakultät Ingenieurwissenschaften

DIPLOMARBEIT

Untersuchungen zum Fügen von hybriden Materialkombinationen

Autor:

Frau B.Eng.

Jenny Engelmann

Studiengang:

Maschinenbau

Seminargruppe:

MB22w1-A

Erstprüfer:

Prof. Dr. rer. nat. Frank Köster

Zweitprüfer:

Dipl.-Ing. Alexander Knorr

Einreichung:

Mittweida, 31.01.2024

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2024

DIPLOMA THESIS

Investigations on the joining of hybrid material combinations

author:

Ms. B.Eng.

Jenny Engelmann

course of studies:

Mechanical Engineering

seminar group:

MB22w1-A

first examiner:

Prof. Dr. rer. nat. Frank Köster

second examiner:

Dipl.-Ing. Alexander Knorr

submission:

Mittweida, 31.01.2024

defence/ evaluation:

Mittweida, 2024

Bibliografische Beschreibung:

Engelmann, Jenny:

Untersuchungen zum Fügen von hybriden Materialkombinationen. - 2024. - 10, 65, 54 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Diplomarbeit, 2024

Referat:

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit Untersuchungen zum Fügen von hybriden Materialkombinationen. Dabei liegt der Hauptschwerpunkt auf einem Klebeverbund zwischen Polyamid und Stahl. Beide Werkstoffe müssen dazu zunächst vorbehandelt werden. Da bei einer Kunststoff-Metall-Klebung einige Schwierigkeiten auftreten können, soll das Polyamid vorher metallisiert werden. Somit kann Metall mit Metall verklebt werden. Das Ziel ist dabei eine größere Haftfestigkeit zu erreichen als ohne die Metallisierung.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	vi
Einleitung.....	1
1.1 <i>Firmenvorstellung.....</i>	<i>1</i>
1.2 <i>Motivation.....</i>	<i>1</i>
1.3 <i>Zielsetzung.....</i>	<i>1</i>
2 Stand der Technik	2
2.1 <i>Werkstofftechnik der Metalle</i>	<i>2</i>
2.2 <i>Werkstofftechnik der Kunststoffe.....</i>	<i>3</i>
2.3 <i>Verbundwerkstoffe</i>	<i>6</i>
2.4 <i>Werkstoffverbunde</i>	<i>7</i>
3 Herstellungsverfahren für Werkstoffverbunde	9
3.1 <i>In-Mold Assembly.....</i>	<i>9</i>
3.1.1 Insert-Prozess	10
3.1.2 Outsert-Prozess.....	10
3.1.3 Folienhinterspritzen	10
3.2 <i>Post-Mold Assembly</i>	<i>12</i>
3.2.1 Mechanisches Fügen.....	12
3.2.2 Thermisches Fügen.....	16
3.2.3 Adhäsives Fügen.....	19
4 Vorbehandlungsverfahren.....	24
4.1 <i>Metallkomponente.....</i>	<i>24</i>
4.1.1 Mechanisch	25
4.1.2 Physikalisch.....	26
4.1.3 Chemisch	27
4.1.4 Elektrochemisch	28
4.1.5 Kombinationen.....	29
4.2 <i>Kunststoffkomponente.....</i>	<i>30</i>
4.2.1 Mechanisch	31
4.2.2 Physikalisch.....	32
4.2.3 Chemisch	34
4.2.4 Thermisch.....	35

4.2.5	Strukturierte Spritzgussteile.....	36
5	Metallisierung von thermoplastischem Material	37
6	Versuchsplanung.....	39
6.1	<i>Das Bauteil</i>	39
6.2	<i>Voruntersuchung.....</i>	40
6.3	<i>Versuchsplan.....</i>	51
6.4	<i>Versuchsdurchführung.....</i>	54
7	Versuchsauswertung.....	59
8	Zusammenfassung	66
9	Literatur- und Quellenverzeichnis	67
	Anlagenverzeichnis	70
	Eidesstattliche Erklärung	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Elektronengasmodell	2
Abbildung 2. Thermoplast.....	4
Abbildung 3. Duroplast	5
Abbildung 4. Elastomer	5
Abbildung 5. Links: amorpher Thermoplast, rechts: teilkristalliner Thermoplast.....	6
Abbildung 6. Verbundwerkstoff.....	7
Abbildung 7. Werkstoffverbund.....	8
Abbildung 8. Prozess des Folienhinterspritzens	11
Abbildung 9. Links: Blindnieten, rechts: Stanznieten	13
Abbildung 10. Schrauben	14
Abbildung 11. Flach-Clinchen.....	15
Abbildung 12. Kragenfügen	15
Abbildung 13. Schnappverbindung.....	16
Abbildung 14. Ultraschallfügen.....	17
Abbildung 15. Induktionsfügen	18
Abbildung 16. Links: Laser-Wärmeleitungsfügen, rechts: Laser-Durchstrahlfügen	18
Abbildung 17. Mechanische Adhäsion.....	19
Abbildung 18. Adhäsion und Kohäsion	20
Abbildung 19. Benetzungsverhalten in Abhängigkeit von der Viskosität des Klebstoffes.....	21
Abbildung 20. Verschiedene Benetzungswinkel	21
Abbildung 21. Laserstrukturieren.....	26
Abbildung 22. Links: Linienmuster, rechts: Lochmuster	27
Abbildung 23. Oxidschicht auf Metall.....	28
Abbildung 24. Galvanisieren.....	29

Abbildung 25. Skelettierte Kunststoffoberfläche	32
Abbildung 26. Links: unbehandeltes PP, rechts: gebeiztes PP.....	35
Abbildung 27. Schichtmodell eines geklebten Polymer-Metall-Verbunds.....	36
Abbildung 28. Schichtmodell mit Metallisierung.....	37
Abbildung 29. Form des Stempels	39
Abbildung 30. Gebeizte Oberfläche des Stempels	39
Abbildung 31. PA 6 - Platte wird mittels Atmosphärendruckplasma vorbehandelt	41
Abbildung 32. Abholung des Tropfens beim Benetzungstest.....	42
Abbildung 33. Benetzungswinkel von unbehandeltem PA6 (links) und unbehandeltem PA12 (rechts).....	43
Abbildung 34. Unbehandeltes PA 6 unter dem Lichtmikroskop mit 100-facher Vergrößerung.....	45
Abbildung 35. Mit Ameisensäure behandeltes PA 6 unter dem Lichtmikroskop mit 100-facher Vergrößerung	46
Abbildung 36. 15 s lang gestrahltes PA 6 unter dem Lichtmikroskop mit 500-facher Vergrößerung.....	46
Abbildung 37. PA 12 nach 20-minütiger Tauchzeit in Kaliumpermanganat unter dem Lichtmikroskop mit 500-facher Vergrößerung.....	47
Abbildung 38. Zuwachsen der Nickelschicht auf der Probe.....	49
Abbildung 39. Geklebte Probe vor (links) und nach (rechts) dem Entfernen des überschüssigen Klebstoffs	55
Abbildung 40. Einspannung der Vorrichtung in der Zugprüfmaschine	55
Abbildung 41. Eingespannte Probe in der Zugprüfmaschine	56
Abbildung 42. Kraft-Weg-Diagramm der ersten Probe	57
Abbildung 43. Einspannung der mit Ameisensäure vorbehandelten PA 6-Probe.....	57
Abbildung 44. Proben nach dem Stirnabzug	59
Abbildung 45. Versagensstelle Klebschicht (oben) und Versagensstelle Kunststoffstift (unten) der mit Ameisensäure vorbehandelten PA 6 - Proben.....	60
Abbildung 46. Mit Minitab erstellte Residuendiagramme für die gemessenen Kräfte.....	62

Abbildung 47. Kraft-Weg-Diagramm der gestrahlten PA 6 - Proben	63
Abbildung 48. Kraft-Weg-Diagramm der Referenzproben.....	64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Eigenschaften der Verbindungen.....	9
Tabelle 2. Vergleich verschiedener mechanischer Fügeverfahren	16
Tabelle 3. Oberflächenbehandlungen.....	24
Tabelle 4. Klebeignung von Thermoplasten	30
Tabelle 5. Auflistung von polaren und unpolaren Polymeren.....	30
Tabelle 6. Untersuchte Parameter der Vorbehandlungsverfahren	40
Tabelle 7. Geschwindigkeitsbestimmung beim Atmosphärendruckplasma.....	41
Tabelle 8. Tauchzeiten der PA 6-Proben in Palladium und chemisch Nickel	48
Tabelle 9. Gewichtszunahme der Kunststoffproben	50
Tabelle 10. Variablen und deren Stufen für den Versuchsplan.....	52
Tabelle 11. Auszug aus dem Versuchsplan	53
Tabelle 12. Auszug aus dem decodierten Versuchsplan	53

Einleitung

1.1 Firmenvorstellung

Die vorliegende Diplomarbeit entstand in Zusammenarbeit mit der Elbe Flugzeugwerke GmbH (EFW). EFW wurde 1955 gegründet und hat ab diesem Zeitpunkt mit der Entwicklung und Produktion von Flugzeugen begonnen. Mittlerweile ist das Unternehmen seit 1991 eine Tochtergesellschaft von Airbus und hat sich zu einem internationalen Unternehmen weiterentwickelt. Allein am Standort Dresden beschäftigt EFW über 2000 Mitarbeiter und besitzt weltweit 9 weitere Standorte. Das primäre Aufgabenfeld des Unternehmens ist die Umrüstung von Passagier- zu Frachtflugzeugen, wobei EFW dabei zu den weltweit führenden Unternehmen gehört. Neben der Umrüstung sind die Elbe Flugzeugwerke unter anderem auf die Wartung von Flugzeugen und Hubschraubern der Bundeswehr, sowie auf die Herstellung und Entwicklung von Leichtbaukomponenten, wie zum Beispiel die Bodenplatten oder die Inneneinrichtung von Flugzeugen, spezialisiert.

1.2 Motivation

Leichtbauweisen, wie Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, spielen in der Luftfahrt eine bedeutende Rolle. Die daraus resultierende Gewichtsreduzierung des Flugzeugs hat entscheidenden Einfluss auf dessen Energieverbrauch und ist somit aus ökologischer Sicht heutzutage unabdingbar. Dennoch soll durch die Reduzierung des Gewichts, also durch den Einsatz leichterer und somit nicht so stabiler Werkstoffe, nicht die Sicherheit des Flugzeugs beeinträchtigt werden. Eher im Gegenteil, da die Sicherheitsanforderungen immer höher werden. Durch den Einsatz des Leichtbaus können somit steife Werkstoffe, wie Metalle, mit leichten Werkstoffen, wie beispielsweise Polymeren, kombiniert werden. Zudem sind Kunststoffe kostengünstiger als Metalle, was das Kombinieren der beiden Stoffe ebenfalls aus ökonomischer Sicht sehr wirtschaftlich macht.

1.3 Zielsetzung

Die Aufgabenstellung der vorliegenden Diplomarbeit sind Untersuchungen zum Fügen von hybriden Materialkombinationen. Dabei wird sich auf das Kleben von Stahl mit Polyamid spezialisiert. Das Ziel ist es dabei Haftfestigkeitsversuche durchzuführen und die Kräfte, die zum Zerstören des Verbundes notwendig sind, zu vergleichen. Dadurch soll ein besseres Verfahren als das Bisherige, zur Kunststoffvorbereitung gefunden werden.

Dazu werden beide Werkstoffe zunächst werkstofftechnisch kurz erläutert und zwei verschiedene Leichtbauweisen aufgezeigt. Da es sich beim Kleben von Metall mit Kunststoff um einen Werkstoffverbund handelt, werden danach dessen Herstellungs- und Vorbehandlungsverfahren für beide Komponenten vorgestellt.

Eine primäre Aufgabe der Arbeit ist es, experimentell zu überprüfen, ob eine Metallisierung des Kunststoffes vor der Verklebung zu einer Haftfestigkeitserhöhung führt.

2 Stand der Technik

2.1 Werkstofftechnik der Metalle

Von allen Werkstoffgruppen haben Metalle mit Abstand die größte Bedeutung im Maschinenbau. Grund dafür sind deren Eigenschaften, welche von der chemischen Zusammensetzung und der Struktur bestimmt werden. Es gibt verschiedenen Arten von Metallen, beispielsweise unterteilt nach deren Dichte in Leicht- und Schwermetalle, sowie nach ihrer Reaktivität in unedle Metalle und Edelmetalle. Im Allgemeinen jedoch weisen alle Metalle folgende Eigenschaften auf:

- eine hohe Festigkeit,
- metallischen Glanz,
- plastische Verformbarkeit,
- elektrische Leitfähigkeit und
- thermische Leitfähigkeit. [1, S.19 f.]

Metalle sind Festkörper bestehend aus einem Metallgitter, in welchem die Atome dicht beieinander und geordnet vorliegen. Die Atome bestehen aus einem positiv geladenen Atomkern und einer negativ geladenen Atomhülle, in welcher die Elektronen sitzen. Die Valenzelektronen, also die Elektronen auf der äußeren Schale, werden nur schwach vom Atomkern angezogen und sind somit im Metallgitter frei beweglich. Die ursprünglichen Metallatome werden durch die abgegebenen Elektronen zu positiv geladenen Atomrümpfen. Diese werden von den frei beweglichen Elektronen umgeben, welche auch als Elektronengas bezeichnet werden können. Die Atomrümpfe und die Elektronen ziehen sich gegenseitig an, wodurch das Gitter zusammengehalten wird. Dies nennt man auch die Metallbindung. Das Elektronengasmodell ist in der Abbildung 1 dargestellt. Anhand dieses Modells lassen sich die Eigenschaften der Metalle erklären. [1, S. 20 ff.; 2]

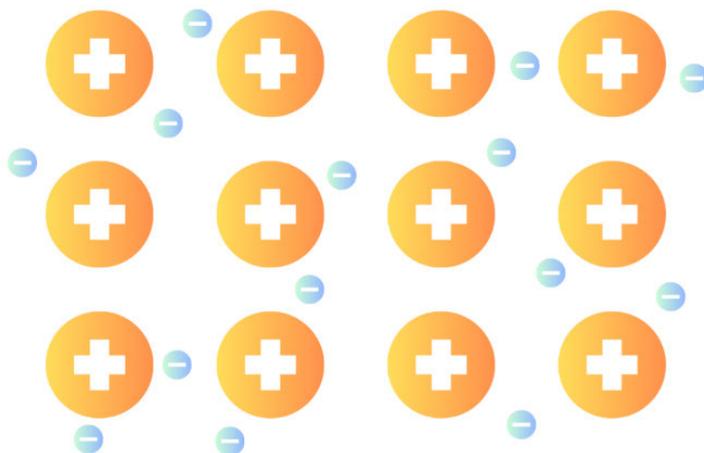


Abbildung 1. Elektronengasmodell

Hohe Festigkeit

Metalle sind stabil, da die Atomrümpfe sehr regelmäßig angeordnet sind und starke Anziehungskräfte zwischen den negativ geladenen Elektronen und den positiv geladenen Atomrümpfen wirken.

Metallischer Glanz

Metallischer Glanz entsteht dadurch, dass das Elektronengas die Atomrümpfe umgibt, wodurch die Lichtwellen immer auf ein Elektron treffen, welches diese vollständig reflektiert. [2]

Plastische Verformbarkeit

Die Ausübung von Druck führt dazu, dass die positiv geladenen Atomrümpfe verschoben werden. Dadurch rücken diese teilweise näher zusammen, sodass sie sich abstoßen müssten. Das Elektronengas verhindert dies und sorgt dafür, dass die Atomrümpfe zusammengehalten werden. Somit kommt es nicht direkt zum Bruch. [2]

Elektrische Leitfähigkeit

Elektrische Leitfähigkeit liegt vor, wenn es in dem Stoff frei bewegliche Ladungsträger gibt. In den Metallen sind dies die Elektronen. Beim Anlegen einer elektrischen Spannung wandern die Elektronen dabei zum Pluspol. Über den Minuspol gelangen wieder Elektronen zurück in das Metallgitter, sodass die Anzahl der Elektronen im Metallgitter gleichbleibt. [2]

Thermische Leitfähigkeit

Wärme ist die Bewegungsenergie von Teilchen. Wird die Temperatur lokal erhöht, fangen die Atomrümpfe in diesem Gebiet an zu schwingen. Diese kollidieren dann mit den frei beweglichen Elektronen, welche dadurch auch stärker in Bewegung gesetzt werden. Die Elektronen wiederum übertragen die Bewegungen auf weitere Atomrümpfe, wodurch sich die Energieübertragung allseitig durch den ganzen Körper fortsetzt. [2]

2.2 Werkstofftechnik der Kunststoffe

Kunststoffe, oder auch Polymere genannt, sind hochmolekulare organische Stoffe, die durch chemische Verkettungsreaktionen niedermolekularer Verbindungen hergestellt werden. Dies kann synthetisch in der Erdöl-, Erdgas- und Kohlechemie oder durch Abwandlung von Naturprodukten, wie beispielsweise Celluloid, erfolgen. Kunststoffe weisen folgende Eigenschaften auf:

- niedrige Dichte,
- hohe spezifische Festigkeit (Verhältnis von Festigkeit zu Dichte),
- sehr gute Verarbeitbarkeit und
- gute chemische Beständigkeit.

Diese und weitere Eigenschaften, wie zum Beispiel Zähigkeit oder Temperaturbeständigkeit, können durch die Struktur der Polymere, den Grad der räumlichen Vernetzung der Moleküle und der Beimischung von Zusatzstoffen, beziehungsweise die Vermischung verschiedener Polymere, variiert werden. [1, S. 298]

Kunststoffe bestehen aus Makromolekülen, welche durch chemische Verkettungsreaktionen (Polymerisation, Polyaddition, Polykondensation) von Monomeren erzeugt werden. Monomere sind niedermolekulare C-Verbindungen, welche mit anderen Elementen, wie beispielsweise H, N, O und F, Bindungen eingehen. Diese beruhen auf der Bildung gemeinsamer Elektronenpaare, auch Atombindung genannt. [1, S. 299]

Auswirkungen auf die Eigenschaften der Polymere haben neben den verschiedenen Bindungspartnern auch die räumliche Anordnung der Moleküle, beziehungsweise der Vernetzungsgrad. Dazu gehören die Art der chemischen Bindung zwischen den Makromolekülen, sowie der Abstand und die Ausrichtung dieser. Die Anordnung variiert je nach Hauptgruppe der Polymere. Folgende drei Hauptgruppen gibt es:

- Thermoplaste,
- Duroplaste und
- Elastomere. [1, S. 302]

Thermoplaste

Thermoplaste sind unvernetzte und teilweise verzweigte Polymere aus langen fadenförmigen Makromolekülen. Die Moleküle halten durch mechanische Verschlaufungen, siehe Abbildung 2, und chemische Nebervalenzbindungen, wie zum Beispiel Dipolkräfte, zusammen. Durch ansteigende Temperaturen vergrößert sich der Abstand der Moleküle, was eine Verringerung der Nebervalenzbindung mit sich zieht. Aufgrund dieser und der Tatsache, dass thermoplastische Polymere unvernetzt sind, ist ein reversibles Aufschmelzen möglich. [1, S. 302 f.]

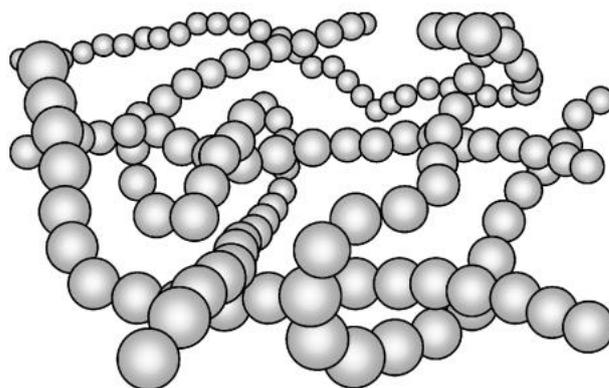


Abbildung 2. Thermoplast [1, S. 302]

Duroplaste

Grundsätzlich treten zwischen den Makromolekülen bei Duroplasten auch Verschlaufungen und Nebervalenzbindungen auf. Allerdings kommt es hier zusätzlich zu einer Ausbildung von Hauptvalenzbindungen zwischen den Molekülen, wodurch sich diese stark engmaschig räumlich vernetzen (Abbildung 3). Der Vernetzungsprozess wird (Aus-)härten bezeichnet. Die starken Atombindungen zwischen den Molekülen bewirken

eine hohe Festigkeit und Sprödigkeit. Duroplaste sind nicht mehr plastisch verformbar, wenn sie ausgehärtet, d. h. vernetzt sind, sodass ein Aufschmelzen nicht möglich ist. Wird die Temperatur zu stark erhöht, kommt es zu einer thermischen Zersetzung. [1, S. 303]

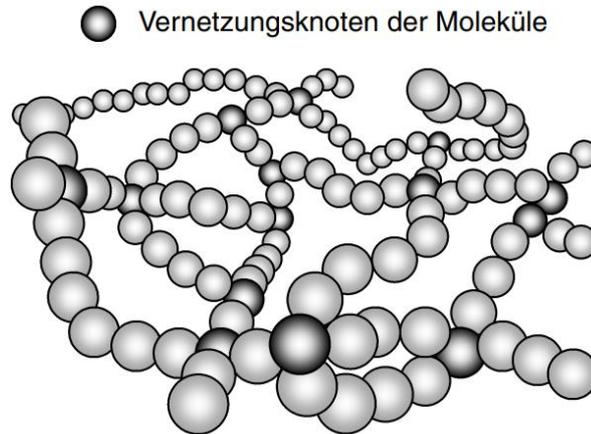


Abbildung 3. Duroplast [1, S. 303]

Elastomere

Die Struktur der Elastomere ist eine Kombination aus den Strukturen der Thermo- und Duroplaste. Sie sind stark verknäulte Polymere mit einer weitmaschigen räumlichen Vernetzung, siehe Abbildung 4. Die Makromoleküle werden sowohl von mechanischen Verschlaufungen und Nebervalenzbindungen als auch durch wenige Hauptvalenzbindungen zwischen den Ketten zusammengehalten. Ein Abgleiten der Molekülketten, also sehr große elastische Verformungen, sind temperaturbedingt möglich. Hingegen ist eine plastische Verformung oder ein Aufschmelzen aufgrund der Vernetzung nicht möglich. [1, S. 304]

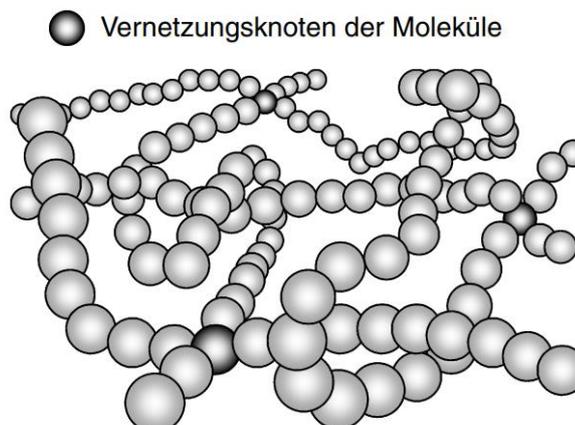


Abbildung 4. Elastomer [1, S. 304]

Duroplaste und Elastomere sind immer amorph, d.h. die Makromoleküle liegen ungeordnet vor. Thermoplaste hingegen können sowohl amorph als auch teilkristallin, sprich sowohl ungeordnet als auch regelmäßig gleichzeitig vorliegen, siehe Abbildung 5. Amorphe Thermoplaste weisen glasähnliche Eigenschaften im harten Zustand auf. Dieser Zustand wird bei bestimmten Temperaturen, dem Glasbereich, erreicht. Der thermoplastische Kunststoff ist in diesem Bereich spröde, transparent, hart und chemikalienunbeständig. Ein amorpher Thermoplast ist beispielsweise Polycarbonat (PC).

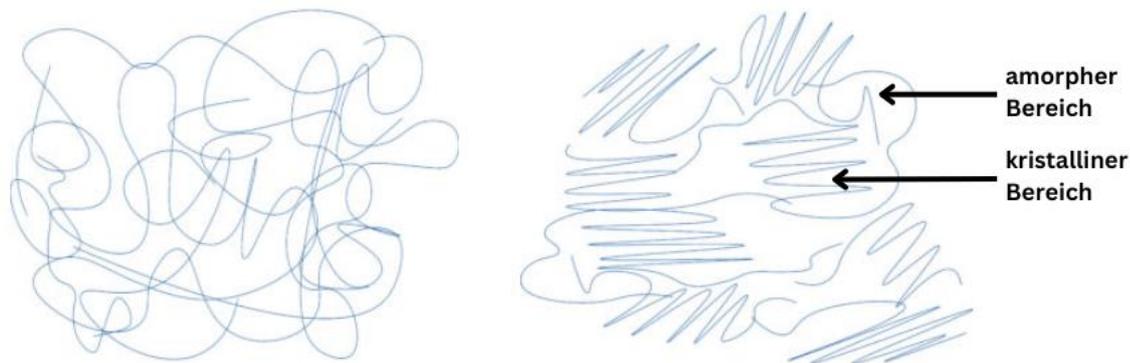


Abbildung 5. Links: amorpher Thermoplast, rechts: teilkristalliner Thermoplast [vgl. 3]

Die Nebervalenzbindungen oder auch eine langsame Abkühlung bei der Erstarrung begünstigen bei Thermoplasten den gleichmäßigen Aufbau der Makromoleküle und somit den kristallinen Anteil. Im Vergleich zu den amorphen ungeordneten Bereichen, sind die Makromoleküle in den kristallinen Bereichen parallel ausgerichtet, wodurch sich der Abstand der Makromoleküle verringert. Dadurch werden die Nebervalenzbindungen verstärkt, was zu einer Steigerung von Festigkeit, E-Modul und Dichte führt.

Somit bestimmt das Verhältnis der amorphen zu den kristallinen Anteilen die Eigenschaften der teilkristallinen Thermoplaste. Zu diesen gehören beispielsweise Polyamid 6 (PA 6), Polyamid 66 (PA 66) und Polypropylen (PP). [1, S. 304 f., 3]

2.3 Verbundwerkstoffe

Verbundwerkstoffe sind insbesondere für den Leichtbau eine gute Alternative zu Metallen und Kunststoffen. Hier kommt es auf eine hohe Steifigkeit und Festigkeit bei gleichzeitig geringer Masse der Bauteile an. Verbundwerkstoffe bestehen aus mindestens zwei Werkstoffen, die der gleichen oder verschiedenen Werkstoffhauptgruppen angehören können. Dabei bildet eine Komponente die Grundsubstanz, also die Matrix, in welcher der andere Stoff, die Verstärkungsphase, eingebettet ist. Diese verstärkt die Matrix und hebt sie auf ein höheres mechanisches Niveau an. [1, S. 333 ff.] Folgende Ziele werden dadurch verfolgt:

- die Erhöhung von Festigkeit und Steifigkeit,
- die Erhöhung von Härte, Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit,
- die Anpassung von elektrischer und thermischer Leitfähigkeit, sowie
- die Anpassung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten. [4, S. 23]

Die Verstärkungsphase ist dispers, da sie chemisch und/oder physikalisch durch die umhüllende Matrix getrennt wird, siehe Abbildung 6. Somit erscheinen Verbundwerkstoffe makroskopisch homogen, sind aber mikroskopisch heterogen. Die beiden Phasen werden durch thermisches und/oder mechanisches Fügen im Laufe des Herstellungsprozesses miteinander verbunden. Als wichtigstes Matrixmaterial dienen dabei die Kunststoffe, zumeist Duroplaste, neben den Metallen und Keramiken. Die Matrix kann mit den Verstärkungsarten Teilchen- oder Faserverstärkung versehen werden. [1, S. 333 ff.] Faserverstärkungen können in:

- Kurzfaserverstärkung ($\approx 0,2$ mm Faserlänge),
- Langfaserverstärkung (bis 25 mm Faserlänge) und
- Endlosfaserverstärkung (ununterbrochene Faserverstärkung über das Bauteil) unterteilt werden. [5, S. 6]

Diese Arten, also die Verteilung und Haftung der Verstärkungsphase in der Matrix, sowie deren Werkstoffe und Verhältnis, bestimmen die Eigenschaften der Verbundwerkstoffe. Die höchsten mechanische Eigenschaften werden durch endlos gerichtete Fasern erzielt. Die Verstärkungsfasern umfassen zumeist Glasfasern, Kohlenstofffasern, Aramidfasern und Naturfasern. [6, S. 17]

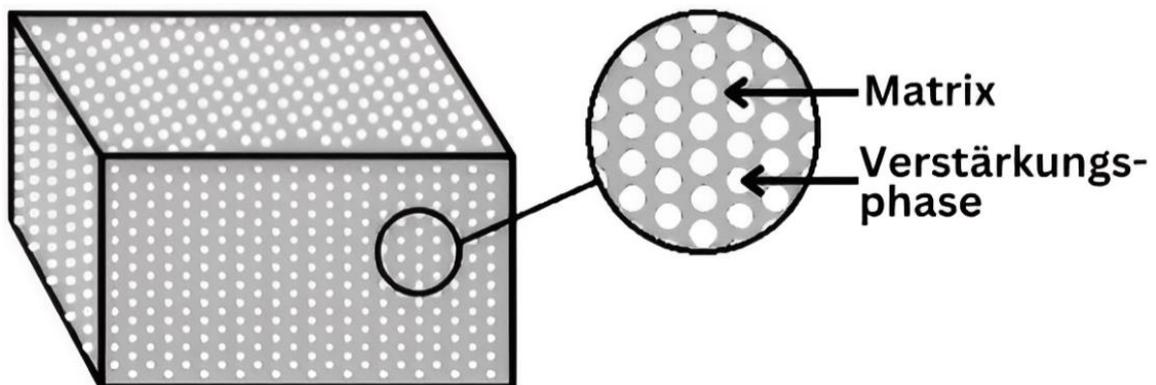


Abbildung 6. Verbundwerkstoff [vgl. 1, S. 334]

2.4 Werkstoffverbunde

Werkstoffverbunde entstehen durch das Fügen von mindesten zwei unterschiedlichen Werkstoffen. Im Gegensatz zu Verbundwerkstoffen, bei denen die Verstärkungsphase in die Matrix eingebettet wird, liegen bei Werkstoffverbunden beide Phasen gefügt nebeneinander vor, d.h. sie sind nicht miteinander vermischt (siehe Abbildung 7). Dadurch

sind sie mikroskopisch homogen, allerdings makroskopisch heterogen. [1, S. 334] In Abhängigkeit von dem Herstellungsverfahren, siehe Kapitel 3, kann man Werkstoffverbunde in Mischbauweise und hybride Verbunde unterteilen. Charakteristisch für die Mischbauweise ist, dass die beiden Phasen durch ein Fügeelement, wie eine Schraube, oder einen Zusatzwerkstoff, zum Beispiel Klebstoff, miteinander verbunden werden. Im Gegensatz dazu kommen hybride Verbunde ohne diese aus. [4, S. 23] Der Einsatz von Werkstoffverbunden verfolgt folgende Ziele:

- Gewichtsreduzierung,
- Senkung von Materialkosten,
- Kombination werkstoffspezifischer Vorteile und
- Gewährleistung oder Steigerung von Bauteilfunktionalitäten. [7, S. 7]

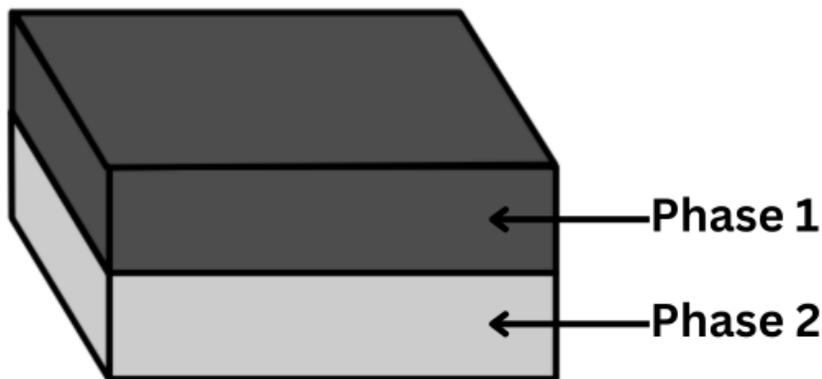


Abbildung 7. Werkstoffverbund [vgl. 1, S. 334]

3 Herstellungsverfahren für Werkstoffverbunde

Das Herstellen von Werkstoffverbunden bringt einige Herausforderungen mit sich. Geschuldet ist dies dem Kombinieren von zwei ungleichen Werkstoffklassen, in diesem Fall von Metallen mit Polymeren. Daher müssen unter anderem folgende Probleme beim Fügeprozess beachtet werden:

- die unterschiedlichen Temperaturkoeffizienten der Fügepartner,
- eine materialgerechte Krafteinleitung ist notwendig,
- zusätzliche Korrosionseffekte können auftreten und
- die Fügepartner weisen unterschiedliche Oberflächenzustände auf. [1, S. 5]

In Abhängigkeit von dem jeweiligen Herstellungsverfahren können diese Probleme völlig oder auch nur teilweise verhindert werden. Einteilen lassen sich diese Verfahren in Form-, Kraft- und Stoffschluss. Deren Eigenschaften sind in Tabelle 1 dargestellt.

Merkmal		Formschluss	Kraftschluss	Stoffschluss
Lösbarkeit		Lösbar/unlösbar	i.d.R. lösbar	i.d.R. unlösbar
Festigkeit	Statisch	Hoch	Mittel	hoch
	dynamisch	hoch	mittel	mittel
Kraftübertragung		i.d.R. lokal	i.d.R. lokal	i.d.R. vollflächig
Eigenschaftsänderung der Fügepartner		Kerbwirkung	Kerbwirkung	i.d.R. keine
Dichtheit		i.d.R. nicht mediendicht	i.d.R. nicht mediendicht	mediendicht
Korrosion	Artgleiche Werkstoffe	i.d.R. keine	i.d.R. keine	i.d.R. keine
	Artfremde Werkstoffe	Kontaktkorrosion	Kontaktkorrosion	i.d.R. keine

Tabelle 1. Eigenschaften der Verbindungen [nach 8, S. 6]

3.1 In-Mold Assembly

Das In-Mold Assembly (IMA) umfasst die Verbundherstellung durch die ur- oder umformende Verarbeitung mindestens einer der Fügepartner direkt im Prozess. Dieser ist zumeist das Hybridspritzgießen. Dadurch entsteht in einem Prozessschritt die Grenzfläche der Kunststoff-Metall-Verbindung und somit eine formschlüssige Verbindung. Vorteile die sich daraus ergeben sind:

- Die Verkürzung von Prozesszeiten und die daraus resultierende Erhöhung der Wirtschaftlichkeit im Vergleich zum Post-Mold Assembly (siehe 3.2).
- Das fertige Bauteil wird direkt hergestellt, sodass die Bestände an unfertigen Teilen vermieden wird.

- Das Spritzgießen gewährleistet eine korrekte Ausrichtung des Teiles für die spätere Montage.
- Das Verfahren ermöglicht Geometrien, welche auf herkömmliche Weise nur unter hohem Kostenaufwand hergestellt werden können. [9]

Zugleich stehen diesen folgende Nachteile entgegen:

- auftretende Schwindung bei der Abkühlung kann zu Verzug und Eigenspannungen führen und
- bei abwechslungsreichen Geometrien werden entsprechend neue Werkzeuge benötigt, was das IMA unflexibel macht. [9]

3.1.1 Insert-Prozess

Der Insert-Prozess ist ein Spritzgussverfahren, bei welchem der Kunststofffügepartner gewichts- und volumenmäßig überwiegt und somit als tragende Struktur dient. In diese werden, für eine lokale Einleitung hoher Kräfte, metallische Einleger integriert und unter hohem Druck mit dem geschmolzenen Kunststoff umspritzt. Dadurch entsteht ein Formschluss. Der Druck führt dazu, dass die Form vollständig gefüllt wird. Die Luft wird dabei über Lüftungsöffnungen verdrängt und abgesaugt. Die Einleger müssen vor dem Umspritzen fixiert werden, sodass sie ihre Ausrichtung beibehalten und eine fehlerhafte Formfüllung oder unzureichende Einbindung der Einleger vermieden werden kann. Nach dem Umspritzen ist es wichtig, dass die Form auf einer bestimmten Temperatur gehalten und ein Haltedruck aufrechterhalten wird. Dies dient dazu eine gleichmäßige Erstarrung zu ermöglichen und Schrumpfungseffekte zu reduzieren. [7, S. 27]

3.1.2 Outsert-Prozess

Der Einleger bei der Outsert-Technik ist zumeist eine Trägerplatine aus Blech. In diese sind Aufnahmelöcher eingestanz, in welche Funktions- und Verbindungselemente gespritzt werden. Diese umfassen beispielsweise Lager, Gleitschienen, Schnappverbindungen, Anschläge und Einschraubungen. Auch hier entsteht, wie beim Insert-Prozess, ein Formschluss zwischen Trägerplatine und aufgespritztem Kunststoff. Die Metallkomponente weist hier das größere Volumen auf und bestimmt somit die strukturellen Bauteileigenschaften. Die hohe Festigkeit und der hohe Elastizitätsmodul des metallischen Einlegeteils werden dabei mit der großen Gestaltungsfreiheit des Kunststoffs kombiniert. So lassen sich großflächige und steife Bauteile herstellen. [7, S. 27; 10, S. 2 f.]

3.1.3 Folienhinterspritzen

Das Folienhinterspritzen, auch In-Mold-Decoration (IMD) genannt, ist ein Fertigungsverfahren, welches Spritzgussteile mit einer Folie oder einem Lack veredelt. Dies dient dazu, die Oberflächenqualität zu verbessern oder optische Ansprüche zu erfüllen. Das IMD kann bei Verwendung einer metallischen Folie aber auch als Fertigungsverfahren für Kunststoff-Metall-Hybride dienen. Der Ablauf des Verfahrens, siehe Abbildung 8, ist wie folgt:

- 1) Die vorgewärmte Folie, bestehend aus einer Trägerfolie und der Dekorschicht, also dem zu übertragenden Material, Lack oder Muster, wird in das Spritzgießwerkzeug eingelegt.
- 2) Das Werkzeug wird geschlossen, wodurch die Folie in diesem geklemmt wird. Zumeist wird die Folie bereits vorgeformt, beziehungsweise durch ein Vakuum angesaugt und fixiert, sodass eine Faltenbildung vermindert wird.
- 3) Danach erfolgt der Spritzprozess, in welchem die Kunststoffschmelze in das Werkzeug gespritzt wird. Die Dekorschicht der Heißprägefolie verbindet sich durch die hohe Temperatur der Schmelze mit dem eingespritzten Kunststoff.
- 4) Nach dem Abkühlen des Spritzgussteils kann dieses aus dem Werkzeug entnommen werden. Die Dekorschicht löst sich dabei von der Trägerfolie. Anschließend wird das Teil nachbearbeitet und die überschüssige Folie entfernt. [11]

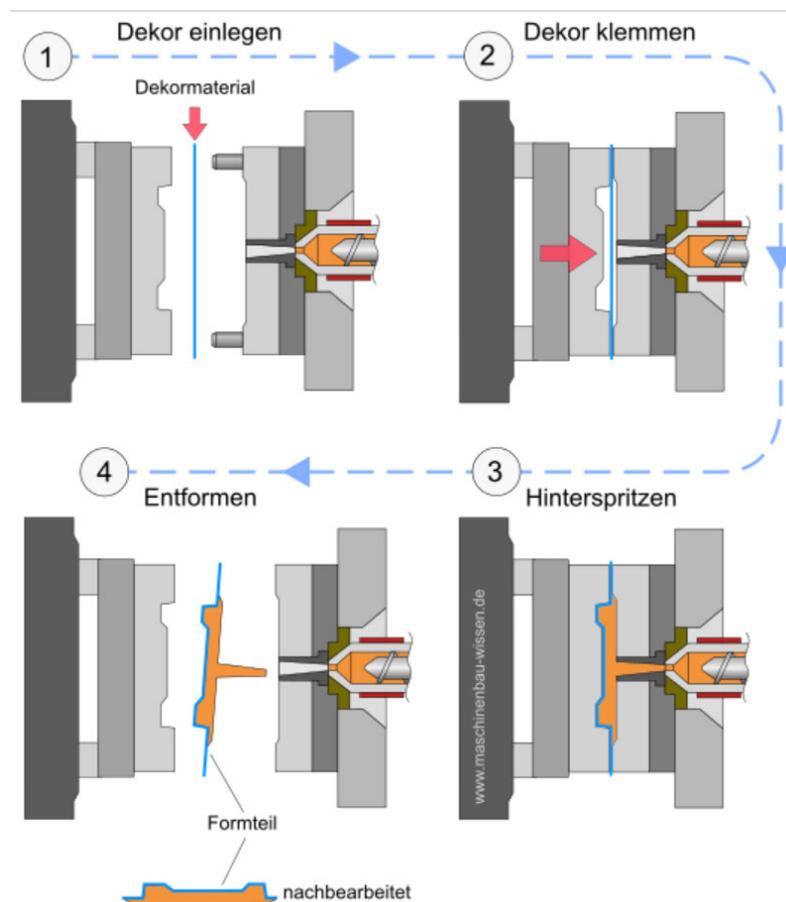


Abbildung 8. Prozess des Folienhinterspritzens [11]

Der größte Vorteil des Folienhinterspritzens liegt, wie bei dem Insert- und Outsert-Prozess, darin, dass die Kunststoff-Metall-Verbindung in einem Prozessschritt entsteht.

Weitere Vorteile sind:

- Kosteneffizienz in Form von Zeit und Ressourcen [12],
- Größere Designflexibilität [12],
- Edle Oberflächenoptik,
- Geschlossene Oberfläche, die gereinigt werden kann,
- Vielfältiger Einsatz von Materialien möglich,
- Sekundäre Beschichtungen sind nicht erforderlich.

Nachteilig hingegen ist:

- Die Auslegung des Spritzgusswerkzeuges ist zu beachten, da schlecht konstruierte Trennungslagen oder eine falsche Angusslage beispielsweise zum Einreißen oder zu Faltenbildung der Folie führen können.
- Das Verfahren ist nicht für Formen mit starker 3D-Geometrie geeignet, da die Folie nur eingeschränkt dehnbar ist. [13]

3.2 Post-Mold Assembly

Das Post-Mold Assembly ist das Fügen der beiden Materialkomponenten nach der Fertigstellung der einzelnen Halbzeuge. Es erfolgt demnach in einem nachträglichen, das heißt zeitlich und räumlich getrennten, Prozessschritt. [8, S. 7] Vorteile die sich daraus ergeben sind:

- Eine erhöhte Gestaltungsfreiheit der Konstruktion,
- Eine bessere Funktionsintegration,
- Eine beanspruchungsgerechte Konstruktion und
- Größere Blechdickentoleranzen.

Diese Vorteile ergeben sich daraus, dass metallische Bauteile zum Beispiel in Spritzgusswerkzeugen nicht positionsgenau platziert werden müssen. Dadurch werden geringere Anforderungen an die Werkzeugauslegung gestellt. [8, S. 7] Durch einen zusätzlichen Fertigungsschritt beim Fügen wird die Wirtschaftlichkeit allerdings gesenkt.

3.2.1 Mechanisches Fügen

Eine mechanische Verbindung wird meist durch Vorbohren und Durchsetzen eines Fügeelementes, wie zum Beispiel einer Schraube oder einem Niet, hergestellt. Im Überlappstoß entsteht dann eine kraft- und oder formschlüssige Verbindung. [8, S. 7 f.] Die Verbindungsart ist hierbei abhängig von dem jeweiligen Prozess. Zu den geläufigsten mechanischen Fügeverfahren zählen unter anderem:

- das Nieten,
- das Schrauben,
- das Clinchen,
- das Kragenfügen und
- Schnappverbindungen.

Im Vergleich zu den thermischen (siehe 3.2.2) und den adhäsiven Fügeverfahren (siehe 3.2.3) weisen die mechanischen Fügeverfahren im Allgemeinen folgende Vorteile auf:

- Kurze Prozesszeiten,
- Lange Haltbarkeit bei korrekter Auslegung,
- Punktueller Fügen möglich,
- Unter anderem lösbare Verbindungen (Schrauben), daher Wiederverwendbarkeit möglich,
- Hohe Temperaturbeständigkeit und
- Krafterleitung über die gesamte Bauteildicke. [8, S. 8]

Nachteile hingegen sind:

- Ist ein Vorbohren notwendig, kommt es zur Schwächung des Bauteils durch Kerbwirkung.
- Bei faserverstärkten Kunststoffen kommt es zu einer Faserschädigung. Auch diese wirken wie Kerben und führen zur Festigkeitsminderung.
- Galvanische Korrosion (Kontaktkorrosion) kann durch das Freilegen der Kohlenstofffasern von faserverstärkten Kunststoffen infolge des mechanischen Fügeprozesses bei Feuchtigkeitseintritt ausgelöst werden.
- Für die Fügelemente ist ausreichend Bauraum erforderlich.
- Es müssen zusätzlich Dichtungen integriert werden, wenn die Verbindung medienbeständig sein soll.
- Je nach Verfahren sind Fügehilfselemente notwendig, die das Gewicht zusätzlich erhöhen und negative Auswirkungen auf aerodynamische Eigenschaften. [8, S. 8 f.]

Nieten

Unter Nieten versteht man das Verbinden von zwei dünnwandigen Bauteilen mit Hilfe eines metallischen Zusatzelementes, mit einem Niet. Ist das Werkstück nur einseitig zugänglich, so wird das Blindnieten, siehe Abbildung 9 links, verwendet.

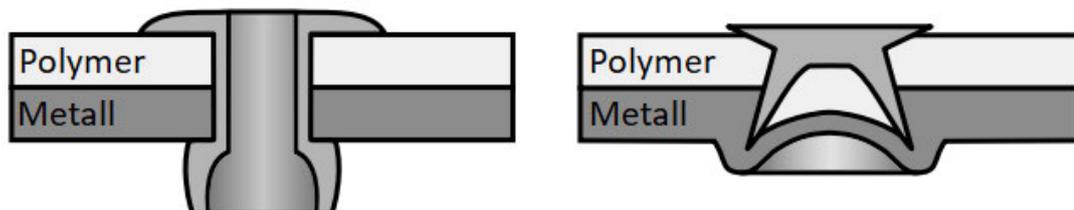


Abbildung 9. Links: Blindnieten, rechts: Stanznieten [vgl. 4, S. 29]

Benötigt wird dafür eine Nietpistole, in welche der Nietdorn geschoben wird. Der eigentliche Niet wird durch eine Durchgangsbohrung durch beide Bauteile gesteckt. Durch den entstehenden Druck beim Abzug der Nietpistole wird der Nietdorn durch den Schaft

des Niets gezogen und verformt diesen dabei auf der Rückseite der Fügestelle. Dadurch entsteht eine form- und kraftschlüssige Verbindung. Sind die Bauteile beidseitig zugänglich, kann das Stanznieten, siehe Abbildung 9 rechts, verwendet werden. Vorteilhaft ist hierbei, dass kein Vorbohren der Fügepartner notwendig ist, da der Niet beide Fügepartner durchstanzt und sich in diesen verspreizt. Dadurch entsteht auch hier eine form- und kraftschlüssige Verbindung. Eine Nietverbindung ist zerstörungsfrei nicht wieder lösbar. [4, S. 29]

Schrauben

Das Schrauben stellt eine kraftschlüssige und lösbare Verbindung her. Diese kann wie folgt realisiert werden:

- Durch eine Durchgangsbohrung durch beide Fügepartner. Die Schraube wird durch die Bohrung gesteckt und auf der Gegenseite mit einer Mutter verspannt und gesichert.
- Durch eine Direktverschraubung, zu sehen in Abbildung 10. Die Schraube schneidet hierbei das Gewinde in das duktile Polymer während der Montage. Eine Schraubensicherung ist meistens nicht notwendig.
- Durch Verbindung von Schrauben mit im Urformprozess eingebrachten Gewinden im Polymer oder metallischen Gewindebuchsen.

Schraubverbindungen zeichnen sich durch eine hohe Wirtschaftlichkeit aus. Darüber hinaus sind der Werkstoffkombination kaum Grenzen gesetzt. [4, S. 30]

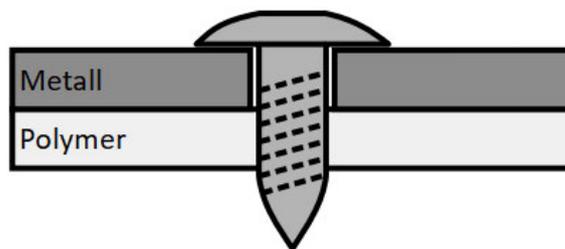


Abbildung 10. Schrauben [vgl. 4, S. 29]

Clinchen

Beim Clinchen werden die Fügepartner durch einen Fügestempel in eine Matrize gedrückt und plastisch verformt. Das untere Fügepartner wird dabei gestaucht, wodurch eine ringförmige Hinterschneidung entsteht. In diese fließt das Material des oberen Fügepartners hinein, sodass eine kraft- und formschlüssige Verbindung in einem Prozessschritt entsteht. Matrizenständig entsteht somit eine Überhöhung der Fügestelle, wodurch solche Verbindungen nicht in Sicht- oder Funktionsbereichen eingesetzt werden. An der TU Chemnitz wurde dafür das Flach-Clinchen entwickelt, für welches an Stelle der Matrize ein planer Amboss als Gegenwerkzeug verwendet wird, siehe Abbildung 11. Dadurch können einseitig ebene Clinch-Verbindungen hergestellt werden [14].

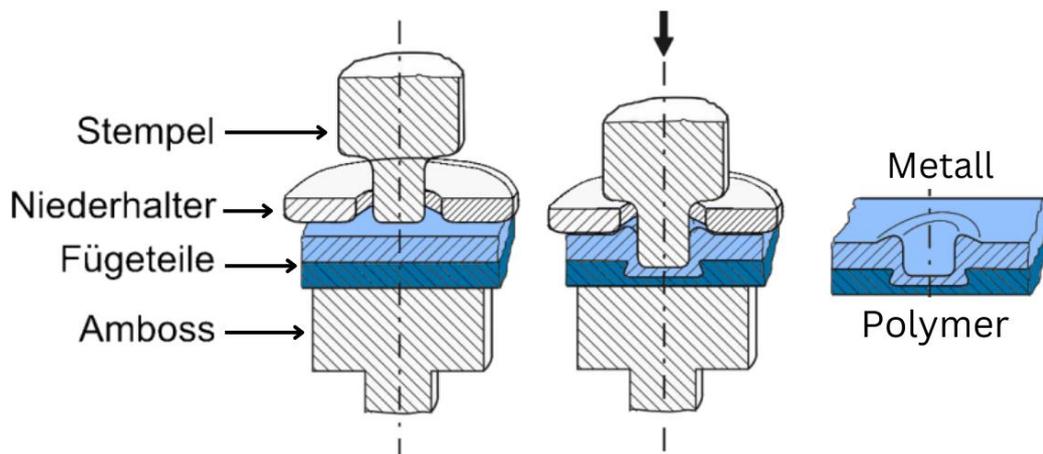


Abbildung 11. Flach-Clinchen [14]

Kragenfügen

Der Ausgangspunkt beim Kragenfügen ist ein vorgebohrtes Blech. In die Bohrung des Bleches wird ein Stempel gedrückt, welcher den Kragen in das Metallfügeteil zieht. Dieser Kragen wird anschließend in das Kunststoffteil, unabhängig davon, ob dieses unverstärkt oder verstärkt ist, eingepresst. Dadurch ergibt sich ein fester formschlüssiger Verbund zwischen den beiden Fügepartnern, siehe Abbildung 12. Zur Festigung des Formschlusses dienen Hinterschnitte, welche bei der Kragenherstellung erzeugt werden. [15, S. 112]

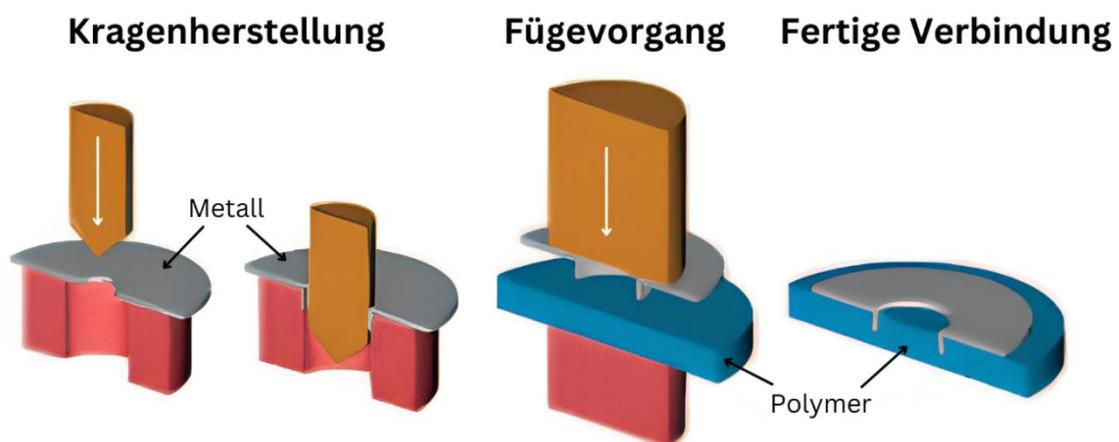


Abbildung 12. Kragenfügen [vgl. 15, S. 111]

Schnappverbindungen

Bei Schnappverbindungen ist ein Federelement Bestandteil des Kunststoffteils. Dieses Federelement ist mit einem Hinterschnitt versehen und wird in einen Hinterschnitt, beispielsweise in einen Durchbruch, des Metallteils gesteckt. Dabei verformt es sich elastisch. Nach dem Aneinandervorbeibewegen der beiden Hinterschnitte wird das Federelement entspannt und „schnappt“ ein, siehe Abbildung 13. Dadurch entsteht eine

formschlüssige Verbindung, welche allerdings nur für geringe Festigkeitsanforderungen geeignet ist. [4, S. 30]

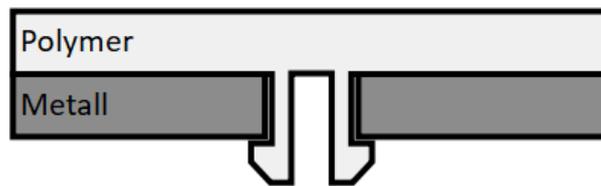


Abbildung 13. Schnappverbindung [vgl. 4, S. 29]

Jedes mechanische Fügeverfahren bringt seine Vor- und Nachteile mit sich, welche je nach Anwendungsfall abgewogen werden müssen. Die Tabelle 2 vergleicht die vorgestellten Verfahren miteinander, hinsichtlich verschiedener Eigenschaften, wie beispielsweise Festigkeit und Kosten.

	Stanznieten	Blindnieten	Schrauben	Schnappen	Heißnieten	Kragenfügen
Festigkeit	+	+	+	0	0	0 / +
Spielfreiheit	+	+	+	0	-	+
Wiedermontage	-	-	+	+	-	-
Toleranzanforderungen	+	-	-	0	-	+
Fertigungszeit	+	+	+	+	-	+
Kosten	-	-	-	+	0	+
+ günstig 0 mittel - ungünstig						

Tabelle 2. Vergleich verschiedener mechanischer Fügeverfahren [15, S. 113]

3.2.2 Thermisches Fügen

Konventionelle Fügeverfahren für Metallverbindungen, wie das Schweißen, sind bei Metall-Kunststoff-Kombinationen nicht möglich. Dies liegt beispielsweise an den sehr unterschiedlichen Schmelztemperaturen der beiden Werkstoffe. Dennoch sind Metalle und Kunststoffe thermisch ffügbar, mittels des thermischen Direktfügens oder auch Wärmeleitungsfügen genannt. Bei diesem Verfahren wird der thermoplastische Kunststoff unter Wärmeeinbringung durch Überschreiten der Schmelztemperatur an der Grenzfläche plastifiziert und der metallische Fügepartner unter Druck mit dem schmelzflüssigen Kunststoff benetzt. Die Fügepartner werden dabei im Überlappstoß gefügt unter

Voraussetzung der beidseitigen Zugänglichkeit. Der Kunststoff erstarrt unter Aufrechterhaltung des Fügedrucks, sodass zum Beispiel die Bildung von Hohlräumen vermieden werden kann. Nach der Abkühlung sind beide Werkstoffe form- sowie stoffschlüssig miteinander verbunden. Haftvermittelnde Zusatzstoffe sind dafür nicht notwendig. Eine Oberflächenvorbehandlung des Metallpartners kann jedoch notwendig sein, um die Adhäsion der Fügepartner zu verbessern [16, S. 9 f.].

Das thermische Direktfügen ist eine ressourcenschonende Technologie, da die Verbindungen mediendicht sind, der Prozess kurze Taktzeiten besitzt und sich gut automatisieren lässt. Zudem sind die Verbindungen langzeitstabil und hochbelastbar.

Die benötigte Wärmezufuhr zum Schmelzen des Thermoplastes kann auf verschiedene Weise zugeführt werden. Das Ultraschallfügen, das Induktionsfügen und das Laserstrahlfügen werden im Folgenden kurz erläutert.

Ultraschallfügen

Die Prozesswärme wird beim Ultraschallfügen über Reibung zwischen den Fügeteilen eingebracht. Dazu wird ein hochfrequenter Wechselstrom angelegt, welcher in mechanische Schwingungen gleicher Frequenz gewandelt wird. Diese werden über eine Sonotrode senkrecht zur Fügezone unter Krafteinwirkung auf die Verbundpartner übertragen, siehe Abbildung 14. Dadurch entsteht Reibungswärme, welche den thermoplastischen Kunststoff plastifiziert und teilweise auch das Metall aufschmelzt. Durch den hohen lokalen Energieeintrag können sehr kurze Fügezeiten von unter einer Sekunde realisiert werden. Dementsprechend müssen auch die Prozessparameter, beispielsweise auf die Materialdicken, genau abgestimmt werden. [4, S. 33]

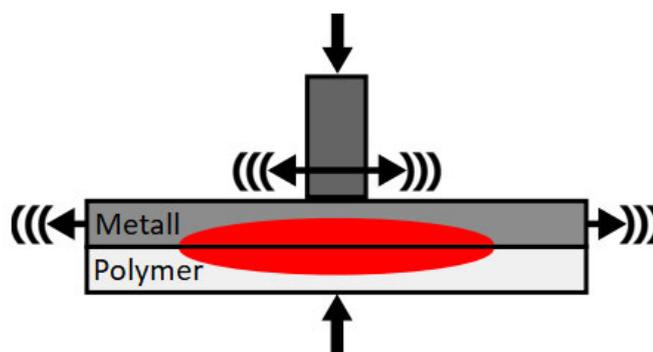


Abbildung 14. Ultraschallfügen [vgl. 4, S. 33]

Induktionsfügen

Die Prozesswärme wird beim Induktionsfügen über eine Spule eingebracht, siehe Abbildung 15. Diese wird von einem Wechselstrom durchflossen, wodurch ein elektromagnetisches Wechselfeld erzeugt wird, welches leitfähige Stoffe in den Fügepartner erwärmt. Diese können beispielsweise die metallische Komponente selbst, Beschichtungen auf dieser oder Faserverstärkungen im Kunststoff sein. Wird die Spule

nah an den Fügeteilen positioniert, so lassen sich auch bei diesem Verfahren kurze Fügezeiten von unter einer Minute realisieren. [4, S. 32 f.]

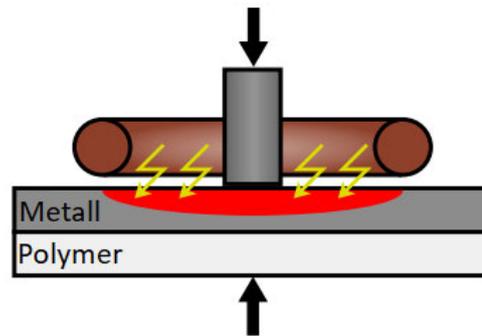


Abbildung 15. Induktionsfügen [vgl. 4, S. 33]

Laserstrahlfügen

Das Laserstrahlfügen gibt es in zwei Varianten: dem Laser-Wärmeleitungsfügen, beziehungsweise der Direktbestrahlung und dem Laser-Durchstrahlfügen. Beim Laser-Wärmeleitungsfügen, siehe Abbildung 16 links, wird die Oberfläche des metallischen Fügepartners von einem Laser mit hoher Energie bestrahlt. Ist der Thermoplast ausreichend transmissiv kann das Laser-Durchstrahlfügen, siehe Abbildung 16 rechts, ebenfalls zum Einsatz kommen. Hierbei kann der Laserstrahl durch den Kunststoff hindurch direkt auf die Grenzfläche zum Metall treffen. Die elektromagnetische Energie wird zum größten Teil reflektiert und zu einem geringen Teil von der Oberfläche des Metalls absorbiert und in thermische Energie umgewandelt. Der Thermoplast wird in Folge der Wärmeleitung aufgeschmolzen und dringt in die Oberflächenstrukturen des Metalls ein. Das Laser-Durchstrahlfügen ist ein einstufiger Prozess, da das Erwärmen und der Fügevorgang gleichzeitig stattfinden. Wie auch bei den anderen Verfahren lassen sich beim Laserfügen kurze Fügezeiten realisieren. Eine punktförmige Verbindung dauert hier aufgrund der hohen Energiedichte unter zehn Sekunden. [4, S. 32; 17, S. 35]

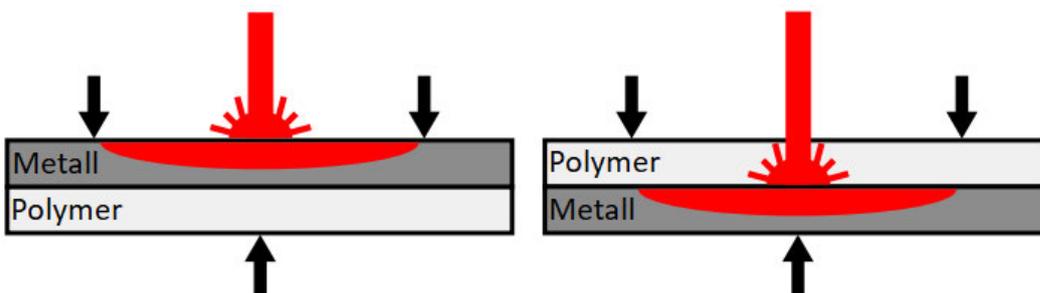


Abbildung 16. Links: Laser-Wärmeleitungsfügen, rechts: Laser-Durchstrahlfügen [vgl. 4, S. 33]

3.2.3 Adhäsives Fügen

Unter dem adhäsiven Fügen versteht man das Kleben, welches das „Verbinden von Fügeteilen über Adhäsion (Oberflächenhaftung) und Kohäsion (innere Festigkeit) mit einem nichtmetallischen Stoff (Klebstoff)“ [18, S. 6] umfasst. Es handelt sich hierbei um ein stoffschlüssiges Fertigungsverfahren, da die Verbindung unter Zugabe eines gesonderten Werkstoffes erfolgt.

Adhäsion

Das Wort Adhäsion bedeutet übersetzt „an etwas hängen oder haften“ und beschreibt somit die Haftung eines Stoffes an einem Anderen. Zurückzuführen ist dies auf den inneren Aufbau von Werkstoffen. Diese bestehen aus Atomen und Molekülen, welche sich aufgrund elektrischer Kräfte anziehen. An der Oberfläche des Werkstoffes sind jedoch keine stoffeigenen Teilchen mehr vorhanden, mit denen der Werkstoff diese Kräfte eingehen kann. Aus diesem Grund kommt es zu Bindungen, sogenannten Dipolkräften, mit anderen Stoffen. Eben solche Kräfte gehen auch von dem Klebstoff aus, sodass sich dieser und das Bauteil gegenseitig anziehen, siehe Abbildung 17. Dies wird auch als spezifische Adhäsion bezeichnet. Die Dipolkräfte wirken allerdings nur in einem Bereich von 10^{-5} Millimetern. Die Adhäsionskräfte zwischen Bauteil und Klebstoff können nur dann zum Tragen kommen, wenn das Werkstück nicht bereits andere Kräfte, beispielsweise mit Staubpartikeln, eingegangen ist. Aus diesem Grund sind vor dem Kleben die Oberflächen immer zu reinigen. [19, S. 69 ff.]

Neben der spezifischen Adhäsion gibt es noch die mechanische Adhäsion. Diese beruht auf einer formschlüssigen Verbindung zwischen dem Bauteil und dem Klebstoff. Demnach dringt der Klebstoff im flüssigen Zustand in die Oberflächenstruktur des Fügepartners ein. Härtet er aus verankert er sich somit in den Poren, Kapillaren oder Hinterschneidungen des Bauteils, siehe Abbildung 17. Demnach ist es vorteilhaft eine Oberflächenvorbehandlung der Bauteile durchzuführen. Dadurch wird die Oberfläche strukturiert, sodass eine Oberflächenvergrößerung stattfindet. Durch diese können sowohl spezifische als auch mechanische Adhäsion besser zum Tragen kommen, wodurch die Klebfestigkeit gesteigert wird. [20, S. 332]

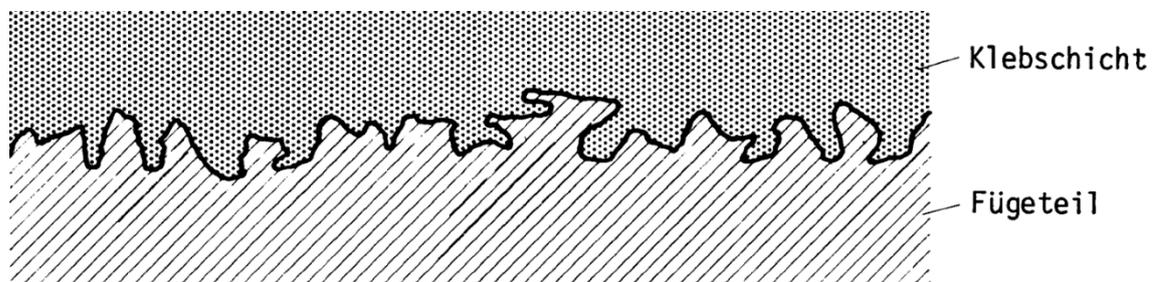


Abbildung 17. Mechanische Adhäsion [20, S. 333]

Kohäsion

Damit feste Verbunde durch das Kleben erreicht werden können, reichen die Adhäsionskräfte nicht aus. Auch der Klebstoff muss eine gewisse innere Festigkeit aufweisen, siehe Abbildung 18. Diese wird als Kohäsion, was „sich gegenseitig anziehen“ bedeutet, bezeichnet. Die Kohäsion wird durch das Aushärten des Klebstoffes erreicht, wodurch ein Verschieben der beiden Füge­teile nicht mehr möglich ist. Je größer die Kohäsionskräfte des Klebstoffes sind, desto größer ist auch seine Formbeständigkeit. Demnach ist es wichtig, dass diese Kräfte auf der gesamten Klebefläche gleichmäßig vorhanden sind. Somit muss beispielsweise auf das richtige Mischungsverhältnis des Klebstoffes und auf die Vermeidung von Luftblasen in der Klebschicht geachtet werden. [19, S. 75 f.] Zusätzlich zum Klebstoffauftrag sind die Kohäsionskräfte von der Aushärtetemperatur und -zeit abhängig. Zudem gibt es eine optimale Klebschichtdicke, bei welcher die Kohäsion ihr Maximum erreicht. Diese liegt meist bei 0,2 mm, ist aber abhängig davon, ob elastisch geklebt oder Haftklebstoffe genutzt werden sollen. [21]

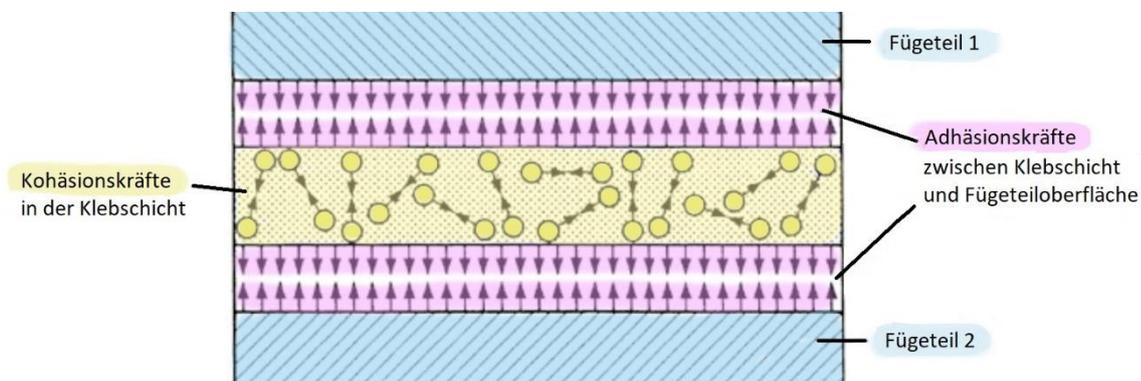


Abbildung 18. Adhäsion und Kohäsion [vgl. 19, S. 76]

Neben der Adhäsion und Kohäsion ist eine weitere Bindungskraft, die Benetzung, für eine Klebung notwendig. Mit dieser gehen die Oberflächenspannung und -energie einher.

Benetzung

Damit eine Adhäsion zwischen dem Bauteil und dem Klebstoff stattfinden kann, muss die Oberfläche mit dem Klebstoff benetzt werden. Für eine gute Benetzung ist eine niedrige Viskosität des Klebstoffes empfehlenswert, da er so besser die Oberflächenstruktur des Bauteils annehmen kann, siehe Abbildung 19. Dies begünstigt die spezifische, sowie die mechanische Adhäsion und ist demnach Voraussetzung für eine feste Klebung. [19, S. 71 f.]

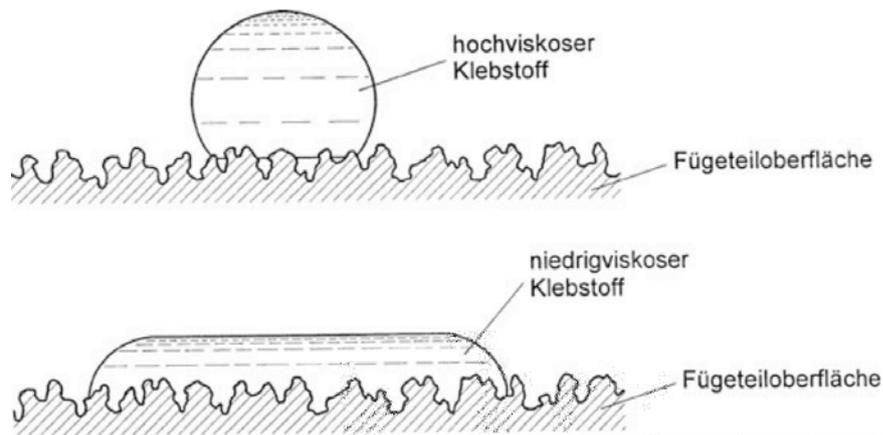


Abbildung 19. Benetzungsverhalten in Abhängigkeit von der Viskosität des Klebstoffes [19, S. 72]

In Abhängigkeit von der Viskosität des Klebstoffes und dem Benetzungsvermögen der Bauteiloberfläche kommt es zu einem Benetzungswinkel α . Je kleiner dieser ist, desto besser ist die Benetzung der Oberfläche mit dem Klebstoff. Dazu kommt es, je größer die Adhäsionskräfte mit der Bauteiloberfläche im Vergleich zu den Kohäsionskräften des Klebstoffes sind. Dabei gilt nach Abbildung 20:

- $\alpha < 30^\circ$: gute Benetzung,
- $\alpha = 90^\circ$: nicht ausreichende Benetzung und
- $\alpha \sim 180^\circ$: keine Benetzung. [19, S. 73]

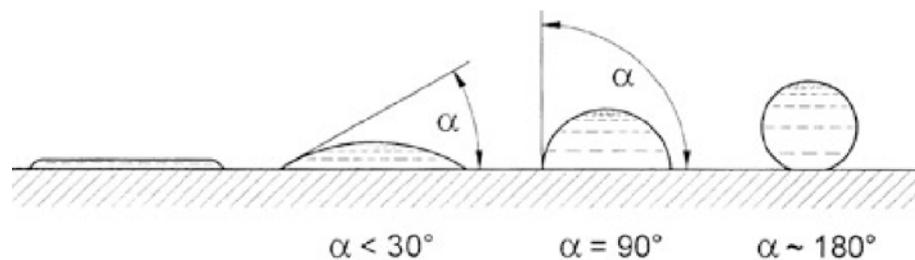


Abbildung 20. Verschiedene Benetzungswinkel [vgl. 19, S. 73]

Oberflächenspannung

Neben der Viskosität des Klebstoffes ist auch dessen Oberflächenspannung für das Benetzungsvermögen von Bedeutung. Im Inneren von Flüssigkeiten wirken gleiche Anziehungskräfte zwischen den Molekülen. An der Grenzfläche des Klebstoffes hingegen, also zur Atmosphäre, sind diese Kräfte nicht ausgeglichen. Aus diesem Grund kommt es zu einer Kraft F , welche in das Innere der Flüssigkeit gerichtet ist, und die versucht, die Moleküle ebenfalls in diese Richtung zu ziehen. Somit wird eine Verkleinerung der Oberfläche angestrebt und es kommt zur Ausbildung einer Tropfenform. Diese Form bestimmt den Benetzungswinkel und somit die Benetzung. Auch Festkörper besitzen eine

Oberflächenspannung, welche visuell nicht erkennbar ist, da hier keine reversible elastische Verformung der Grenzfläche möglich ist. Wenn die Oberflächenspannung des Festkörpers größer als die des Kunststoffes ist, ist der Benetzungswinkel $\alpha < 30^\circ$, sodass eine gute Benetzung vorliegt. [19, S. 73 f.; 20, S. 337 f.]

Oberflächenenergie

Während die Verkleinerung der Oberfläche durch die Oberflächenspannung charakterisiert ist, wird auch zur Oberflächenvergrößerung eine bestimmte Energie, die Oberflächenenergie, benötigt. Diese Energie beruht darauf, dass die inneren niederenergetischen Moleküle auf das höhere Energieniveau der Flüssigkeitsoberfläche gebracht werden müssen. Im Vergleich zu den Klebstoffen weisen Metalle eine höhere und Kunststoffe eine niedrigere Oberflächenenergie auf. Dies hat zur Folge, dass sich Metalle gut bis sehr gut und Kunststoffe eher schwierig kleben lassen. [19, S. 74 f.; 20, S. 339]

Dazu kommt, dass beide Werkstoffe sehr unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten besitzen, was eine Metall-Kunststoff-Klebung zusätzlich erschwert. Das Verhältnis der Ausdehnung von Metall und Kunststoff liegt bei 1:5, wodurch es bei hohen Temperaturen und großen Klebeflächen zu Spannungen in der Klebung kommen kann. Diese führen dann zu einem adhäsiven Bruch. Daher wird der Klebstoff in mehreren Millimetern Schichtdicke aufgetragen, sodass eine elastische Verklebung entsteht, welche die Spannungen ausgleichen kann. [19, S. 139] Für die Verklebung von Kunststoffen mit Metallen werden folgende Klebstoffe empfohlen:

- 2-Komponenten(2K)-Epoxidharzklebstoffe,
- 2K-Polyurethanklebstoffe,
- Methacrylatklebstoffe,
- Kontaktklebstoffe und
- geschäumte Klebebänder. [19, S. 139]

Trotz einiger Herausforderungen weisen Metall-Kunststoff-Klebung folgende Vorteile gegenüber anderen Fügeverfahren auf:

- keine Schwächung der Bauteile durch beispielsweise Bohrungen oder Temperatur,
- flächenförmige, statt punktförmige Kraftübertragung,
- ein Verbinden von sehr dünnen Bauteilen ($< 500 \mu\text{m}$) ist möglich. [19, S. 2]
- gleichzeitige Dichtung, Dämpfung und Isolierung, sowie
- Ausgleich von Toleranzen, bspw. Spaltüberbrückbarkeit. [21]

Diesen stehen jedoch die nachfolgenden Nachteile gegenüber:

- begrenzte Wärmebeständigkeit der Klebschicht,
- Klebschichten können durch Umwelteinflüsse geschädigt werden,
- Eine Oberflächenvorbehandlung ist erforderlich,
- Oftmals nur zerstörend prüfbar und
- Mitunter lange Prozesszeiten durch das Aushärten des Klebstoffes. [19, S. 3]

Das adhäsive Fügen lässt sich mit dem mechanischen Fügen zu einem Hybridfügeverfahren kombinieren. Dazu wird zuerst der Klebstoff aufgetragen, danach die Teile ausgerichtet und zum Schluss mechanisch gefügt. Dadurch ist eine Fixierung der Bauteile nicht notwendig, sodass sofort andere Bearbeitungsschritte erfolgen können. Während diesen kann der Klebstoff aushärten. [14]

In der vorliegenden Arbeit wird der Schwerpunkt auf das reine Kleben gelegt. Demnach sind alle weiteren Gliederungspunkte auch auf dieses Fügeverfahren angepasst.

4 Vorbehandlungsverfahren

Die Vorbehandlungsverfahren für die Metall- und Kunststoffkomponente werden angewandt, um die Haftungskräfte zwischen Fügeiloberfläche und Klebschicht zu verbessern. In den Oberflächen werden dafür die zwischenmolekularen Kräfte wirksam gemacht. Weitere Ziele der Oberflächenvorbehandlung sind:

- Reinigung und Aktivierung der Fügeiloberflächen,
- Verbesserung der Oberflächenbenetzbarkeit,
- Sicherstellung der Reproduzierbarkeit adhäsiver Verbindungen,
- Erhöhung der Dauerhaftigkeit der Verklebungen. [20, S. 542]

Dafür wird entweder mit den mechanischen Verfahren eine entsprechende Oberfläche erzeugt oder mit den physikalischen, chemischen oder elektrochemischen Verfahren eine Neue aufgebracht. Diese muss mit dem Grundwerkstoff über Hauptvalenzbindungen verankert sein. [20, S. 547] Die Oberflächen sollten vor und nach der Oberflächenvorbehandlung bearbeitet werden. Die entsprechenden Verfahren für die Oberflächenvorbereitung und -nachbehandlung sind in der Tabelle 3 aufgelistet.

Oberflächenvorbereitung	Oberflächenvorbehandlung	Oberflächennachbehandlung
Säubern	Mechanische Vorbehandlung	Klimatisierung
Passend machen	Physikalische Vorbehandlung	Auftrag von Haftvermittlern
Entfetten	Chemische Vorbehandlung	Auftrag von Primern (Konservierung)
	Elektrochemische Vorbehandlung	

Tabelle 3. Oberflächenbehandlungen [nach 20, S. 543]

4.1 Metallkomponente

Metallkomponenten können durch die Lagerung, beispielsweise mit Flugrost, oder durch Bearbeitungsprozesse, wie das Walzen, mit Zunder verunreinigt werden. Rost und Zunder sind Oxidschichten, welche durch die chemische oder elektrochemische Reaktion der Metalle mit der Umgebung entstehen. [22, S. 44] Somit liegen sie auf der Oberfläche der Metalle und würden mit dem Klebstoff benetzt werden. Allerdings sind Oxidschichten spröde und porös, sodass es beispielsweise zu Feuchtigkeitsunterwanderungen kommen kann. Besonders bei großen Kräfteinwirkungen führt dies zum Ablösen des Klebstoffes. Somit ist eine Oberflächenvorbehandlung von großer Relevanz.

4.1.1 Mechanisch

Schleifen

Schleifen beschreibt die mechanische Oberflächenbearbeitung mittels Schleifpapier. Für das Kleben empfiehlt sich hier eine Körnung von K120 bis K180. Durch dieses werden auch tiefsitzende, schwer zu entfernende Verunreinigungen auf der Metalloberfläche fast vollständig beseitigt. Die obersten Schichten des Metalls werden dabei entfernt, sodass der Grundwerkstoff freigelegt wird. Bei dem Schleifprozess wird das organische Bindemittel des Schleifpapiers auf die Oberfläche des Stahls übertragen. Auf dieser bleiben dabei vereinzelt Eisen- und Aluminiumoxide zurück, wodurch es zur Ausbildung einer dünnen Oxidschicht auf der Grenzfläche des Metalls kommt. [23, S. 182; 21] Eine Oxidschicht ist beim Kleben unerwünscht, da sie spröde und porös ist und somit zu einer Ablösung der Klebschicht führt. Das Metall sollte demnach direkt nach der Vorbehandlung geklebt werden, um dies zu vermeiden.

Vor dem Schleifprozess sollte das Metall vorbehandelt, also gereinigt und entfettet werden, sodass die Verunreinigungen nicht in den Werkstoff oberflächlich eingearbeitet werden. Nach dem Schleifen sollte der dabei entstandene Staub ebenfalls entfernt werden. Das Schleifen, so wie alle anderen mechanischen Vorbehandlungsverfahren, ist für alle Metalle geeignet, deren Oberflächen nicht beschichtet sind. Ansonsten würde die Beschichtung beschädigt werden. [21]

Bürsten

Die mechanische Vorbehandlung erfolgt beim Bürsten mittels einer Stahlbürste oder einem Schleifvlies. Durch das Schleifvlies entsteht auf der Metalloberfläche eine dünne Oxidschicht. Diese ist jedoch meist nicht reproduzierbar, sodass beispielsweise die Kurzzeitfestigkeit der Klebverbindung von der Dicke der Oxidschicht abhängt. Bei Bearbeitung mit der Stahlbürste kann es jedoch zu Einschlüssen von Verunreinigungen kommen. Somit ist auch hier eine Vorbehandlung notwendig, um dies zu verhindern. [23, S.182f.]

Strahlen

Beim Strahlen handelt es sich um ein mechanisches Vorbehandlungsverfahren, bei welchem ein Strahlmittel beschleunigt und mit großer Geschwindigkeit auf die Metalloberfläche geschossen wird. Dabei wird das Werkstück sowohl gereinigt als auch aufgeraut. Dabei können metallische, organische oder mineralische Strahlmittel benutzt werden. Zumeist wird Korund mit einer Korngröße von 0,2 mm bis 2 mm, aufgrund seiner chemischen Passivität, verwendet. Auch hier entsteht nach der Vorbehandlung eine Oxidschicht, welche im nm-Bereich liegt. Durch das Strahlen wird die Oberfläche verdichtet, sodass diese vorbehandelt werden muss, um Verunreinigungen nicht einzuschließen. Dünne Bauteile sind mit anderen Verfahren vorzubehandeln, da es sonst zu Einschlüssen von Strahlmitteln und zur Verformung des Bauteils kommen kann. [23, S. 183 f.; 21] Die Struktur der Metalloberfläche und somit auch die Klebfestigkeit sind unter anderem von Strahlgut, Partikelgröße und Strahldruck abhängig. [4, S. 39]

4.1.2 Physikalisch

Laser

Die Metalloberfläche kann mittels eines Lasers, beziehungsweise mit dem Verfahren der Laserstrukturierung, vorbehandelt werden. Dieses ist in der Abbildung 21 dargestellt.

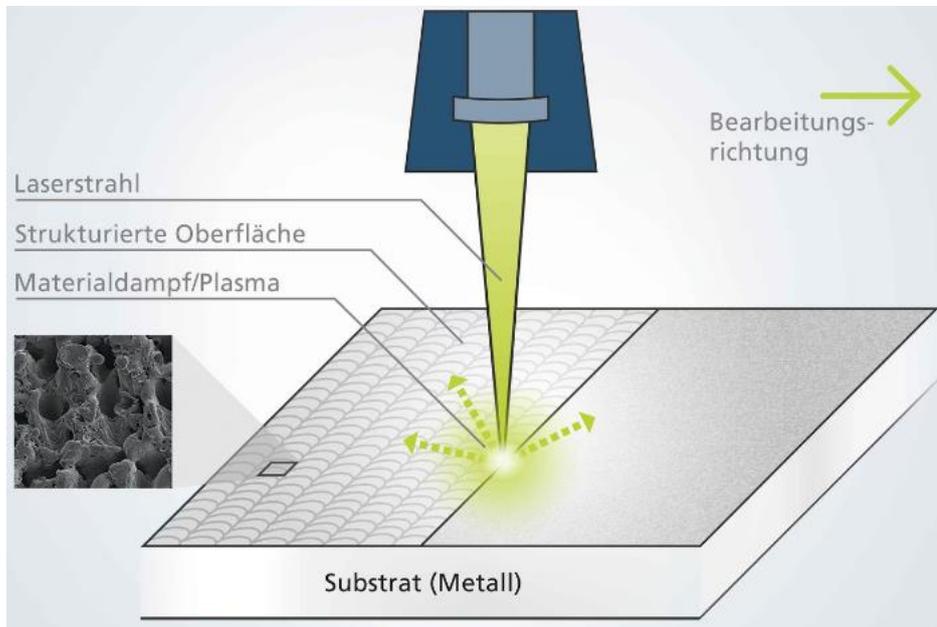


Abbildung 21. Laserstrukturieren [24]

Bei der Laserstrukturierung werden regelmäßig angeordnete Geometrien, meist in Form von Linien oder Löchern (Abbildung 22), in der Oberfläche erzeugt. Dies geschieht meist mit gepulster Laserstrahlung. Trifft diese auf die Werkstückoberfläche, erhitzt sie diese und der Werkstoff wird kontrolliert aufgeschmolzen und verdampft schlagartig. Die Erstarrung des schmelzflüssigen Werkstoffs führt zur Erzeugung von definierten Strukturen. Die Elemente dieser Struktur sind meist nur einige Mikrometer groß. Sie führen zu einer Aufrauung und somit zur Vergrößerung der Oberfläche, welche für das Kleben vorteilhaft ist. [24] Die Rauheit ist dabei abhängig von der Leistung, der Pulsfolgefrequenz und dem Pulsabstand. [4, S. 40] Das Verfahren des Laserstrukturierens zeichnet sich dadurch aus, dass es:

- umweltschonend,
- reproduzierbar,
- präzise und
- nachbearbeitungsfrei ist.[24]

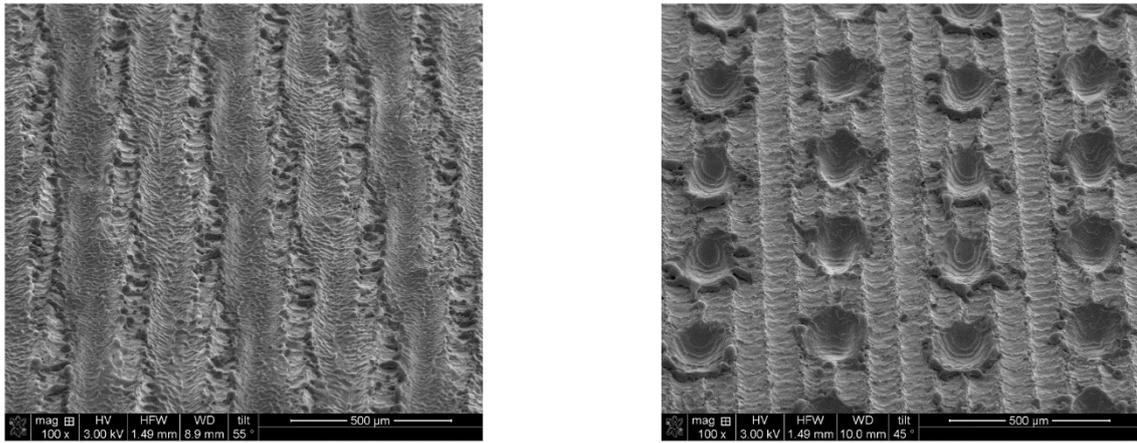


Abbildung 22. Links: Linienmuster, rechts: Lochmuster [25]

Plasma

Das häufigste Vorbehandlungsverfahren mit Plasma ist das Atmosphärendruckplasma. Bei diesem wird die Metalloberfläche mit einem ionisierten Gasstrahl unter Normaldruck bearbeitet. Somit sind keine Vakuumkammern, wie beim Hochdruckplasma, notwendig. Durch den Gasstrahl wird die Oberfläche gereinigt, chemisch verändert und aktiviert. Das führt dazu, dass die Haftungskräfte verbessert werden. Zusätzlich kann die Werkstückoberfläche mittels Atmosphärendruckplasma beschichtet werden, wodurch Adhäsionsproblemen entgegengewirkt werden kann. Das Verfahren muss auf den jeweiligen Werkstoff angepasst werden, sodass zum Beispiel der Düsenabstand und die Geschwindigkeit eingestellt werden müssen. [26]

Die Oberflächenvorbehandlungen mittels Laser und Plasma werden vorwiegend für die Bearbeitung von Kunststoffen eingesetzt und finden daher weniger Verwendung bei Metallen. [20, S. 553]

4.1.3 Chemisch

Unter dem chemischen Vorbehandlungsverfahren versteht man den nasschemischen Prozess des Beizens. Das Verfahren kombiniert dabei eine chemische Reinigung mit einer submikroskopischen Oberflächenaufräuhung. Dadurch entstehen energiereiche Zonen, welche für die Ausbildung der Haftungskräfte beim Kleben notwendig sind. Das Beizen entfernt die obersten Schichten, beispielsweise Korrosionsschichten (siehe Abbildung 23), des metallischen Fügepartners durch Anätzen der Oberfläche. Dafür werden nichtoxidierende Säuren, wie beispielsweise Salzsäure, verwendet. Das Ergebnis ist eine metallisch saubere und blanke Oberfläche. Die Beize kann dazu mittels eines Pinsels aufgetragen oder das Werkstück in das Beizbad getaucht werden. Das Beizen ist nur für alle unbeschichteten Metalle geeignet, da andernfalls die Beschichtung zerstört werden würde. Durch die Vorbehandlung mit oxidierenden Säuren, beispielsweise mit Salpetersäure, können auch neue Oberflächenschichten, zum Beispiel Phosphat-, Chromat- und Oxidschichten, durch Oxidation aufgebaut werden. Diese dienen dem Korrosionsschutz. Vor dem Beizen müssen die Oberflächen vorbehandelt werden. Zudem

ist es wichtig, die Parameter des Beizbades, beispielsweise Zusammensetzung, Temperatur und Einwirkzeit, auf den verwendeten Werkstoff abzustimmen. Nach dem Beizprozess sollte das bearbeitete Werkstück gründlich gespült, getrocknet und verklebt werden, sodass sich keine neue Oxidschicht bilden kann. [21; 20, S. 553]

Vorteilhaft gegenüber den mechanischen Verfahren sind:

- der Einsatz auch bei dünnen Fügeteilen, sowie
- keine Schädigung der Oberfläche durch Mikrorisse. [20, S. 554]

Nachteilig sind die erforderlichen Maßnahmen zum Arbeits- und Umweltschutz.

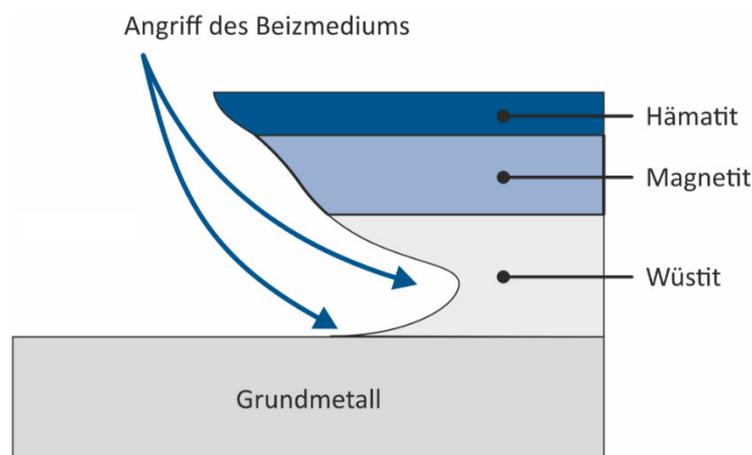


Abbildung 23. Oxidschicht auf Metall [27]

4.1.4 Elektrochemisch

Die elektrochemische Metallabscheidung, auch Galvanisieren genannt, wird bei Klebungen, welche hohen Beanspruchungen standhalten müssen und eine lange Lebensdauer aufweisen sollen, angewandt. Die Zusammensetzung und die Dicke der Oberflächenschichten sind bei diesem Verfahren reproduzierbarer als bei der chemischen Vorbehandlung. Beim Galvanisieren wird ein metallischer Gegenstand, die Anode, in eine Elektrolytlösung eingetaucht. Dadurch kommt es zu einer spontanen Metallauflösung, wodurch die Metallatome in Form von Kationen in die Lösung wandern. Dies wird auch als anodische Metallauflösung bezeichnet. Das Werkstück, welches ebenfalls von der Elektrolytlösung umgeben wird, wird an den Minuspol einer Gleichspannungsquelle angeschlossen. Dadurch ist das Werkstück negativ geladen und fungiert somit als Kathode. Als zusätzlicher Prozessparameter, im Vergleich zu dem chemischen Verfahren, kommt somit noch die Stromdichte hinzu. Die von der Anode abgeschiedenen Kationen werden von der Kathode angezogen und lagern sich auf deren Oberfläche ab, siehe Abbildung 24. Dadurch lassen sich auf den Fügeteilwerkstoff und den Klebstoff abgestimmte Oberflächen herstellen. [20, S. 554]

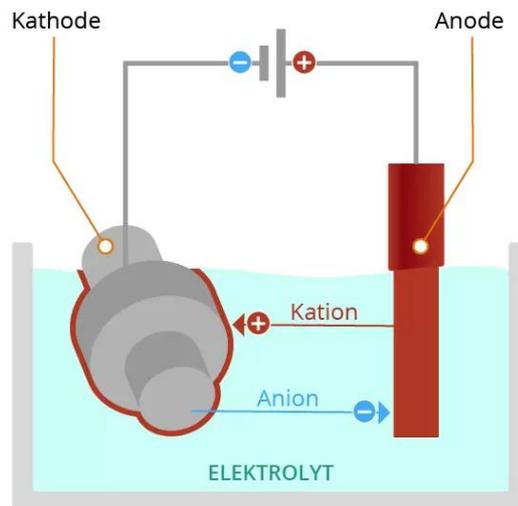


Abbildung 24. Galvanisieren [28]

4.1.5 Kombinationen

SACO-Verfahren

Das SACO-Verfahren wird für die Vorbehandlung von Bauteilen eingesetzt, wenn eine hohe Zuverlässigkeit und eine sehr gute Beständigkeit der Verklebung gefordert sind. Die Abkürzung SACO steht für die Bezeichnung Sandstrahl-Coating. Hierbei wird die Oberfläche beim Strahlen nicht nur aufgeraut und abgetragen, sondern auch beschichtet. Verwendet wird dabei ein chemisch modifiziertes Strahlmittel. Hierbei handelt es sich um silikatbeschichtete Korundkörner. Die Strahlpartikel besitzen eine hohe Aufprallenergie, wodurch es in Mikrobereichen der Metalloberfläche zu sehr hohen Temperaturen kommt. Diese werden Triboplasma genannt. In diesem lagert sich, aufgrund des Drucks und des lokalen Temperatureintrags, ein Teil der reaktiven Bestandteile des Strahlguts oder seiner Beschichtung ein. Auf die Oberfläche werden somit Haftvermittler- und Keramikschichten aufgebracht, wodurch die Adhäsion verbessert und das Bauteil gleichzeitig gegen Korrosion geschützt wird. [20, S. 551 f.]

Silicoater-Verfahren

Auch beim Silicoater-Verfahren, werden Silikatschichten auf die Oberfläche aufgebracht. Allerdings wird dies nicht mechanisch durch Strahlen umgesetzt, sondern thermisch durch die Flammenpyrolyse. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die Flamme eine geringe Einwirkzeit benötigt und somit wenig thermische Energie in das Bauteil eingebracht wird. Demnach ist dieser Prozess auch für dünnwandige Werkstücke geeignet. Die Oberfläche des Bauteils muss zunächst entfettet und aufgeraut werden. Dafür empfiehlt sich das Strahlen mit Korund. Danach wird auf der Oberfläche eine aktive Flamme, welche eine siliziumorganische Verbindung beinhaltet, entlanggeführt. Dadurch wird auf der Oberfläche eine dünne, feuchtestabile und fest haftende Silikatschicht aufgebracht. Diese Oberflächensilikatisierung erhöht die Oberflächenenergie des Werkstückes, wodurch die Benetzung und damit die Haftung verbessert werden. [21]

Vergleicht man Tabelle 4 und Tabelle 5 miteinander, so wird deutlich, dass die polaren Kunststoffe bereits ohne Oberflächenvorbehandlung schon klebegeeignet sind. Eine zusätzliche Vorbehandlung erhöht die Hafteigenschaften des Klebstoffes auf dem Polymer dennoch und ist daher erstrebenswert.

4.2.1 Mechanisch

Die mechanischen Vorbehandlungsverfahren sind, im Gegensatz zu den anderen Verfahren, in ihrer Durchführung am einfachsten. Fettrückstände oder sonstige Verunreinigungen sind vor der Behandlung zu entfernen, damit diese nicht in die Kunststoffoberfläche eingearbeitet werden.

Schleifen

Beim Schleifen werden die obersten Schichten des Kunststoffes entfernt, bis der Grundwerkstoff freigelegt ist. Dies geschieht von Hand mit einem Schleifblock oder einem Bandschleifgerät. Diese sollten eine Körnung von K120 bis K180 besitzen. Nach dem Schleifen sollte der entstandene Schleifstaub entfernt werden.

Dieses Verfahren eignet sich gut für Duroplaste und nur bedingt für Elastomere. Für die Vorbehandlung von Thermoplasten ist es eher ungeeignet. [21] Zwar weist beispielsweise geschleiftes Polypropylen bereits eine Steigerung der Festigkeit auf, dennoch versagt die Klebung im Zugscherversuch adhäsiv. [23, S. 155]

Bürsten

Wie Metalle lassen sich auch Kunststoffe mittels einer Drahtbürste oder einem Schleifvlies bürsten. Dadurch wird die Oberfläche strukturiert und vergrößert, wodurch der Klebstoff besser an dem Kunststoff haftet und sich an diesen mechanisch verklammern kann. [23, S. 155]

Strahlen

Durch das Strahlen werden die obersten Oberflächenschichten entfernt und verdichtet. Dieses Verfahren eignet sich für Duroplaste und bedingt für Elastomere, ist allerdings für Thermoplaste ungeeignet. [21] Die Kunststoffe können zum einen mit einem Strahlmittel oder zum anderen mit einem Wasserstrahl gestrahlt werden. Die Strahlmittel können metallisch, mineralisch oder organisch sein, sollten aber weicher als bei den Metallen sein. Die erreichbare Klebfestigkeit ist dabei von den eingesetzten Werkstoffen abhängig. So wurde beispielsweise Stahl mit einmal mit gestrahltem Polypropylen und einmal mit gestrahltem Polycarbonat verklebt. Während die Stahl-PP-Klebung beim Zugscherversuch adhäsiv versagt, bricht der Verbund bei der PC-Klebung im Kunststofffügepartner am Überlappungsende. [23, S.155]

Das umweltfreundlichere Verfahren ist das Strahlen mit Wasser. Hierbei wird die Oberfläche mit einem hochbeschleunigten, konzentrierten Wasserstrahl bearbeitet, wodurch diese zerfasert wird. Die Klebeignung verbessert sich bei PP dadurch allerdings nicht. Auch bei der Vorbehandlung mit einem Wasserstrahl versagt die Probe adhäsiv. [23, S. 156]

Skelettieren

Das Skelettieren ist ein Verfahren, welches besonders bei fadenziehenden Thermoplasten zu guten Klebfestigkeiten führt. Diese können zusätzlich durch eine Erwärmung der Kunststoffoberflächen beim Klebstoffauftrag verbessert werden. Beim Skelettieren wird der Kunststoff erwärmt, sodass er weich wird. In die Schmelze wird dann eine Matrize eingepresst und danach wieder abgezogen. Dies führt zu einer Erzeugung von abgerissenen verstreckten Zipfeln, siehe Abbildung 25, welche die Adhäsion verbessern. [23, S. 156] Die Vorteile einer Skelettierung sind:

- Automatisierbarkeit,
- Kostengünstiges Verfahren und
- Keine Abfallprodukte.

Allerdings sind eine großflächige Oberflächenstrukturierung, sowie eine Vorbehandlung in engen Spalten nur bedingt möglich. [23, S. 158]



Abbildung 25. Skelettierte Kunststoffoberfläche [23, S. 157]

4.2.2 Physikalisch

Laser

Bei der Laserbehandlung wird eine hohe Strahlungsenergie in die Oberfläche des Kunststoffes gebracht. Dadurch kommt es zur Ablation, also zum Abtrag von Material. Dies hat eine Veränderung der Oberflächenmorphologie und -topologie zur Folge. Zudem kommt es zu einer chemischen Modifikation der Kunststoffoberfläche, in Folge der hohen lokalen Temperaturen. Dadurch kann diese mit der Umgebung reagieren, wodurch sie oxidiert. [30, S. 16]

Plasma

Das Plasmaverfahren ist eines der effizientesten Oberflächenvorbehandlungsverfahren und verfolgt das Ziel die Oberflächenspannung des Kunststoffes zu erhöhen. Dafür gibt es folgende Verfahren, welche für alle Kunststoffe einsetzbar sind:

- Das Niederdruck-Plasma,
- Das Atmosphärendruck-Plasma und
- Die Corona-Vorbehandlung.

Die Oberfläche des Kunststoffes wird mit einem aktiven Plasmagas bearbeitet, wodurch sie gereinigt und aktiviert wird. Dabei kommt es zu einer chemischen Oberflächenveränderung und zu einer Zunahme der Polarität, wodurch die Klebbarkeit verbessert wird. Die Arbeitsparameter, wie beispielsweise das Arbeitsgas, die Geschwindigkeit und der Abstand von Strahl zu Oberfläche, sind an die Werkstoffe anzupassen. [21]

Niederdruckplasma

Der Kunststofffügepartner wird in die Prozesskammer eingelegt, in welcher ein Unterdruck erzeugt wird. In die evakuierte Kammer wird das Prozessgas eingeströmt, wodurch sie auf den Arbeitsdruck gebracht wird. Danach erfolgt das Zünden des Plasmas durch eine hochfrequente Spannung. Im Plasma befinden sich freie Ladungsträger, beispielsweise Ionen, Elektronen und in Abhängigkeit vom verwendeten Arbeitsgas geladene Moleküle. Diese reaktiven Teilchen des Plasmas reagieren mit der Kunststoffoberfläche. In Abhängigkeit des verwendeten Gases kommt es zu verschiedenen Prozessen. Diese können beispielsweise ein Materialabtrag, eine Aktivierung oder eine Beschichtung der Oberfläche sein. Die Behandlungszeit hat dabei signifikanten Einfluss auf die Festigkeit der Klebverbindung. Steigt die Zeit nimmt auch die Klebfestigkeit zu. [23, S. 171; 30, S. 16] Die Vorteile des Niederdruckplasmas sind die Umweltfreundlichkeit und die Bearbeitung von komplexen Bauteilgeometrien. Nachteilig hingegen sind die Verlängerung der Taktzeit durch das Evakuieren, sowie die Durchführung im Vakuum. Durch diese ist ein kontinuierlicher Prozess daher nicht möglich. [23, S. 173 f.]

Atmosphärendruckplasma

Die Zündung des Plasmas beim Atmosphärendruckplasma erfolgt unter Normaldruck mit Hilfe einer Hochspannungsentladung. Die Plasmaanregung muss hier sehr stark sein, um eine Oberflächenmodifikation zu bewirken. Das Plasma wird danach über einen Luftstrom auf die zu behandelnde Oberfläche gebracht. Ein Arbeitsgas, welches eingesetzt werden kann, ist Luft. Damit lassen sich die Oberflächenmorphologie und -topografie im sub- μm -Bereich modifizieren. [30, S. 17]

Corona-Vorbehandlung

Wie beim Atmosphärendruckplasma erfolgt auch die Corona-Vorbehandlung an der Atmosphäre. Dazu wird zwischen zwei Elektroden unter hochfrequenter Spannung Luft ionisiert. Dadurch wird ein Blaulicht, auch Corona genannt, erzeugt. Legt man ein isolierendes Material zwischen die Elektroden, wird dessen Oberfläche mit Ionen beschossen. Dadurch kommt es zu einer Verbesserung der Adhäsionseigenschaften.

Polypropylen weist nach der Behandlung zwar keine veränderte Struktur auf, dennoch wird die Klebfestigkeit verbessert. Wichtige Parameter dafür sind der Klebstoff und die Behandlungszeit. In Abhängigkeit vom Klebstoff sind nach einmaliger Behandlung noch Adhäsionsbrüche möglich. Um diese zu verhindern ist eine Behandlung des Kunststoffes mehrere Male hintereinander möglich. Danach versagt der Verbund nicht mehr adhäsiv, sondern durch Materialbrüche. Allerdings kommt es bei der Corona-Vorbehandlung bei großen Werkstückdimensionen zu Inhomogenitäten. Diese zeichnen sich durch niedrigeren Klebfestigkeiten im Randbereich und Höheren in der Mitte des Bauteils aus. Gar nicht geeignet ist dieses Verfahren bei komplexen Bauteilgeometrien. [23, S. 174-177.]

4.2.3 Chemisch

Beizen

Der Einsatz nasschemischer Verfahren ist bei vielen Polymeren den mechanischen Vorbehandlungsverfahren überlegen. Typische Beizbäder sind beispielsweise Chromschwefel-, Phosphor- und Salzsäure. Wird beispielsweise PP mit Chromschwefelsäure gebeizt, führt dies schon nach wenigen Sekunden im Beizbad zu gesteigerten Adhäsionseigenschaften des Kunststoffes. Diese sind auf die entstandene wellenförmige Struktur auf der Kunststoffoberfläche, siehe Abbildung 26, zurückzuführen. Die Adhäsionseigenschaften sind von der Behandlungstemperatur und -zeit abhängig. Steigen beide Parameter nimmt die Klebfestigkeit zu. Allerdings nur bis zu einem von Polymer abhängigen Grenzwert. Zu beachten ist auch, dass das Beizen bei einigen Kunststoffen zu Spannungsrissen führen kann. Weitere Nachteile sind:

- Ein anschließendes Spülen und Trocknen nach der Beize, wodurch sich die Prozesszeit verlängert.
- Die Spülflüssigkeiten werden durch die Beize verunreinigt und müssen daher erst gereinigt werden, bevor sie ins Abwasser geleitet werden können.
- Das Verfahren ist aus Sicht des Umwelt- und Arbeitsschutzes bedenklich. [23, S. 159 f.]

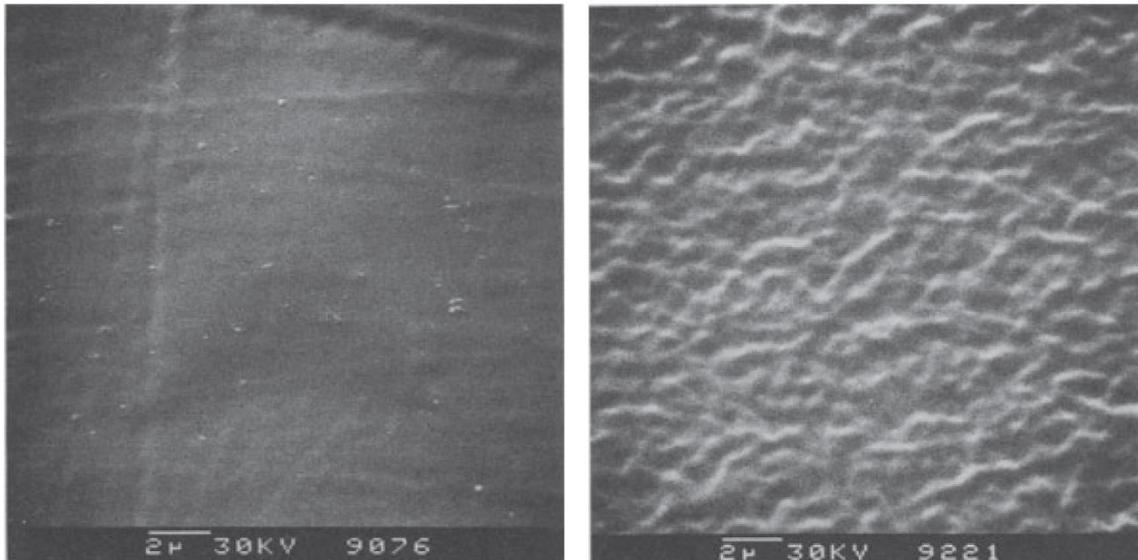


Abbildung 26. Links: unbehandeltes PP, rechts: gebeiztes PP [23, S. 160]

Zusätzlich zu den nasschemischen Verfahren mit Säuren, gibt es für Kunststoffe auch „trockene“ Verfahren. Diese laufen unter Gasatmosphäre ab und führen zu Oxidationsreaktionen mit Hilfe von Ozon und Fluor. [20, S. 553]

4.2.4 Thermisch

Beflammung

Die Beflammung dient der Verbesserung der Klebbarkeit von Thermoplasten, wie beispielsweise PE und PP. Dazu wird der Thermoplast zunächst gereinigt und entfettet. Danach wird die Oberflächenspannung des Kunststoffes mit einer Propan- oder Acetylen-Flamme mit Sauerstoffüberschuss erhöht. Die Behandlung des Kunststoffes mit der frei brennenden Flamme erfolgt über einen kurzen Zeitraum. Dies führt zu einer chemischen Veränderung und sichtbaren Aufrauung der Oberfläche, sowie zur Entstehung von polaren Strukturen. Parameter, welche diesen Prozess und somit die Klebbarkeit beeinflussen sind:

- das Mischungsverhältnis von Propan, bzw. Acetylen und Luft,
- der Abstand zwischen der Flamme und der Kunststoffoberfläche und
- die Geschwindigkeit der Flamme.

Nach der Beflammung muss der Kunststoff sofort verklebt werden. [21; 23, S. 162 ff.]

Mikroplasmabrenner

Durch den Mikroplasmabrenner wird ein Plasma erzeugt. Die Zündung des Hauptlichtbogens zwischen der Wolframelektrode und dem Werkstoff ist bei Kunststoffen nicht möglich. Daher wird das Plasma durch den Hilfslichtbogen erzeugt. Dieser brennt zwischen dem Schweißeinsetz und der Wolframelektrode. Der Bereich zwischen Elektrode und Werkstück wird somit durch den nicht übertragenden Lichtbogen ionisiert. Dadurch entsteht ein Gasstrom hoher Temperatur mit einem Durchmesser von 1-2 mm.

Recht hohe Klebfestigkeiten von PP- und PE-Stahl-Verbunden lassen sich durch Argonplasma aus der Inneren Düse und Druckluft aus der Schutzgasdüse erzielen. Im Vergleich zu anderen Verfahren, wie dem Niederdruckplasma, der Corona-Vorbehandlung und der Beflammung, liegen die erzielten Adhäsionseigenschaften jedoch deutlich niedriger. [23, S. 165 ff.]

4.2.5 Strukturierte Spritzgussteile

Eine andere Möglichkeit Polymerbauteile zu strukturieren ist direkt beim Spritzgießprozess. Dadurch können zusätzliche Behandlungen, wie z.B. mit dem Plasmastrahl, vermieden werden. Die Oberfläche des Werkstücks wird hier direkt im Urformprozess modifiziert. Dafür wird ein Formeinsatz, welcher mittels Laserstrukturierung gefertigt wurde, in dem Spritzgießwerkzeug angebracht. Dieser Formeinsatz ist mit einer Mikrostruktur versehen, welche von einer Nanostruktur überlagert wird. Dadurch entstehen beim Entformungsprozess in der Kunststoffoberfläche hoch funktionale Flächen. Verschiedene Prozessparameter, wie bspw. die Temperatur der Schmelze und die Einspritzgeschwindigkeit haben dabei signifikant Einfluss auf die Abbildungsgenauigkeit der Strukturen. Diese charakterisiert die spätere Oberflächenqualität. [31, S. 217-222]

Werden die vorbehandelte Kunststoffoberfläche und die vorbehandelte Metalloberfläche im Anschluss durch Kleben gefügt, ergibt sich folgendes Schichtmodell in der Abbildung 27.

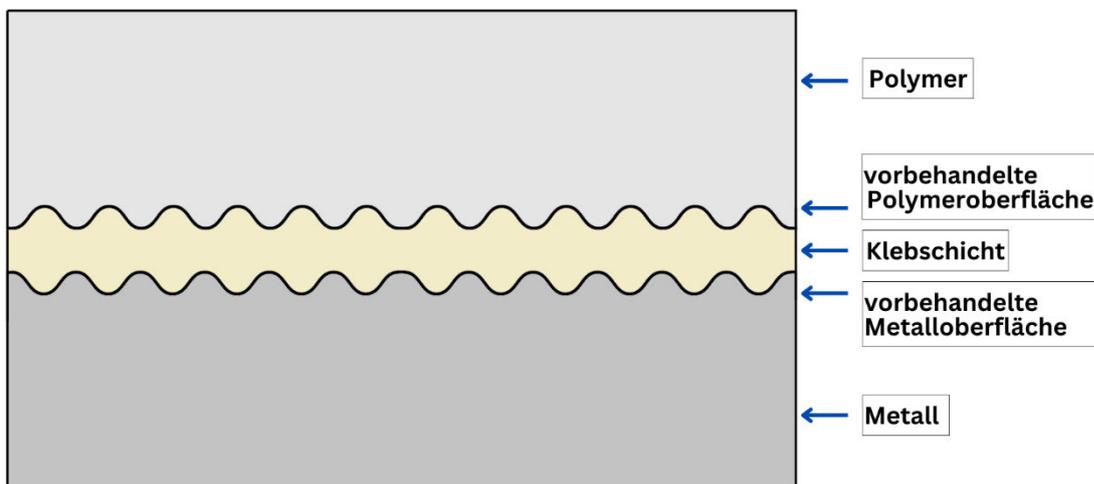


Abbildung 27. Schichtmodell eines geklebten Polymer-Metall-Verbunds

5 Metallisierung von thermoplastischem Material

Die Kunststoffmetallisierung beschreibt das Überziehen von Polymeren mit einer metallischen Schicht. Diese kann sowohl dekorative als auch physikalische Ziele, beispielsweise eine elektrische Leitfähigkeit trotz kostengünstigerem und leichterem Kunststoff, verfolgen. In Bezug auf das Kleben führt eine Kunststoffmetallisierung dazu, dass somit zwei Bauteile derselben Werkstoffhauptgruppe gefügt werden können. Nämlich das Metall und die metallische Schicht auf dem Thermoplast, siehe Abbildung 28. Dies vereinfacht beispielsweise den Klebprozess in Hinblick auf die Auswahl des Klebstoffes.

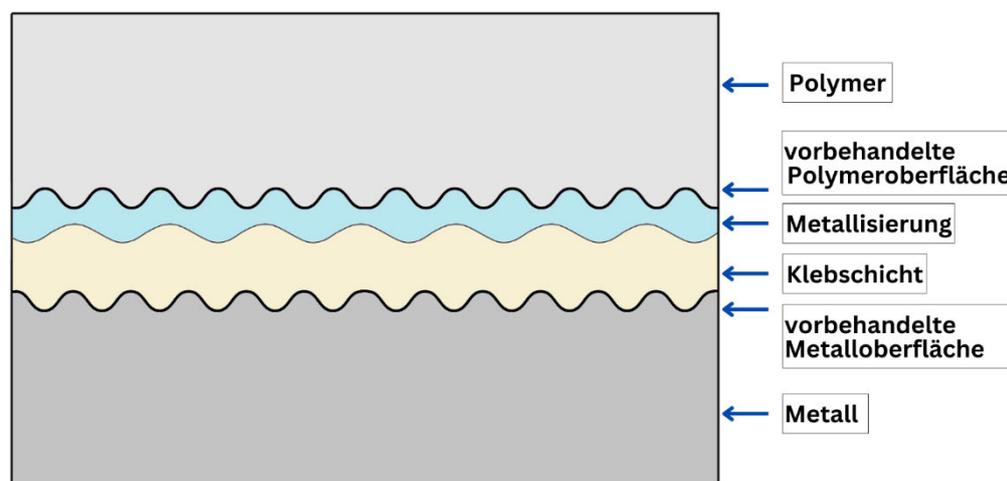


Abbildung 28. Schichtmodell mit Metallisierung

Kunststoffe können mit folgenden Verfahren metallisiert werden:

- Physikalische Gasphasenabscheidung,
 - Sputterdeposition,
 - Thermisches Verdampfen,
- Chemische Gasphasenabscheidung,
- Thermisches Spritzen und
- Galvanisieren.

Physikalische Gasphasenabscheidung

Bei der physikalischen Gasphasenabscheidung, im Englischen Physical Vapor Deposition (PVD) genannt, werden Schutzschichten aus der Metall-Dampfphase abgeschieden. Die Schichtstruktur ist dabei von den Beschichtungsparametern und der Substrattemperatur abhängig. Die dafür verwendeten Arbeitsdrücke liegen im Größenbereich von 10^{-4} Pa bis ca. 10 Pa. Beim PVD-Verfahren können verschiedene Metalle aufgedampft werden. Üblicherweise bestehen die Schichten aus Titanitrid, -carbonitrid oder -aluminiumnitrid. [32, S. 5]

- *Sputterdeposition*

Beim Sputtern wird ein Prozessgas, zumeist Argon, ionisiert. Dies geschieht bei einem Druck von ungefähr 2 bis $5 \cdot 10^{-5}$ bar und unter Hochspannung. Dadurch entstehen Argon-Ionen, welche mittels eines elektrischen Feldes auf das Bauteil beschleunigt werden. Aus diesem werden dabei Atome herausgeschlagen und kondensieren auf der Bauteiloberfläche. Das Ergebnis ist eine gleichmäßige Schichtdicke auf dem Werkstück. [32, S. 6]

- *Thermisches Verdampfen*

Beim Thermischen Verdampfen werden Metalle, Legierungen oder chemische Verbindungen durch thermische Energie im Hochvakuum auf das Bauteil abgeschieden. Dabei wird das Material zum Beschichten aufgedampft, wodurch der entstandene Metaldampf kondensiert und sich auf der Bauteiloberfläche niederschlägt. [32, S. 4]

Chemische Gasphasenabscheidung

Bei der chemischen Gasphasenabscheidung, im Englischen Chemical Vapor Deposition (CVD) genannt, wird durch chemische Reaktion von Reaktionsgasen eine Schicht auf dem Werkstück erzeugt. Die Reaktionsgase werden erhitzt, reagieren chemisch und die dabei abgeschiedenen Feststoffe aus der Gasphase kondensieren auf der Oberfläche des Bauteils und verankern sich in dessen Oberfläche durch Diffusion. Vorteilhaft daran ist eine gute Haftung und die Geometrieangepassung der abgeschiedenen Schicht. [32, S. 4]

Thermisches Spritzen

Beim Thermischen Spritzen kommt ein pulver- oder drahtförmiger Werkstoff für die Beschichtung zum Einsatz. Dieser wird mit einer hohen thermischen und/oder kinetischen Energie auf das Bauteil gebracht, sodass sich auf dessen Oberfläche eine Schicht ausbildet. Diese kann Dicken von ungefähr 30 μm bis zu mehreren Millimetern annehmen. Das Thermische Spritzen umfasst unterschiedliche Spritzverfahren, wodurch eine Vielzahl von Werkstoffen, wie bspw. Metalle, Keramiken und Polymere beschichtet werden können. [32, S. 9]

Galvanisieren

Beim Galvanisieren kommen wässrige Elektrolyte zur Anwendung. In diese Metallsalzlösungen wird das Bauteil gegeben, sodass sich dessen Salz aufspaltet und als Ionen vorliegt. Erfolgt dieser Schritt mittels einer äußeren Spannungsquelle spricht man von elektrochemischer oder auch galvanischer Metallabscheidung. Diese wird zur Beschichtung von metallischen Werkstoffen angewandt. Bei Kunststoffen, bzw. nichtleitenden Werkstoffen, kommt jedoch die chemische Metallabscheidung zur Anwendung. Hier wird dem Elektrolyten ein Reduktionsmittel zugefügt. Anhand dieser beider Verfahren können viele Werkstoffe, wie Kunststoffe, niedrig bis hochlegierte Stähle, Aluminium-, Magnesium- und Nickel-Legierungen, Kobalt- und Titan-Werkstoffe und unter Umständen auch Keramiken beschichtet werden. [32, S. 12]

6 Versuchsplanung

6.1 Das Bauteil

Das Bauteil, auf welchem die vorliegende Arbeit aufbaut, ist ein Isolationsbefestigungspin. Dieser besteht aus einer runden Platte, welche eine Dicke von 2 mm und einen Durchmesser von 25 mm besitzt und einem gerippten Stift, siehe Abbildung 29.

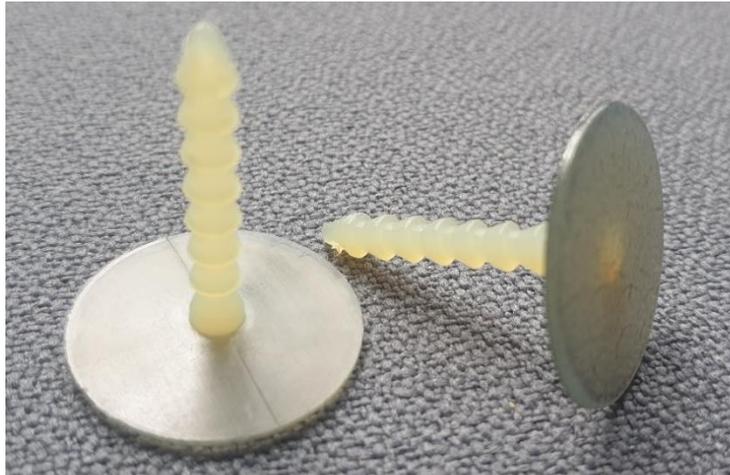


Abbildung 29. Form des Stempels

Im Flugzeug besitzt dieser Stempel die Aufgabe die Isolierung zwischen Außen- und Innenverkleidung des Rumpfes zu befestigen. Dazu wird dieser auf die Rückseite von Sandwichplatten geklebt, sodass an diesem die Schaummatte befestigt werden kann. Notwendig für eine gute Haftfestigkeit ist eine Oberflächenvorbehandlung der Kunststoffplatte. Diese wird dazu mit Ameisensäure gebeizt, siehe Abbildung 30. Das Verfahren mit Ameisensäure soll jedoch nach Möglichkeit abgeschafft werden, da dieses aufwendig und teuer ist. Zudem erweist sich eine Polymer-Metall-Klebung, zum Beispiel in Bezug auf die Klebparameter und die Klebstoffauswahl, als schwierig. Demnach ist das Ziel eine einfache Vorbehandlung und anschließende Metallisierung des Kunststoffes. Somit kann eine Metall-Metall-Klebung erzielt werden.



Abbildung 30. Gebeizte Oberfläche des Stempels

6.2 Voruntersuchung

Als Vorbehandlungsverfahren sollen das Strahlen, die Plasmabehandlung unter Atmosphärendruck, sowie die Behandlung mit Kaliumpermanganat (KMnO_4) untersucht werden. Das Ziel ist eine anschließende Metallisierung, durch welche bestmöglich die Haftfestigkeit der späteren Klebung, im Vergleich zu der alleinigen Vorbehandlung mit Ameisensäure, verbessert wird. Dies wird anhand der zwei Polymere PA 6 und PA 12 geprüft. Da sich PA 6 und PA 6.6 strukturell sehr ähnlich sind und somit deren Eigenschaften ebenfalls fast identisch sind, wird die Voruntersuchung zur Vereinfachung nur an einem der beiden Kunststoffe durchgeführt. Genutzt werden dafür kleine Platten mit den Maßen 3 x 3 cm in einer Dicke von 2 mm und keine Stempel wie in der Praxis (siehe Abbildung 29).

Für die Voruntersuchung wird zunächst von jedem Vorbehandlungsverfahren ein gewählter Parameter variiert. Beim Strahlen und bei der Behandlung mit Kaliumpermanganat werden jeweils verschiedene Zeiten und beim Plasma unterschiedliche Spannungen überprüft. Pro Verfahren werden für den jeweiligen Parameter dabei 5 Stufen untersucht. Diese sind der Tabelle 6 zu entnehmen.

	Strahlen	Kaliumpermanganat	Atmosphärendruckplasma
Probe	Zeit in s	Zeit in min	Spannung in V
1	5	5	4
2	10	10	5
3	15	15	6
4	20	20	8
5	25	25	10

Tabelle 6. Untersuchte Parameter der Vorbehandlungsverfahren

Zunächst werden die Proben dafür bei 60°C für 5 Minuten entfettet (Ultrasonic Cleaning Salt Ultra 25 mit einer Dosierung von 40 g pro Liter), anschließend mit Wasser gespült und getrocknet. Dadurch werden Verunreinigungen entfernt und somit verhindert, dass diese bei der Vorbehandlung in die Proben eingearbeitet werden. Anschließend werden die Proben nach der Tabelle 6 vorbehandelt.

Strahlen

Als Strahlmittel kommt nicht Korund, wie in Abschnitt xx beschrieben, sondern technologiebedingt Glasperlen zum Einsatz. Diese werden mit Druckluft auf die Polyamidoberfläche beschleunigt und führen dort zu einem Aufrauen der Oberfläche. Beim Glasperlenstrahlen wird jedoch nicht so viel Material abgetragen, wie beim Sand- oder Korundstrahlen.

Kaliumpermanganat

Die Proben werden hierbei in eine Kaliumpermanganatlösung mit 20g/l, welche auf 70°C erhitzt wird, getaucht. Kaliumpermanganat dient als Oxidationsmittel und verursacht eine Quellung des thermoplastischen Kunststoffes. Die beiden Polyamide PA 6 und PA 12 sind teilkristallin, besitzen also amorphe Bereiche, welche dabei angelöst werden. Eine solche Anlösung ist vorteilhaft für die spätere Metallschicht auf der Kunststoffoberfläche. [33, S. 45]

Atmosphärendruckplasma

Das Werkstück läuft anhand der eingestellten Spannung mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten unter dem Plasmabrenner (FG5001 Openair-Plasma® Generator) im Abstand von ca. 1,5 cm entlang, siehe Abbildung 31.



Abbildung 31. PA 6 - Platte wird mittels Atmosphärendruckplasma vorbehandelt

Dabei stoßen beschleunigte Ionen mit der Oberfläche zusammen, wodurch die chemischen Bindungen des Materials aufgebrochen werden. Um die Geschwindigkeit bestimmen zu können, wird eine Zeit aufgenommen und die dabei zurückgelegte Strecke gemessen. Daraus kann die Geschwindigkeit, siehe Tabelle 7, mit der Formel $v = \frac{s}{t}$ bestimmt werden.

Probe	Spannung in V	aufgenommene Zeit (t) in s	gemessene Strecke (s) in mm	Geschwindigkeit (v) in mm/s
1	4	10	114	11,4
2	5	8	138	17,3
3	6	8	161	20,1
4	8	5	142	28,4
5	10	5	182	36,4

Tabelle 7. Geschwindigkeitsbestimmung beim Atmosphärendruckplasma

Nach der Vorbehandlung sind optische Unterschiede zwischen den Proben der verschiedenen Behandlungsverfahren deutlich zu erkennen, siehe Anlage 1. Zu beachten ist dabei, dass die Probenbeschriftung auf deren Rückseite bei manchen Proben durchscheint.

Die gestrahlten Proben sind rauer und matter im Vergleich zu der unbehandelten Probe geworden. Zwischen den verschiedenen Behandlungszeiten und Materialien sind jedoch keine Veränderungen visuell ersichtlich. Dies ist hingegen bei der Vorbehandlung mit KMnO_4 der Fall, wo je nach Behandlungszeit und Werkstoff Farbunterschiede zu erkennen sind. Je kürzer die Probe in das KMnO_4 getaucht wurde, desto heller ist auch die Farbe. Vergleicht man den PA 6 mit dem PA 12, so ist auffällig, dass die PA 12-Proben deutlich heller sind. Das liegt daran, dass das PA 12 hydrophober als das PA 6 ist und zudem eine höhere Chemikalienbeständigkeit besitzt. Ansonsten sind alle Proben glatt und glänzend wie die unbehandelte Referenzprobe geblieben. Zu dieser weisen die mit Atmosphärendruckplasma behandelten Proben der beiden Materialien keine optischen Unterschiede auf.

Die Stufen des jeweiligen Parameters werden anhand des Benetzungstests untersucht. Dazu wird mittels einer Kanüle (SNS 050/026; $\varnothing_A=0,5$ mm) ein Tropfen Wasser mit einem Dosiervolumen von $3 \mu\text{l}$ und einer Dosierate von $1 \mu\text{l}$ pro Sekunde erzeugt. Bei solch einem kleinen Dosiervolumen löst sich der Tropfen nicht von allein ab, sondern muss mit dem Werkstück „abgeholt“ werden, siehe Abbildung 32. Dazu wird dieses nach oben bewegt, bis der Tropfen auf der Oberfläche des Kunststoffes sitzt.

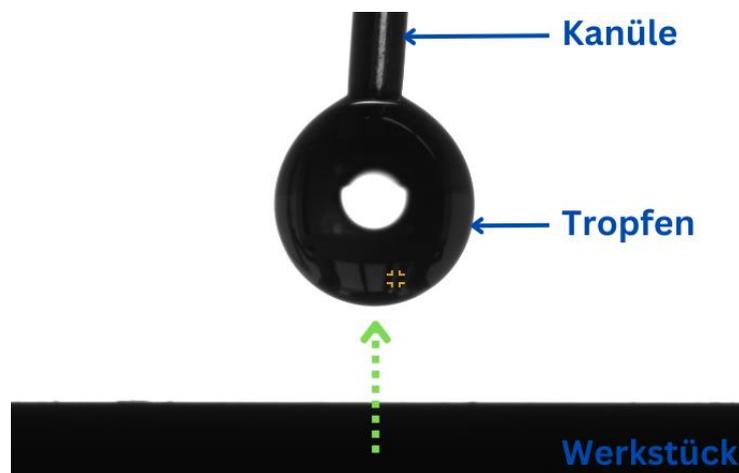


Abbildung 32. Abholung des Tropfens beim Benetzungstest

Die Winkel des Tropfens werden mit einem optischen Kontaktwinkelmessgerät (OCA 15EC der Firma dataphysics) gemessen. Je höher die Polarität der Oberfläche ist, desto hydrophiler ist diese und desto besser ist auch die Benetzung. Eine gute Benetzung zeichnet sich durch kleine Benetzungswinkel des Tropfens aus (siehe Kapitel 3.2.3). Somit zeigt der Benetzungstest das Maß der Polarität durch die verschiedenen Vorbehandlungsverfahren.

Zunächst werden dafür die Benetzungswinkel der unbehandelten PA6- und PA12-Proben überprüft. Zu beachten ist dabei, dass alle Proben viele Kratzer aufweisen, welche durch die Lagerung, den Transport oder den Zuschnitt entstanden sein können. Diese Kratzer können wiederum der Grund für die große Streuung der Benetzungswinkel, welche beim Messen aufgetreten ist, sein. In der Anlage 2 sind daher jeweils die reproduzierbarsten Benetzungswinkel aufgelistet. Der durchschnittliche Winkel des PA 6 beträgt dabei 79,59° und der des PA 12 82,88°. Die dazugehörige Darstellung ist der Abbildung 33 zu entnehmen.



Abbildung 33. Benetzungswinkel von unbehandeltem PA6 (links) und unbehandeltem PA12 (rechts)

Laut Kapitel 3.2.3 liegt eine gute Benetzung bei einem Winkel $\alpha < 30^\circ$ vor, was hier nicht der Fall ist. Demnach ist eine Vorbehandlung des Materials zwingend notwendig. Alle Vorbehandlungsverfahren weisen eine Verbesserung hinsichtlich der Benetzung auf, dennoch werden nirgends mindestens 30° erreicht. Bei den einzelnen Verfahren hat sich Folgendes ergeben:

- Durch das Strahlen kann der Benetzungswinkel bei PA 6 auf $59,79^\circ$ und bei PA 12 auf $68,81^\circ$ verbessert werden. Beide Winkel wurden bei einer Bearbeitungszeit von 10 s erreicht. Dennoch liegt immer noch keine gute Benetzung vor. Zudem wird mit zunehmender Bearbeitungszeit der Benetzungswinkel wieder schlechter.
- Die Vorbehandlung mit Kaliumpermanganat weist die besten Benetzungswinkel der drei Vorbehandlungsverfahren auf. Je länger die PA 6-Probe in der Lösung bleibt, desto besser wird auch der Benetzungswinkel. Dadurch kann hier bei 25 min Einwirkzeit ein Winkel von $34,30^\circ$ erreicht werden. Bei PA 12 lässt sich keine Abhängigkeit zwischen der Tauchzeit und der Benetzung herstellen. Der kleinste Benetzungswinkel von $45,02^\circ$ wurde hier bei 10 min erreicht.
- Bei der Behandlung mit dem Atmosphärendruckplasma wurden bei beiden Polyamiden ungefähr gleiche Benetzungswinkel erreicht. Bei PA 6 beträgt dieser $46,43^\circ$ und bei PA 12 $45,75^\circ$. Diese Winkel wurden jeweils bei einer Spannung von 4V erzielt. Je größer die Spannung wird und somit auch die Geschwindigkeit, desto schlechter wird die Benetzung.

Die drei gewählten Vorbehandlungsverfahren haben somit nicht die erwünschten Benetzungswinkel von $< 30^\circ$ erbracht. Aus diesem Grund werden noch weitere Methoden

untersucht. Entschieden wird sich hierbei für Essig- und Oxalsäure, welche als Alternative für die herkömmlich verwendete Ameisensäure eingesetzt werden könnten.

Orientiert wird sich dabei an den Parametern des Kaliumpermanganats. Dies bedeutet, dass jeweils eine Lösung mit 20g/l von den beiden Säuren hergestellt wird. Diese werden auf 70°C erhitzt und jeweils 5 Proben für die Zeiten aus Tabelle 6 darin getaucht. Anschließend werden auch hier die Benetzungswinkel gemessen:

- Durch das Tauchen in Essigsäure konnte bei dem PA 6 ein Winkel von 57,82° und beim PA 12 von 65,55° bei einer Dauer von 20 min erreicht werden. Diese Benetzungswinkel ähneln denen des Strahlens und weisen somit keine Verbesserung auf.
- Auch bei der Oxalsäure wurden Benetzungswinkel in der gleichen Größenordnung erzielt. Der kleinste Winkel des PA 6 beträgt hier 56,18° bei einer Zeit von 20 min und der des PA 12 beträgt 61,12° bei 15 min.

Somit liegt auch bei diesen Verfahren keiner der Winkel unter 30° und somit nicht im Bereich einer guten Benetzung. Dennoch liegen alle gemessenen Benetzungswinkel unter dem Winkel von 69,89°, welcher bei der Ameisensäure aufgenommen wurde. Inwiefern die erreichten Benetzungswinkel aller Vorbehandlungsverfahren ausreichend sind, wird sich bei der Metallisierung der Proben und anschließend bei den Haftfestigkeitsversuchen zeigen.

Die Benetzungswinkel wurden alle kurz nach der jeweiligen Vorbehandlung gemessen. Diese Messungen wurden nochmals 2 Wochen später durchgeführt und sind der Anlage 2 zu entnehmen. Dabei ergab sich Folgendes:

- Alle Benetzungswinkel der vorbehandelten Proben haben sich ohne Ausnahmen bei der Wiederholung verschlechtert.
- Die Winkel haben sich dabei ungefähr in der Spanne zwischen 2,2°-9,5° verschlechtert. Ein bestimmtes Schema lässt sich dabei nicht erkennen.
- Die mit Ameisensäure vorbehandelten Proben haben sich ebenfalls und sogar am meisten verschlechtert. Hier ist der Winkel um über 18° gestiegen. Diese Proben wurden extern vorbehandelt, sodass der Benetzungswinkel nicht sofort gemessen werden konnten. Die Liegezeit ist nicht bekannt, dennoch lässt sich vermuten, dass der Winkel direkt nach der Vorbehandlung noch besser ist und vielleicht die Benetzungswinkel des Kaliumpermanganats übertreffen kann.

Nach dem Benetzungstest wird überprüft, ob dessen Ergebnisse mit den jeweiligen Oberflächen der Proben korrelieren, bzw. ob sich ein Schema zwischen den Winkeln und dem Aussehen der Oberflächen herstellen lässt. Um eine Oberflächencharakterisierung vornehmen zu können, werden die Proben unter einem digitalen Lichtmikroskop angeschaut. Die daraus resultierenden Bilder sind für PA 6 in der Anlage 3 und für PA 12 in der Anlage 4 dokumentiert.

Zu erkennen ist dabei, dass die Oberfläche des unbehandelten PA 6 sehr glatt ist, siehe Abbildung 34. Dies ist ebenfalls bei der unbehandelten PA 12 Probe der Fall und an der einheitlichen hellen Färbung zu erkennen. Jedoch sind auf den Oberflächen mitunter sehr viele Kratzer zu sehen, siehe Anlage 3, welche sich dunkel hervorheben.



Abbildung 34. Unbehandeltes PA 6 unter dem Lichtmikroskop mit 100-facher Vergrößerung

Vergleicht man diese Oberfläche mit dem PA 6, welches mit Ameisensäure vorbehandelt wurde, erkennt man eine deutliche Veränderung. Hier ist eine grobe Aufrauung aufgrund der nasschemischen Vorbehandlung zu sehen. Die Oberfläche wird neu strukturiert und es sind deutliche Krater entstanden, siehe Abbildung 35. Diese wirken voraussichtlich begünstigend für die spätere Verklebung. Die Kratzer werden durch die Vorbehandlung mit Ameisensäure weitestgehend beseitigt.



Abbildung 35. Mit Ameisensäure behandeltes PA 6 unter dem Lichtmikroskop mit 100-facher Vergrößerung

Ebenfalls eine sichtliche Aufrauung kann bei beiden Polymeren durch das mechanische Verfahren des Strahlens erreicht werden. Die Oberfläche wird hierbei allerdings viel feiner, siehe Abbildung 36, als bei der Ameisensäure aufgeraut. Durch die Aufrauung werden die Kratzer vollständig beseitigt. Allerdings sind Einschlüsse zu erkennen (siehe Abbildung 36, Beispiele in roten Kreisen), sodass sich vermuten lässt, dass ein Teil des Strahlguts oder Verschmutzungen in der Oberfläche eingebettet wurden. Zwischen den verschiedenen Zeiten beim Strahlen sind keine Unterschiede optisch zu erkennen. Jedoch muss eine unterschiedlich starke Aktivierung stattgefunden haben, da sich die Benetzungswinkel mitunter stark voneinander unterscheiden.



Abbildung 36. 15 s lang gestrahltes PA 6 unter dem Lichtmikroskop mit 500-facher Vergrößerung

Im Vergleich zu den gestrahlten Proben, ähneln die mit Kaliumpermanganat behandelten Oberflächen beider Polymere sehr den unbehandelten Proben. Zunächst scheint es zwar, als ob sich beim Kaliumpermanganat ebenfalls vereinzelte Krater gebildet hätten, siehe Abbildung 37, jedoch erscheinen diese unregelmäßig bei den verschiedenen Tauchzeiten. Dazu kommt, dass diese Krater oder auch Einschlüsse ebenfalls bei allen weiteren Vorbehandlungsverfahren ebenfalls regellos zu sehen sind. Daraus lässt sich schließen, dass diese Einkerbungen/Einschlüsse vermutlich schon vor den Vorbehandlungen in der Oberfläche vorhanden waren. Eine offensichtliche Veränderung zu den unbehandelten PA 6- und PA 12-Oberflächen ist bei der Vorbehandlung mit Kaliumpermanganat nicht erkennen. Dies gilt ebenfalls für die Verfahren mit dem Atmosphärendruckplasma, der Essig- und der Oxalsäure. Die Oberflächen sind bei jeder Parametervariation immer noch glatt und mit Kratzern versehen. Es hat sich gezeigt, dass kein optischer Zusammenhang zwischen den Benetzungswinkeln und den Probenoberflächen besteht.

Zur Vervollständigung werden die Rauheiten, der durch die Vorbehandlung erzeugten Oberflächen, mittels eines Tastschnittgerätes (Mahr Surf XCR) aufgenommen. Diese sind der Anlage 2 zu entnehmen, stehen jedoch ebenfalls in keiner Korrelation zu der Benetzung.



Abbildung 37. PA 12 nach 20-minütiger Tauchzeit in Kaliumpermanganat unter dem Lichtmikroskop mit 500-facher Vergrößerung

Nach der Untersuchung der Oberflächen mit dem digitalen Lichtmikroskop erfolgt die Metallisierung der Proben. Dazu müssen diese zunächst vorbehandelt werden. Mit jedem Vorbehandlungsverfahren werden jeweils 3 Proben des PA 6 und des PA 12 vorbereitet. Die Bearbeitungs-/Tauchzeit, bzw. die Spannung beim Atmosphärendruckplasma, wird dabei nach den zuvor bestimmten Benetzungswinkeln ausgewählt. Beispielsweise wurde beim Strahlen des PA 6 der kleinste Winkel bei 10 s Bearbeitungszeit erreicht, somit werden auch die 3 Proben mit dieser Zeit vorbehandelt.

Nach der Vorbehandlung werden die Proben mittels der chemischen Metallabscheidung wie folgt metallisiert:

- Für den außenstromlosen chemischen Metallisierungsprozess werden ein Aktivator und eine wässrige Elektrolyt-Lösung benötigt.
- Als Aktivator wird kolloidales Palladium bei einer Temperatur von 40 °C verwendet. Wird die Probe in dieses getaucht, führt dies dazu, dass Palladiumverbindungen an der aufgerauten Kunststoffoberfläche adsorbiert werden.
- Als Elektrolyt kommt eine Nickel-Phosphor-Lösung, auch chemisch Nickel genannt, zum Einsatz. Verwendet wird dafür das Elektrolyt DURNI-COAT® 520-12-50 der Firma RIAG Oberflächentechnik AG. Ein Auszug aus dessen Datenblatt ist in der Anlage 5 beigefügt.
- Nach der Aktivierung wird die Probe zunächst gespült und anschließend in das Nickelbad getaucht, welches auf 90°C erhitzt wird. An das zuvor angelagerte metallische Palladium können sich somit in dem Elektrolyten befindliche Nickelionen abscheiden. Diese werden im Prozessverlauf zu Nickelionen reduziert, wodurch sich eine Nickelschicht auf der Kunststoffoberfläche bildet.
- Der Vorteil dieses Verfahrens ist eine gleichmäßige Schichtdickenabscheidung.

Mittels dieses Verfahrens werden alle 3 Proben jedes Vorbehandlungsverfahrens und jedes Polyamids metallisiert. Die Tauchzeiten in dem Aktivator variieren dabei immer, sodass die besten, beziehungsweise wirtschaftlichsten, Metallisierungszeiten für die späteren Versuche festgelegt werden können. Die Tauchzeit in dem wässrigen Elektrolyten ist abhängig davon, wann die Nickelschicht auf der Kunststoffoberfläche zugewachsen ist. Dabei ergaben sich die in Tabelle 8 dargestellten Zeiten für den PA 6.

Vorbehandlungsverfahren	Tauchzeit in kolloidalem Palladium	Tauchzeit in chemisch Nickel
Strahlen	15 min	15 min
	10 min	10 min
	5 min	20 min
Kaliumpermanganat	10 min	5 min
	5 min	20 s
	5 min	5 min
Atmosphärendruckplasma	20 min	20 min
	10 min	10 min
	5 min	30 min
Essigsäure	15 min	15 min
	10 min	20 min
	5 min	30 min
Oxalsäure	15 min	15 min
	10 min	5 min
	5 min	20 min

Tabelle 8. Tauchzeiten der PA 6-Proben in Palladium und chemisch Nickel

Zu beachten ist dabei, dass der Nickelgehalt nach jeder Probe in dem Elektrolyten gesunken ist, da sich der Nickel auf der Probenoberfläche abscheidet. Daher wird das Nickelbad nach 2-3-maliger Benutzung durch einen Elektrolyten, bei welchem der Nickelgehalt eingestellt ist, ausgetauscht. Die Her- und Einstellung des Elektrolyten ist zeitaufwendig, sodass dieser nicht nach jeder Probe gewechselt werden konnte.

Trotz des Austauschens des Nickelbades waren die Metallisierungsergebnisse durchweg schlecht. Die Resultate sind der

Anlage 6 zu entnehmen. Dabei ist Folgendes auffällig:

- Die Nickelschicht sitzt nicht fest an dem Kunststoff, sondern bildet Blasen und Falten. Dadurch lässt sie sich bereits durch sehr geringe Krafteinwirkung ablösen.
- Die Nickelschicht kann nicht überall die gleiche Schichtdicke haben, da diese von einer oder mehreren Seiten langsam zuwächst, siehe Abbildung 38. Lediglich bei der Vorbehandlung mit Kaliumpermanganat hat sich sofort auf der gesamten Probe eine dünne Nickelschicht abgeschieden.
- Die gestrahlten Proben besitzen mit Abstand die besten Metallisierungsergebnisse. Hier kommt es zwar auch zu einer Faltenbildung, jedoch ist diese feiner und nicht so stark ausgebildet, wie die Faltenbildung bei allen anderen Vorbehandlungsverfahren.

Auf den PA 12-Proben hat sich überhaupt keine Nickelschicht abgeschieden. Daher finden diese keine Berücksichtigung in der Tabelle 8 und der

Anlage 6.



Abbildung 38. Zuwachsen der Nickelschicht auf der Probe

Theoretisch sollten nach der Metallisierung Gitterschnitte an allen Proben durchgeführt werden. Dies sollte der Feststellung dienen, mit welchen Tauchzeiten die Nickelschicht am besten auf der Kunststoffoberfläche haftet. Da jedoch schon optisch beurteilt werden kann, dass keine der Schichten halten wird, findet der Gitterschnitt keine Anwendung.

Mögliche Fehlerquellen der schlechten Metallisierungsschicht auf der Polymeroberfläche könnten sein:

- Eine Wasseraufnahme der beiden Kunststoffe PA 6 und PA 12 während der Metallisierung. Ein Versuch hat hierzu ergeben, dass die beiden Polymere nach der Metallisierung an Gewicht zugenommen haben. Dazu wurden diese zunächst gewogen, danach 20 min in den Elektrolyten getaucht (vorweg nicht in das Palladium) und anschließend wieder gewogen. Die Ergebnisse dazu sind in der Tabelle 9 dokumentiert. Die Gewichtszunahme ist zwar sehr gering, dennoch könnte zukünftig versucht werden auf ein anderes Metallisierungsverfahren zurückzugreifen.

Zeitpunkt	Gewicht des PA 6 in Gramm	Gewicht des PA 12 in Gramm
vor der Metallisierung	2,1253	1,8184
direkt nach der Metallisierung	2,1519	1,8231
1 Stunde nach der Metallisierung	2,1483	1,8223

Tabelle 9. Gewichtszunahme der Kunststoffproben

- Ein ungenügender Versuchsablauf der chemischen Metallabscheidung. In den Versuchen der Voruntersuchung wurden die Proben vorbehandelt, auch Konditionierung genannt, und mit kolloidalem Palladium bekeimt, bevor die Proben in den Elektrolyten getaucht wurden. Jedoch empfiehlt sich ein Versuchsablauf bestehend aus Konditionierung, Bekeimung, Aktivierung und anschließender Metallisierung. Das bedeutet, dass der Schritt der Aktivierung in den Versuchen übergangen wurde. Dieser hat allerdings die Funktion metallische Palladiumkeime auf den vorbehandelten Oberflächen zu erzeugen. Nach der Bekeimung liegt das kolloidale Palladium nämlich noch im Schutzkolloid vor, welches zerstört werden muss. Dieser Schritt wird auch Beschleunigung genannt, bei welchem, zum Beispiel durch Oxalsäure, die Hülle des Schutzkolloids entfernt und metallisches Palladium von der Kunststoffoberfläche adsorbiert wird. [34, S. 3]

Aufgrund der schlechten Metallisierungsergebnisse werden die Versuche ohne den Zwischenschritt der Kunststoffmetallisierung durchgeführt.

6.3 Versuchsplan

Vor der Versuchsdurchführung müssen die Versuche zunächst geplant und vorbereitet werden. Dafür muss zunächst die Zielstellung feststehen, um die entsprechenden Zielgrößen definieren zu können. Das Ziel ist es, die Kraft zu bestimmen, welche zur Zerstörung des Klebverbundes notwendig ist. Geprüft wird die Kraft durch einen Stirnabzug.

Für den Versuchsplan sind Variablen notwendig, die zuvor festgelegt werden müssen. Die Variablen, auch Einflussgrößen genannt, die den geklebten Metall-Polymer-Verbund charakterisieren sind:

- der Polymerwerkstoff,
- die Vorbehandlung (das Verfahren und dessen Parameter) des Polymers,
- das Metallisierungsverfahren des Polymers,
- der Klebstoff,
- das Basissubstrat, sowie
- dessen Vorbehandlung (das Verfahren und dessen Parameter) und
- Umwelteinflüsse.

Jede Einflussgröße zu variieren ist im Umfang der Arbeit nicht möglich. Demnach wurde Folgendes beschlossen:

- Der Versuchsplan wird auf der Grundlage der Polymere PA 6 und PA 12 erstellt, welche auch in der Voruntersuchung betrachtet wurden.
- Das Vorbehandlungsverfahren und somit die Aktivierung des Polymers kann einen signifikanten Einfluss auf die spätere Metallisierung haben. Daher werden alle untersuchten Vorbehandlungsverfahren in den Versuchsplan aufgenommen.
- Durch die Voruntersuchung hat sich ergeben, dass eine Metallisierung des Kunststoffes nicht in Frage kommt. Somit ist das Metallisierungsverfahren des Polymers als Einflussgröße hinfällig.
- Der Klebstoff wird während der Versuche nicht variiert und ist somit auch keine Variable im Versuchsplan. Verwendet wird der zähelastische Zweikomponenten-Konstruktionsklebstoff Scotch-Weld® 7236 B/A. Dieser härtet bei Raumtemperatur aus und ist für das Kleben von Kunststoff mit Metall prädestiniert.
- Das Basissubstrat, also der Fügepartner des Polymerstiftes, besteht im Normalfall ebenfalls aus Kunststoff. Aus Gründen der Reproduzierbarkeit wird der Kunststoff jedoch in den Versuchen durch einen Stahlstab mit einem Durchmesser von 6 mm ersetzt. Dadurch wird ein Versagen definitiv im Verbund erzielt und nicht im Werkstück. Das Aluminium wird dabei für jeden Versuch verwendet und ist somit nicht als Variable definiert.
- Normalerweise ist das Vorbehandlungsverfahren des Basissubstrats ein wichtiger Faktor. Jedoch ist die Vorbehandlung des dünnen Stahlstabes schwierig umzusetzen, sodass dieser nur mit einem mechanisch mit einem Schleiffließ angeraut wird und somit im Versuchsplan keine Berücksichtigung findet.

- Umwelteinflüsse, wie beispielsweise die Umgebungstemperatur, -feuchtigkeit und die Liegezeit der Kunststofffügepartner, werden ebenfalls nicht als Variablen in den Versuchsplan einbezogen. Sie sollen daher möglichst konstant gehalten werden, sodass die Versuchsergebnisse nicht verfälscht werden.

Die Variablen werden im Versuchsplan auch als Faktoren bezeichnet. Aus der Tabelle 10 ergeben sich somit zwei Faktoren: der Polymerwerkstoff und dessen Vorbehandlungsverfahren. Somit werden die beiden Kunststoffe PA 6 und PA 12 mit den Verfahren Strahlen, Kaliumpermanganat, Atmosphärendruckplasma, Essigsäure und Oxalsäure kombiniert.

Stufe \ Faktor	Polymerwerkstoff	Vorbehandlungsverfahren
1	PA 6	Strahlen
2	PA 12	Kaliumpermanganat
3		Atmosphärendruckplasma
4		Essigsäure
5		Oxalsäure

Tabelle 10. Variablen und deren Stufen für den Versuchsplan

Somit besitzt der eine Faktor zwei und der Andere fünf Stufen. Diese müssen untereinander kombiniert werden, wobei jede Verfahrenskombination 6-mal wiederholt werden soll. Die Replikationen sind für eine aussagekräftige Auswertung notwendig. Auf Grundlage der Faktoren und Stufen wird ein Versuchsplan erstellt. Dieser dient der Bestimmung der Versuchsanzahl und der -reihenfolge für die Messung der Kraft. Da die Stufen der beiden Faktoren variieren, wurde ein mehrstufig faktorieller Versuchsplan mit der statistischen Software Minitab, Auszug siehe Tabelle 11, erstellt. Aus diesem ergeben sich 60 Versuche in randomisierter Reihenfolge. Durch die Randomisierung soll eine Verfälschung der Ergebnisse vermieden werden. Der gesamte Versuchsplan ist der

Anlage 7 zu entnehmen. Die beiden Faktoren sind mit A und B und deren Stufen mit 1, 2, 3, 4 und 5 angegeben.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	StdRf>>	DlaufR>>	Punkttyp	Blöcke	A	B
1	27	1	1	1	2	2
2	9	2	1	1	2	4
3	10	3	1	1	2	5
4	13	4	1	1	1	3
5	26	5	1	1	2	1
6	3	6	1	1	1	3

Tabelle 11. Auszug aus dem Versuchsplan

Versuche anhand dieses Versuchsplanes durchzuführen ergibt sich als schwierig. Daher ist zu empfehlen, diesen zunächst umzuschreiben, beziehungsweise aufzuschlüsseln. Die Bezeichnung „A“ steht dabei für den Polymerwerkstoff und „B“ für das Vorbehandlungsverfahren. Die Stufenzuordnung ist der Tabelle 10 zu entnehmen. Daraus ergibt sich der folgende Versuchsplan, welcher auszugsweise in der Tabelle 12 dargestellt wird. Dieser ist vollständig in der

Anlage 8 beigefügt.

DlaufRfolg	Punkttyp	Blöcke	A	B	Polymerwerkstoff	Vorbehandlungsverfahren
1	1	1	2	2	PA12	KMnO4
2	1	1	2	4	PA12	Essigsäure
3	1	1	2	5	PA12	Oxalsäure
4	1	1	1	3	PA6	Plasma
5	1	1	2	1	PA12	Strahlen
6	1	1	1	3	PA6	Plasma

Tabelle 12. Auszug aus dem decodierten Versuchsplan

Zusätzlich werden die Proben, welche mit Ameisensäure gebeizt werden, ebenfalls untersucht. Aufgrund von Materialknappheit werden hier nur 4 Replikationen durchgeführt. Diese erfolgen anschließend zu den Versuchen aus dem Versuchsplan, sodass insgesamt 64 Versuche durchgeführt werden müssen. Somit kann jedes Verfahren mit der Haftfestigkeit der herkömmlichen Verklebung verglichen werden.

6.4 Versuchsdurchführung

Vor der eigentlichen Versuchsdurchführung, also der Kraftbestimmung durch einen Stirnabzug, müssen die Proben zunächst vorbereitet werden. Dazu zählt Folgendes:

- Die 60 Proben müssen zugeschnitten, entfettet und schließlich mit den 5 verschiedenen Vorbehandlungsverfahren jeweils 6mal für die beiden Polyamidwerkstoffe vorbehandelt werden. Die Probenvorbehandlung findet dabei mit der besten Parametervariation statt. Diese wird durch den Benetzungstest, während der Voruntersuchung (siehe Kapitel 7.2), definiert.
- Die Stahlstäbe müssen zugeschnitten und geschliffen werden. Dazu wird das Metall nass mit einem Schleifvlies geschliffen, sodass es zu einer Anrauhung der Oberfläche kommt.

Bevor die beiden Teile miteinander verklebt werden können, muss zunächst eine Vorrichtung für den Klebeprozess konstruiert und gefertigt werden. Diese soll gewährleisten, dass die Stahlstäbe möglichst in einem 90° Winkel auf die Kunststoffproben geklebt werden. Durch das senkrechte Platzieren des Stabes wird die Aufnahme von Querkräften beim Stirnabzug vermieden. Die technische Zeichnung für die Vorrichtung ist in der

Anlage 9 beigefügt.

- Im nächsten Schritt wird der Kleber vorbereitet. Da es sich hierbei um einen Zweikomponenten-Klebstoff handelt, muss dieser im richtigen Verhältnis angemischt werden.
- Danach können die beiden Bauteile verklebt werden. Die Kunststoffplatte wird dazu auf eine ebene Fläche gelegt, der Kleber mittig auf der Probe verteilt und die Vorrichtung über dieser platziert. Anschließend wird der Metallstab durch die Bohrung der Vorrichtung gesteckt und leicht angedrückt. Nach kurzer Zeit wird die Vorrichtung wieder vorsichtig entfernt.
- Nachfolgend wird der überschüssige Klebstoff, welcher durch das Andrücken verdrängt wurde, weitestgehend entfernt (siehe Abbildung 39). Das Ziel ist es dabei, eine möglichst gleich große Klebefläche bei allen Proben zu garantieren.

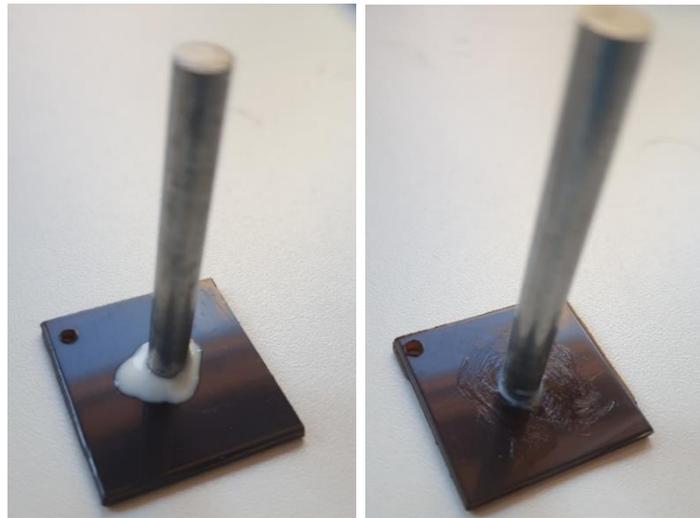


Abbildung 39. Geklebte Probe vor (links) und nach (rechts) dem Entfernen des überschüssigen Klebstoffs

- Der Klebstoff benötigt normalerweise bei Raumtemperatur 7 Tage, um komplett auszutrocknen und auszuhärten. Um die Zeit verkürzen zu können, werden die Proben für 16 Stunden bei 65°C in einem Wärmeschrank getrocknet. Dies ist laut der Produkt-Information des Klebstoffes (Auszug siehe Anlage 10) legitim.
- Bevor die fertigen Versuchsproben auf deren Haftfestigkeit geprüft werden können, muss zunächst eine weitere Vorrichtung konstruiert und gefertigt werden. Diese ist notwendig, um die Proben in der Prüfmaschine einspannen zu können. Dazu wird die Vorrichtung zwischen die oberen Spannbacken der Zugprüfmaschine gespannt (siehe Abbildung 40). Dies hat den Hintergrund, dass der Metallstab der Probe somit einfacher in die runde Aussparung der unteren Spannbacken ausgerichtet werden kann. Die technische Zeichnung der Spannvorrichtung ist der Anlage 11 zu entnehmen.

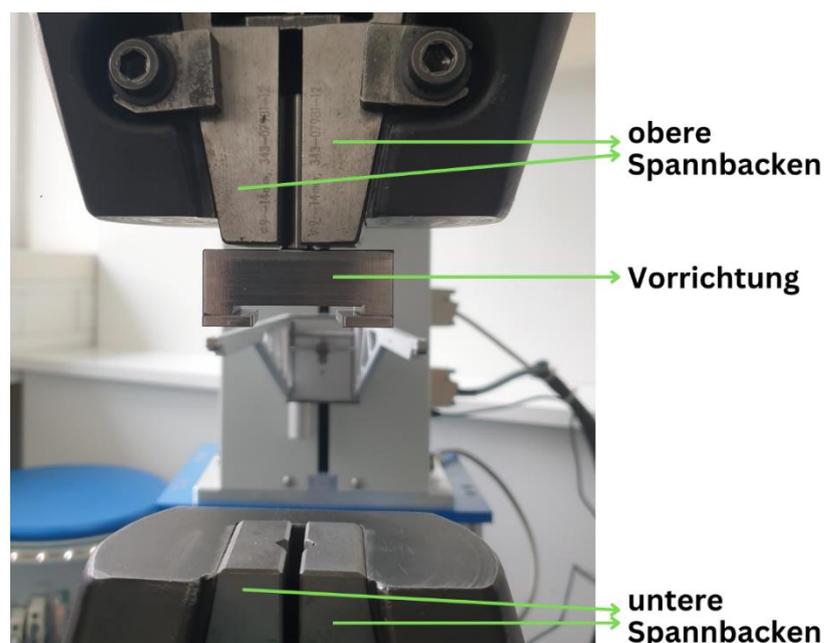


Abbildung 40. Einspannung der Vorrichtung in der Zugprüfmaschine

Nachdem die Vorbereitung abgeschlossen ist, können die Versuche durchgeführt werden. Dabei wird sich an die Durchlaufreihenfolge aus dem Versuchsplan gehalten. Der Durchlauf aller Versuche wird im Folgenden beispielhaft anhand der ersten Probe erläutert:

- Der erste Stirnabzug erfolgt an einer PA 12-Probe, welche mit Kaliumpermanganat vorbehandelt wurde. Die Kunststoffplatte wird dazu zunächst in die Vorrichtung geschoben.
- Die oberen Spannbacken der Zugprüfmaschine werden so weit nach unten gefahren, dass der Abstand zwischen der Kunststoffplatte und den unteren Spannbacken 2 cm beträgt. Anschließend wird zwischen diesen der Metallstab der Probe gespannt (siehe Abbildung 41).

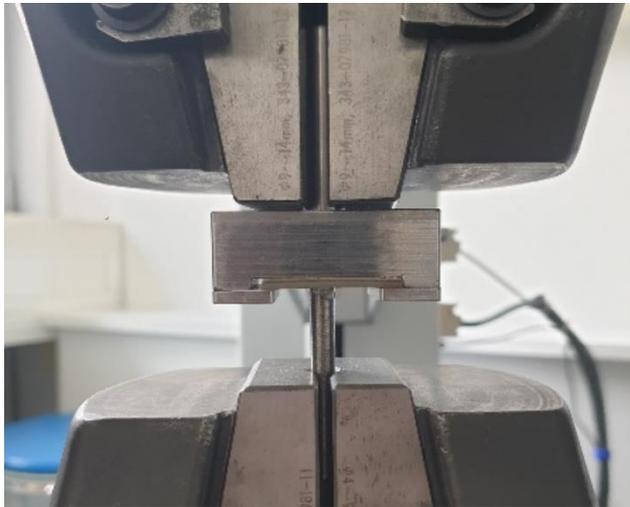


Abbildung 41. Eingespannte Probe in der Zugprüfmaschine

- Während des Stirnabzugs bleiben die unteren Spannbacken auf ihrer Position und die Oberen bewegen sich aufwärts. Dazu wird in der dazugehörigen Software „LabMaster“ Folgendes vorgegeben:
 - Der Test startet erst bei einer Kraft von 3 N. Die Geschwindigkeit der Maschine beträgt dabei 0,5 mm/min.
 - Werden die 3 N überschritten, erhöht sich die Geschwindigkeit auf 1 mm/min.
 - Der Test wird bei einem Kraftabfall der Maximalkraft von 90% beendet.
- Während die Kunststoffplatte von dem Metallstab abgezogen wird, zeichnet die Software parallel ein Kraft-Weg-Diagramm auf. Dieses ist für die erste Probe der Versuchsreihe in der Abbildung 42 dargestellt.

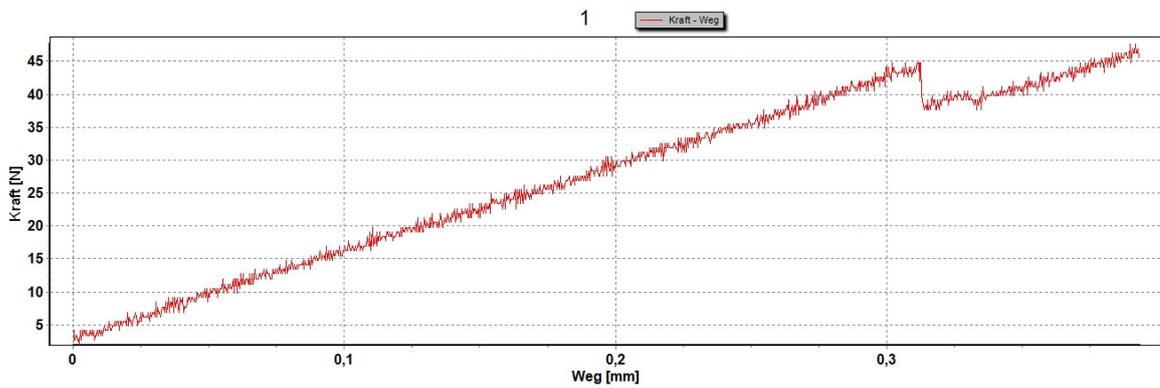


Abbildung 42. Kraft-Weg-Diagramm der ersten Probe

- Nach dem Bruch der Probe werden beide Teile ausgespannt und die nächste Probe wieder eingespannt.
- Eine Besonderheit bilden dabei die PA 6-Proben, welche mit Ameisensäure vorbehandelt wurden. Hierfür werden keine Platten verwendet, sondern das eigentliche Bauteil, da die Stempel bereits extern vorbehandelt wurden. Demnach ist bei diesen Proben die Spannvorrichtung nicht notwendig. Der Stempel wird dabei so weit wie möglich in die oberen Spannbacken und der Metallstab in die Unteren eingespannt. Dabei werden auch hier die 2 cm Abstand eingehalten (siehe Abbildung 43).

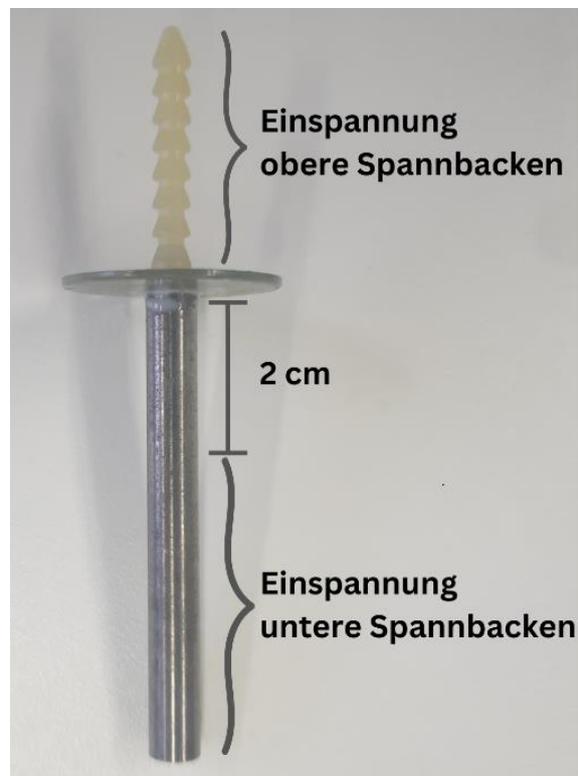


Abbildung 43. Einspannung der mit Ameisensäure vorbehandelten PA 6-Probe

Die während des Versuchsdurchlaufs aufgezeichneten Daten, besonders die Maximalkräfte, werden tabellarisch zusammengefasst. Die gesamte Tabelle ist der Anlage 8 zu entnehmen. Diese Werte müssen im Anschluss verglichen und ausgewertet werden.

7 Versuchsauswertung

Direkt nach den Versuchen können zunächst nur optische Vergleiche gezogen werden. Dabei ist auffällig, dass alle 60 Proben an der Klebestelle versagt haben (siehe Abbildung 44). Wie zu erwarten war, kam es also nicht zum Versagen in dem Metallstab oder der Kunststoffplatte. Zusätzlich ist zu erkennen, dass die Versagensstelle zwischen der Klebschicht und der Kunststoffplatte ist. Der Klebstoff haftet demnach noch am Metallstab und wurde vom Polymer abgezogen. Lediglich bei einigen mit Atmosphärendruckplasma behandelten Proben ist es genau umgekehrt. Dort haftet der Klebstoff noch auf der Kunststoffplatte (siehe Abbildung 44, Versuch 37). Ob und inwiefern sich dies bei den gemessenen Kräften widerspiegelt, wird sich zeigen.

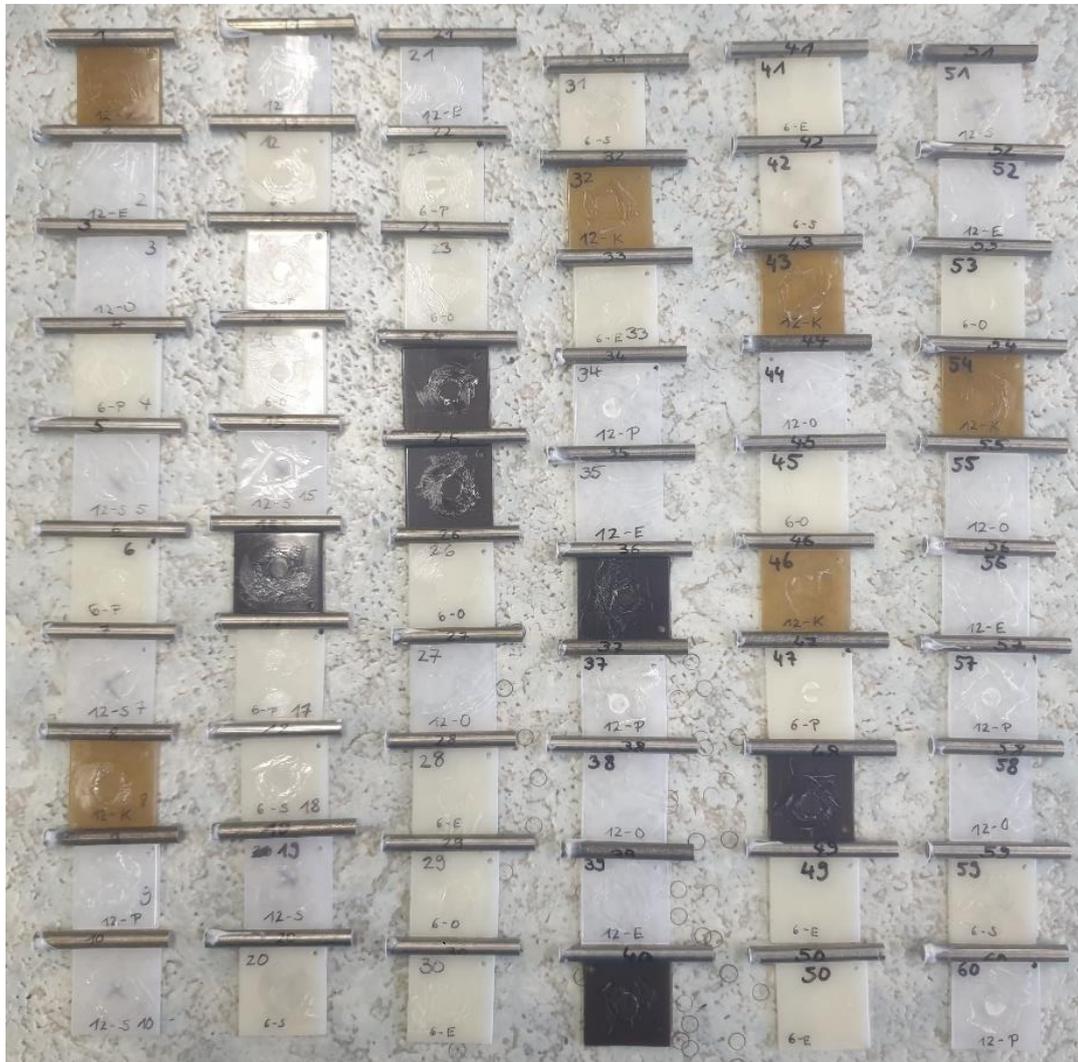


Abbildung 44. Proben nach dem Stirnabzug

Die 4 Proben, bei welchen die Oberfläche mit Ameisensäure vorbehandelt wurde, weisen unterschiedliche Versagensstellen auf. Zwei Proben sind dabei an der Klebestelle gerissen und bei den anderen Beiden kam es zum Werkstoffversagen im Kunststoff, siehe Abbildung 45. Dort wo die Probe an der Klebestelle gerissen ist, ist die eigentliche Versagensstelle nicht zwischen dem PA 6 und dem Stahlstab, sondern zwischen dem Grundwerkstoff des PA 6 - Stempels und dessen vorbehandelter Oberfläche. Die gebeizte Schicht, welche gräulich gefärbt ist, ist somit abgerissen worden und der gelbliche Grundwerkstoff kommt zum Vorschein. Dadurch ist ein klebetechnischer Fehler unwahrscheinlich, sodass der Grund für das Versagen aus der Vorbehandlung oder aus der Liegezeit des Stempels resultieren muss. Bei den Proben, bei denen die Versagensstelle der Kunststoffstempel ist, hat sich dieser zunächst eingeschnürt, bis es schließlich zum Bruch kam. Somit ist die Haftfestigkeit des Klebstoffs zwischen dem PA 6 und dem Stahlstab größer als die Zugfestigkeit des Kunststoffstempels.

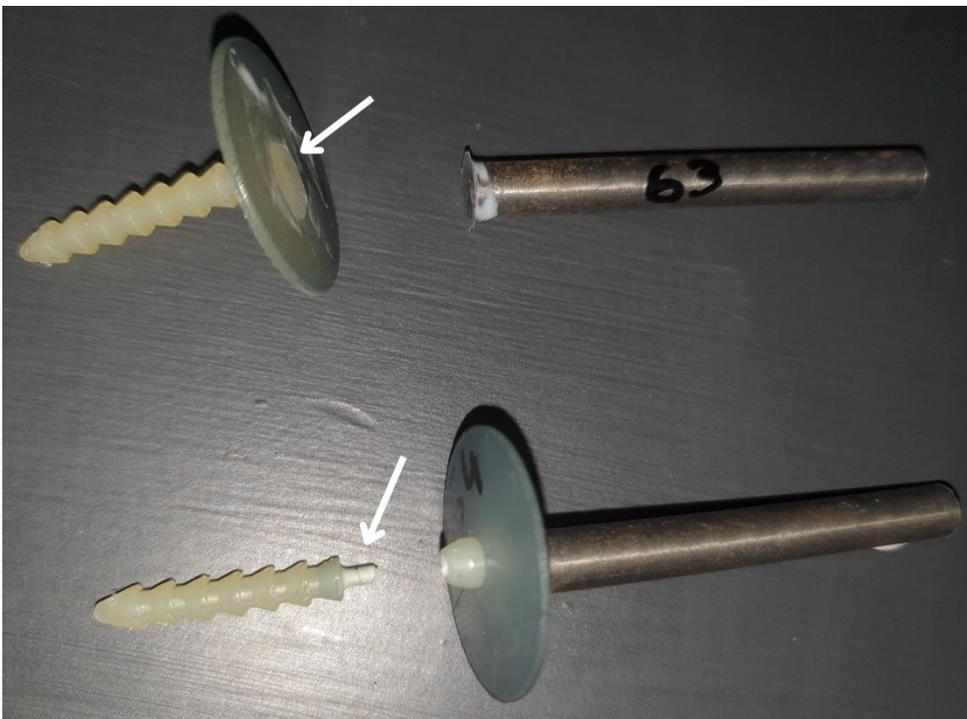


Abbildung 45. Versagensstelle Klebschicht (oben) und Versagensstelle Kunststoffstift (unten) der mit Ameisensäure vorbehandelten PA 6 – Proben

Die Auswertung der erfassten Daten erfolgt zunächst mittels der statistischen Software Minitab, mit welcher auch der Versuchsplan erstellt wurde. Dieser wird zunächst um die gemessenen Maximalkräfte erweitert und anhand der allgemeinen faktoriellen Regression ausgewertet. Die Antwortvariable ist dabei die Kraft (F) in Abhängigkeit vom Werkstoff (Werk) und dem Vorbehandlungsverfahren (Vorbe). Anhand dieser Angaben erstellt das Programm ein Modell (siehe Anlage 12) welches im Folgenden gedeutet wird. Alle wichtigen Werte, auf welche eingegangen wird, sind in der Anlage 12 gekennzeichnet.

- Die erste Tabelle beinhaltet Werte der Varianzanalyse. Hier ist zunächst der p-Wert interessant, welcher unter 0,05 liegen sollte. Da die p-Werte des Werkstoffs und des Vorbehandlungsverfahrens unter diesem Wert liegen, sind beide in Bezug auf die Antwortvariable F signifikant.
- Ein weiterer Wert, der dieser Tabelle und der Nächsten zu entnehmen ist, ist das R-Qd oder auch R^2 genannt. Dieses beschreibt mit wie viel Prozent das Modell die Zufallsstreuung erklärt. Dabei kann das R^2 Werte von 0 % - 100 % umfassen, wobei der Richtwert bei 70 % liegt. Das R^2 des Modells liegt über dieser Angabe bei 81,12 %, sodass dieses gut an die Daten angepasst und somit aussagekräftig ist. Es bleibt somit ein Fehler von 18,88 %.
- Die nächste Tabelle schlüsselt die einzelnen Koeffizienten, sowie deren Wechselwirkungen auf. Auch hier ist wieder der p-Wert entscheidend, welcher unter 0,05 liegen sollte. Demnach ist zu erkennen, dass die Vorbehandlung mittels Strahlen (Vorbe 1) nicht ganz so signifikant für die gemessene Kraft F ist, wie alle anderen Verfahren. Dies könnte auf eine große Streuung der Kräfte bei den gestrahlten Proben hindeuten.
- Des Weiteren erstellt Minitab eine Regressionsgleichung, anhand welcher man die Kraft zum Zerstören des Klebverbundes theoretisch vorher berechnen kann. Für die Kombination aus Werkstoff und Vorbehandlungsverfahren, für die man die benötigte Kraft prognostizieren möchte, setzt man die Werte aus dem Versuchsplan ein. Nimmt man beispielsweise den Werkstoff PA 6, welcher mit Essigsäure vorbehandelt werden soll, setzt man für die Bezeichnungen Werk_1 und Vorbe_4 die jeweiligen Zahlen aus dem Versuchsplan, also 1 und 4, ein. Alle anderen Bezeichnungen setzt man gleich 0.
- Als Nächstes ist aus der Anlage 12 das Pareto-Diagramm zu entnehmen. Dieses stellt den Einfluss der einzelnen Faktoren auf die Kraft F geordnet dar. Somit hat das Vorbehandlungsverfahren einen größeren Einfluss als der gewählte Werkstoff oder deren Wechselwirkung. Dennoch sind alle 3 Terme A, B und AB signifikant für die Kraft, da sie über der roten Referenzlinie liegen. Diese wird durch den t-Wert gebildet.
- Zusätzlich zu dem Pareto-Diagramm werden noch verschiedene Residuendiagramme, siehe Abbildung 46, ausgegeben.
 - a) Dieses Diagramm zeigt an, ob die Residuen normalverteilt sind. Ein Residuum ist die Abweichung des Vorhersagewertes zu dessen gemessenen Wertes. Je kleiner die Abweichung, desto besser. Demnach sollten die blauen Punkte ungefähr auf der roten Geraden liegen, was hier der Fall ist.
 - b) Das Diagramm dient der Feststellung, ob eine Zufälligkeit in der Verteilung der Residuen auftritt. Diese ist gewünscht. weshalb die blauen Punkte zufällig unter- und oberhalb der Nulllinie verteilt sein sollten. Wenn ein Muster oder ein Trend zu erkennen ist, lässt sich daraus auf ungewollte Einflüsse schließen. Dies ist hier allerdings nicht der Fall.
 - c) Das Histogramm sollte der Kurve einer Normalverteilung ähneln, was bedeutet, dass die Residuen um Null, bzw. mit einer kleinen Abweichung, häufiger vorkommen als die mit einer Großen. Dies geht aus dem Diagramm deutlich hervor.

- d) Das letzte Diagramm dient ebenfalls, wie das Zweite, zur Überprüfung einer zufälligen Verteilung der Residuen. Die blauen Punkte sollten demnach auch hier kein Muster bilden, sondern verstreut um die Nulllinie sein. Ein solches ist nicht zu erkennen, sodass auch hier hervorgeht, dass die Residuen unabhängig sind.

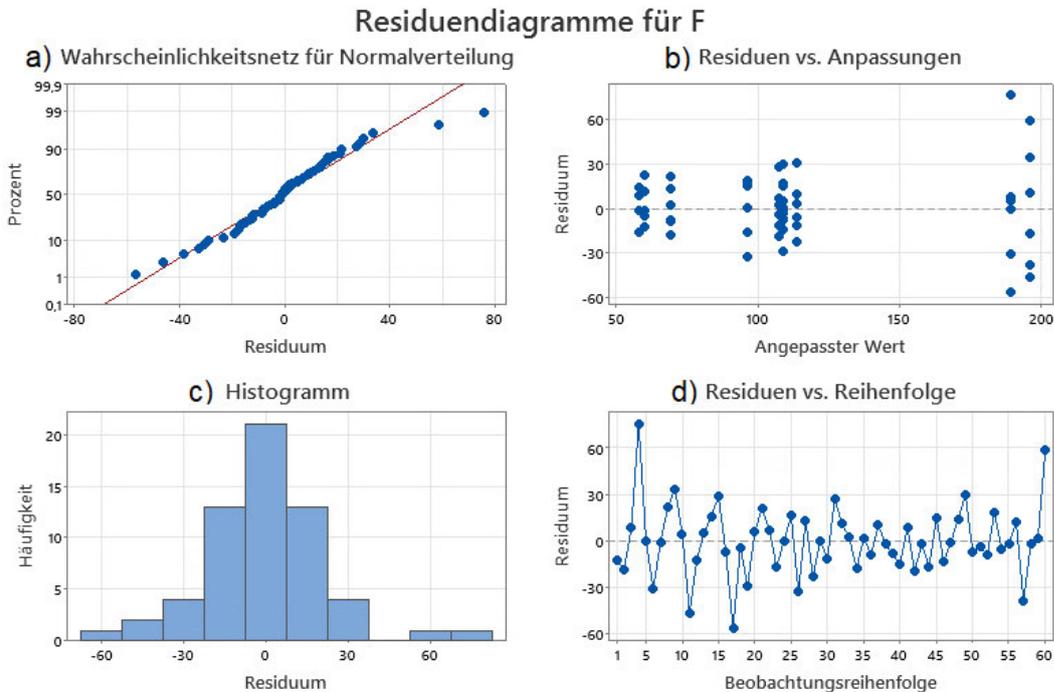


Abbildung 46. Mit Minitab erstellte Residuendiagramme für die gemessenen Kräfte

Das Modell entstand auf der Grundlage von 60 Versuchen, d.h. auf 6 Replikationen je Versuchskombination. Je höher die Anzahl der Wiederholungen ist, desto sicherer werden die Ergebnisse der Streuungsparameter und der Mittelwerte. Hierbei gelten Versuche ab ca. 30 Replikationen als restlos aussagekräftig. Eine solche Anzahl an Wiederholungen ist allerdings nicht umsetzbar, da der Zeitraum zur Versuchsdurchführung begrenzt war. Das Modell verschafft demnach einen ersten Überblick zur Auswertung, könnte aber fehlerbehaftet sein. Deshalb werden die aufgezeichneten Daten während der Versuche zusätzlich visuell mittels Excel dargestellt und verglichen.

Dazu werden Kraft-Weg-Diagramme (siehe Anlage 13) erstellt, in welche die Graphen aller 6 Replikationen jeder Versuchskombination eingetragen werden. Dadurch lassen sich die Anstiege der Graphen und die Maximalkräfte jeder Versuchswiederholung miteinander vergleichen. Dazu werden zunächst beispielhaft die gestrahlten PA 6 - Proben betrachtet, deren Diagramm in der Abbildung 47 dargestellt ist.

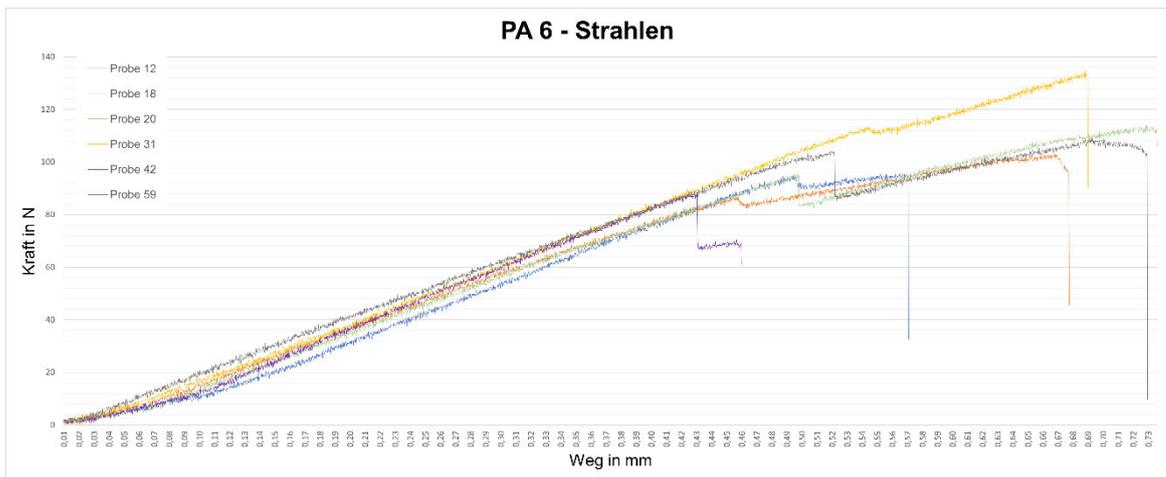


Abbildung 47. Kraft-Weg-Diagramm der gestrahlten PA 6 - Proben

Aus dem Diagramm geht Folgendes hervor:

- Die Maximalkräfte schwanken ungefähr von 90 N bis zu 135 N.
- Bei allen Proben sind Kraftabfälle aufgetreten. Nach dem Abfall steigt die Kraft bei fast allen Proben weiterhin so stark an, dass ein neues Maximum erreicht wird. Lediglich bei der Probe 42 bleibt die Kraft nach dem Abfall unter dem Maximum.
- Der Anstieg der einzelnen Graphen ist ungefähr gleich groß und bleibt auch nach den Kraftabfällen stetig.
- Ein Ausreißer ist nicht zu verzeichnen.

Die Interpretationen der anderen Diagramme sind tabellarisch in der Anlage 14 zusammengefasst. Hier sind mitunter große Schwankungen bezüglich der Maximalkräfte und ebenfalls Kraftabfälle aufgetreten. Diese können folgende Hintergründe haben:

- Die großen Differenzen bezüglich der Maximalkräfte der einzelnen Proben bei gleicher Versuchskombination lassen sich aufgrund der Kalibrierung der Zugprüfmaschine erklären. Diese wird vorwiegend für größere Kräfte eingesetzt und ist daher im Bereich von 0,4 kN – 100kN kalibriert. In diesem beträgt sie eine mittlere relative Abweichung von gerade einmal 0,02%. Im Bereich unter den 400 N und besonders unter 200 N wird diese Abweichung allerdings viel größer. Da die Kräfte vieler Proben unter 200 N liegen, kommt es hier zu Schwankungen. Theoretisch sollte daher eine Maschine, welche speziell für Haftfestigkeitsversuche ausgelegt ist zum Einsatz kommen. Diese hätte jedoch deutlich mehr Konstruktionsaufwand hinsichtlich erforderlicher Vorrichtungen verlangt, was im begrenzten Zeitraum der Versuchsdurchführung nicht möglich gewesen wäre.
- Aufgetretene Kraftabfälle können zwei Ursachen haben. Zum einen können diese auf ein Wackeln oder Rutschen der Probe hindeuten. Dazu kann es kommen, da die Probe lediglich in die Vorrichtung geschoben wurde und somit nicht beidseitig fest eingespannt werden konnte. Zum anderen ist ein Kraftabfall zu verzeichnen,

wenn es zu einem ersten Anriss in der Klebschicht kommt. Dies war akustisch deutlich durch ein Knacken wahrzunehmen.

- Die Beurteilung von Ausreißern erweist sich als schwierig, aufgrund der eingeschränkten Kalibrierung der Zugprüfmaschine in den niedrigen Kraftbereichen, sowie den relativ wenigen Wiederholungen.

Schlussendlich fehlt noch der Vergleich zu den Referenzproben. Diese bilden die mit Ameisensäure vorbehandelten PA 6 - Proben. Deren Graphen sind in der Abbildung 48 dargestellt und werden folgend analysiert:

- Die Maximalkräfte der einzelnen Versuchsdurchläufe schwanken hier sehr stark. Deren Minimum liegt bei 173,7 N und das Maximum bei 482,4 N.
- Die Verläufe der einzelnen Graphen sind ebenfalls sehr unterschiedlich. Die Graphen der Proben 61 und 63 besitzen einen steilen Anstieg und verlaufen mit diesem linear und stetig bis zum Bruch, welcher schon nach kurzer Zeit eintritt. Demnach werden hierbei jeweils keine großen Kräfte erzielt. Im Vergleich dazu unterscheiden sich die anderen beiden Graphen in ihrem Verlauf enorm. Auch dort steigen die Graphen zunächst stetig an, flachen danach ab und erreichen dort ihr Maximum, fallen dann kurvenförmig ab, um später wieder etwas anzusteigen. Ein neues Maximum wird bei dem zweiten Anstieg allerdings nicht erreicht. Anhand dieser Graphen lässt sich auf eine Verformung des Kunststoffes hindeuten. Im Bereich der Kraftsenkung kam es somit zu einem Einschnüren des Polyamids. Die Probe ist hierbei also nicht an der Klebestelle gerissen, sondern es kam zu einem Werkstoffversagen. Dieses konnte hier aufgrund der Bauteilgeometrie des Kunststoffes nicht verhindert werden. Hätte dies allerdings verhindert werden können, wären die Kräfte vermutlich noch deutlich höher gewesen.
- Aufgrund der wenigen Versuche lässt sich schwer beurteilen, bei welchen Graphen es sich um Ausreißer handelt. Da sich allerdings die Graphen der Proben 62 und 64 überlagern und es hierbei sogar zu einem Werkstoffversagen kommt, wird davon ausgegangen, dass es sich bei den Proben 61 und 63 um Ausreißer handelt.

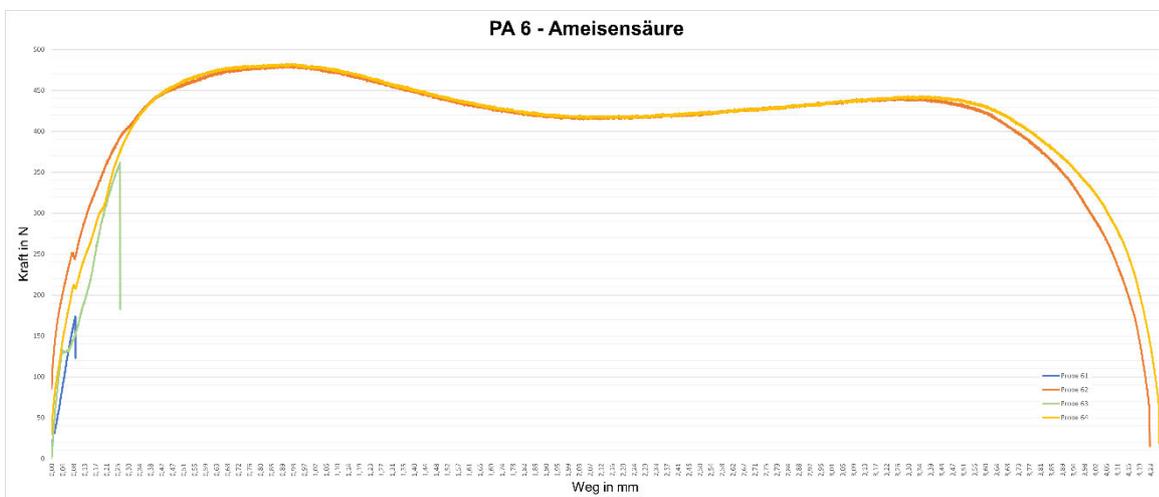


Abbildung 48. Kraft-Weg-Diagramm der Referenzproben

Um die Maximalkräfte aller Versuche, mit denen der Referenzproben vergleichen zu können, werden die Kräfte in Balkendiagrammen veranschaulicht (siehe Anlage 15). Dafür wird jeweils eins für die Versuche der PA 6 - Proben und eins für die der PA 12 - Proben erstellt. In beiden sind die Maximalkräfte, der mit Ameisensäure vorbehandelten Proben, dargestellt. Diese sind mit Abstand bei beiden Werkstoffen am höchsten. Danach folgen die Proben, welche mittels Atmosphärendruckplasma vorbehandelt wurden. Dies gilt ebenfalls für PA 6 - Versuche und die PA 12 - Versuche. Hier wurde demnach eine gute Haftfestigkeit zwischen den beiden Werkstücken erreicht. Vergleicht man dieses Resultat mit den optischen Ergebnissen aus Abbildung 44, stimmen diese überein. Das bedeutet, dass die Haftfestigkeit zwischen der Klebschicht und dem Polyamid so gut war, dass sich der Verbund zwischen der Klebschicht und dem Stahlstab gelöst hat. Dies könnte bedeuten, dass eine bessere Vorbehandlung des Stabes noch höhere Kräfte erzielen könnte. Alle anderen Vorbehandlungsverfahren bewegen sich bei den PA 6 - Proben ungefähr in der gleichen Größenordnung und setzen sich in Bezug auf die Maximalkräfte nicht sonderlich voneinander ab. Beim PA 12 heben sich die gestrahlten Proben nochmals etwas hervor, sind jedoch in Bezug zu den mit Atmosphärendruckplasma behandelten Proben, deutlich geringer.

Eine gute Alternative zur Vorbehandlung mit Ameisensäure konnte demnach nicht gefunden werden. Am ehesten könnte dieses Verfahren durch eine Behandlung mit Atmosphärendruckplasma ersetzt werden. Dies müsste dafür jedoch nochmals genauer untersucht werden. Ansätze sind hier zum Beispiel eine noch langsamere Geschwindigkeit des Plasmabrenners über dem Polyamid und eine bessere Vorbehandlung des Metallstabes, beispielsweise ebenfalls mit Atmosphärendruckplasma.

8 Zusammenfassung

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigte sich mit Untersuchungen zum Fügen von hybriden Materialkombinationen. Dies beinhaltet das Fügen von verschiedenen Werkstoffarten, wie in diesem Fall Metall und Kunststoff. Unterscheiden kann man hierbei zwischen Verbundwerkstoffen und Werkstoffverbunden. Solche Leichtbaukomponenten sind besonders im Flugzeugbau prädestiniert, um möglichst viel am Gewicht der Flugzeuge zu sparen.

Der Hauptschwerpunkt sollte auf dem Kleben liegen, wobei es sich um einen Werkstoffverbund handelt. Dessen Haftfestigkeit sollte mittels eines Stirnabzugs überprüft werden. Neben dem Kleben wurden noch andere Fügeverfahren für Werkstoffverbunde kurz vorgestellt. Vor jedem Verfahren ist eine Vorbehandlung der Fügepartner unabdingbar. Diese ist besonders notwendig, da zwei verschiedene Werkstoffklassen miteinander gefügt werden müssen, welche beispielsweise verschiedene Oberflächenzustände aufweisen. Dennoch bleibt eine Metall-Polymer-Klebung besonders auf die Auswahl der Klebstoffparameter und der Art des Klebstoffes schwierig. Daher wurde untersucht, ob die Polyamide PA 6 und PA 12 metallisiert werden können. Dies hätte den Vorteil, dass somit Metall auf Metall geklebt werden kann.

Die bisherige Vorbehandlung der Kunststoffkomponente erfolgt mittels Ameisensäure. Da dieses Verfahren unwirtschaftlich ist, sollten zudem andere Vorbehandlungsverfahren untersucht werden. Entschieden wurde sich dabei auf die Vorbehandlungen mittels Strahlen, Kaliumpermanganat, Atmosphärendruckplasma, Essigsäure und Oxalsäure. Nach der Vorbehandlung der Proben, wurden diese mit der chemischen Metallabscheidung metallisiert. Dazu wurde ein Nickel-Phosphor-Elektrolyt, auch chemisch Nickel genannt, eingesetzt.

Jedoch waren die Metallisierungsergebnisse aller Proben sehr schlecht. Die Nickelschicht auf den PA 6 - Proben bildete Falten und hat sich schon ohne große Krafteinwirkung von der Kunststoffoberfläche ablösen lassen. Auf den PA 12 - Proben hat sich keine Nickelschicht abgeschieden. Demnach wurden die Haftfestigkeitsversuche ohne eine Metallisierung des Kunststofffügepartners durchgeführt.

Die Stirnabzüge wurden an einer Zugprüfmaschine durchgeführt und die Maximalkräfte jedes Versuches dokumentiert. Dabei ergab sich, dass bei keinem der Vorbehandlungsverfahren so große Kräfte auftraten, wie bei der Vorbehandlung mit Ameisensäure. Also kann keines der Verfahren das Bisherige vertretbar ablösen. Am höchsten waren die Kräfte der gewählten Vorbehandlungsverfahren bei der Vorbehandlung mit Atmosphärendruckplasma. Bevor dieses Verfahren jedoch in der Praxis umgesetzt werden könnte, sind dazu noch weitere Untersuchungen notwendig.

9 Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Seidel, Wolfgang W. ; Hahn, Frank: Werkstofftechnik: Werkstoffe – Eigenschaften - Prüfung - Anwendung. - 11. Auflage. - Regensburg: Carl Hanser Verlag, 2018
- [2] Kunst, Sabine : Metallbindung - das Elektronengasmodell. URL: <https://is.gd/1hrKuE>, 20.08.2023
- [3] Punke, Dirk ; Thalmann, Felix : Unterschiede im Aufbau: Die Eigenschaften der Kunststoffgruppen. URL: <https://thermoplasticcomposites.de/de/2019/12/03/kunststoffgruppen/>, 21.08.2023
- [4] Saborowski, Erik: Zusammenhang zwischen Struktur der Metalloberfläche und Verbundfestigkeit am Beispiel thermisch gefügter Metall-Thermoplast-Verbunde. - 2022. – 145 S. Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2022
- [5] Roderus, Michael: Ultraschallunterstütztes thermisches Direktfügen von faserverstärkten Thermoplasten mit Aluminium – 2022. – 113 S. Dresden, Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Dissertation, 2022
- [6] AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.: Handbuch Faserverbundkunststoffe: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendung. - 3. Auflage. - Niederlande: Vieweg + Teubner, 2010
- [7] Dröder, Klaus: Prozesstechnologie zur Herstellung von FVK-Metall-Hybriden: Ergebnisse aus dem BMBF-Verbundprojekt ProVor^{Plus}. – 1. Auflage. – Berlin: Springer Vieweg, 2020
- [8] Lotte, Jens: Neues Fügeverfahren für Kunststoff-Metall-Hybridstrukturen. – 2022. – 152 S. - Band 1. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Fakultät für Maschinenwesen, Shaker Verlag, Dissertation, 2022
- [9] Knights, Mikell : In-Mold Assembly: The New Frontier for Multi-Shot Molding. URL: <https://www.ptonline.com/articles/in-mold-assembly-the-new-frontier-for-multi-shot-molding>, 20.08.2023
- [10] Ridder, H. ; Schnieders, J.: Hybridspritzgießen: Möglichkeiten und Grenzen. - 3 Pi Consulting und Management GmbH - Paderborn
- [11] Agerer, Markus Sebastian : In-Mold-Decoration (IMD) / Folienhinterspritzen beim Spritzgießen. URL: [In-Mold-Decoration \(IMD\) / Folienhinterspritzen beim Spritzgießen](#), 25.08.23

- [12] Hinse, Cristoph ; Kurz, Marc ; Steffen Paul : Folienhinterspritzen bzw. In-Mold-Decoration (IMD) veredelt ihre Bauteile. URL: [Folienhinterspritzen bzw. In-Mold-Decoration \(IMD\) veredelt ihre Bauteile | Simpatec](#) , 25.08.23
- [13] Wünsche, Veikko : Inmold-Decoration. URL: [Inmold-Decoration](#) , 25.08.23
- [14] Gerstmann, Thoralf ; Lüder, Stephan ; Awiszus, Birgit ; Riedel, Frank : Neue Verfahrenstechnologie – Kombination von Flach-Clinchen mit modernen Klebstoffen. URL: <https://werkstoffzeitschrift.de/neue-verfahrenstechnologie-kombination-von-flach-clinchen-mit-modernen-klebstoffen/>, 26.08.2023
- [15] Endemann, Ulrich ; Glaser, Stefan ; Völker, Martin: Kunststoff und Metall im festen Verbund - Verbindungstechnik für Kunststoff-Metall-Hybridstrukturen. In: Kunststoffe: Werkstoffe – Verarbeitung – Anwendung., 92 (2002), S. 110-113.
- [16] van der Straeten, Kira Martina: Laserbasiertes Fügen von Kunststoff-Metall-Hybridverbindungen mittels selbstorganisierter Mikrostrukturen. - 2020. – 135 S. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation, 2020
- [17] Flock, Dustin: Wärmeleitungsfügen hybrider Kunststoff-Metall-Verbindungen. – 2011. – 164 S. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation, 2011
- [18] Norm DIN 2304-1. Klebtechnik – Qualitätsanforderungen an Klebprozesse – Teil 1: Prozesskette Kleben. April 2020
- [19] Habenicht, Gerd: Kleben - erfolgreich und fehlerfrei: Handwerk, Praktiker, Ausbildung, Industrie. – 7. Auflage. - Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016
- [20] Habenicht, Gerd: Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen. – 6. Auflage. - Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009
- [21] Haye, Vera: Leitfaden: Kleben – aber richtig. URL: <https://leitfaden.klebstoffe.com/> 01.09.2023
- [22] Sörgel, Timo: Jahrbuch Oberflächentechnik. – Band 73. - Bad Saulgau: Leuze Verlag, 2017
- [23] Brockmann, W. ; Dorn, L. ; Käufer, H.: Kleben von Kunststoff mit Metall. – 1. Auflage. - Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1989
- [24] Leibinger, Peter : Laserstrukturierung. URL: https://www.trumpf.com/de_DE/loesungen/anwendungen/oberflaechenbearbeitung-mit-dem-laser/laserstrukturierung/, 18.08.2023

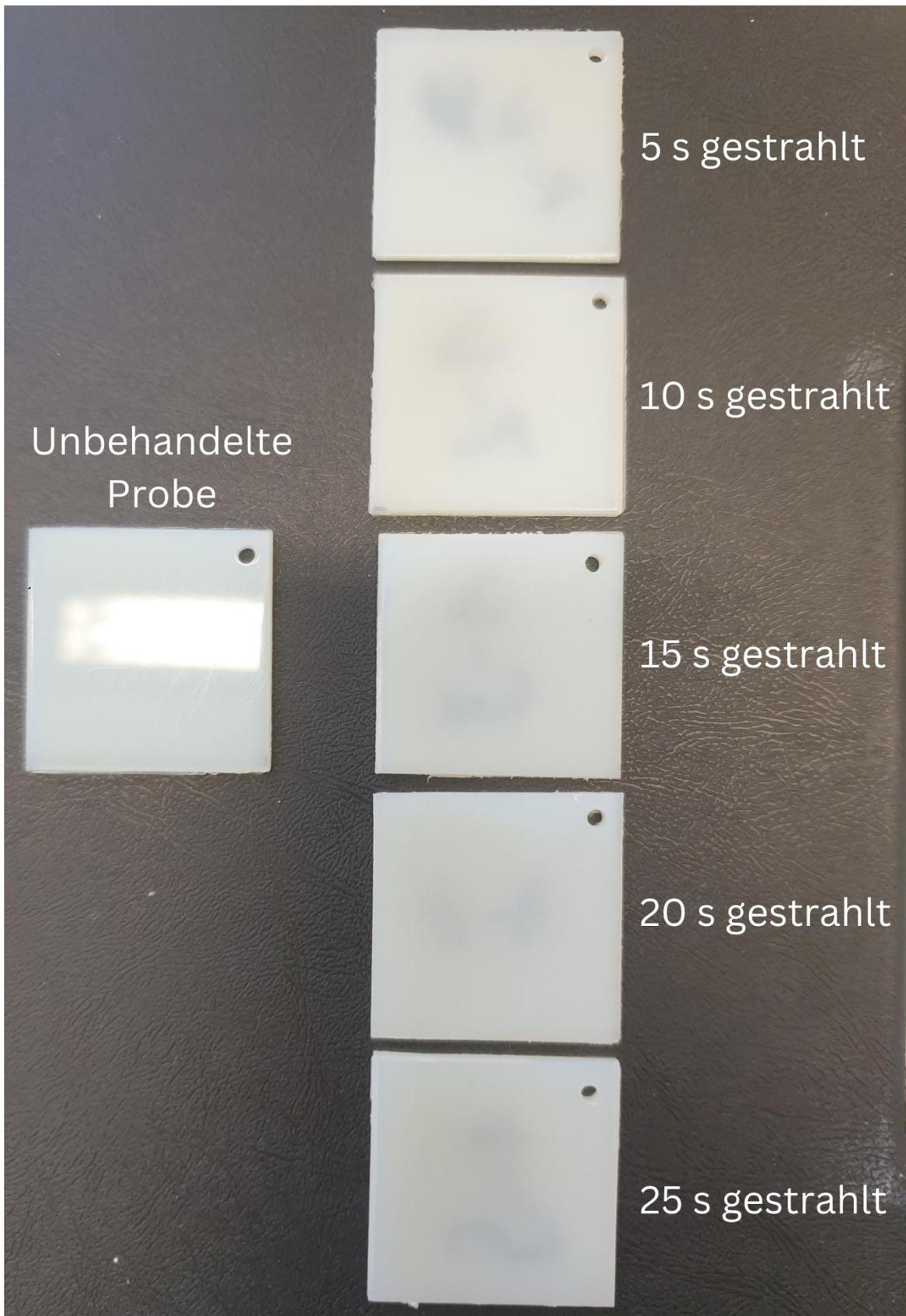
- [25] Godmaire, Xavier: Laserstrukturierung Anwendungen auf Metalloberflächen. URL: <https://www.laserax.com/de/laserstrukturierung-anwendungen-auf-metalloberflaechen>, 19.08.2023
- [26] Prautzsch, Volker: Oberflächenvorbehandlung. URL: <https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/bauko/friedrich-siemens-laboratorium/kleblabor/oberflaechenvorbehandlung>, 22.08.2023
- [27] Weyershausen, Bernd: Beizinhibitoren. URL: <https://www.kebo.de/produkte/beiz-inhibitoren>, 22.08.2023
- [28] Sattler, Frank: Galvanisieren. URL: <https://www.techpilot.de/lexikon/galvanisieren/>, 25.08.2023
- [29] Scherer, Serge ; Christmann, Carsten ; Contreras, Oliver Carrera: Grundlagen des Klebens und Klebstoff-Eigenschaften. URL: <https://www.cmc.de/blog/know-how-5/post/grundlagen-des-klebens-und-klebstoff-eigenschaften-220>, 02.09.2023
- [30] Zimmer, Felix Michael: Adhäsion und Wechselwirkungsmechanismen bei strukturellen Klebungen von (kohlenstofffaserverstärkten) Kunststoffen. – 2020. – 168 S. München, Universität der Bundeswehr, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Dissertation, 2020
- [31] Michaeli, Walter: Urformen und Funktionalisieren in einem Schritt. In: Kunststoffe: Werkstoffe – Verarbeitung – Anwendung., 10/2010, S. 217-222.
- [32] Kanani, Nasser: Galvanotechnik: Grundlagen, Verfahren und Praxis einer Schlüsseltechnologie. – 3. Auflage. - München: Hanser Verlag, 2020
- [33] Suchentrunk, Richard : Kunststoff-Metallisierung. – 1. Auflage. -Bad Saulgau: Leuze Verlag, 1991
- [34] Patent EP 2 476 723 A1, 18.07.2012. LPKF Laser & Electronics AG 30827 Garbsen (DE). Priorität: 14.01.2011 DE 102011000138: 20.12.2011

Anlagenverzeichnis

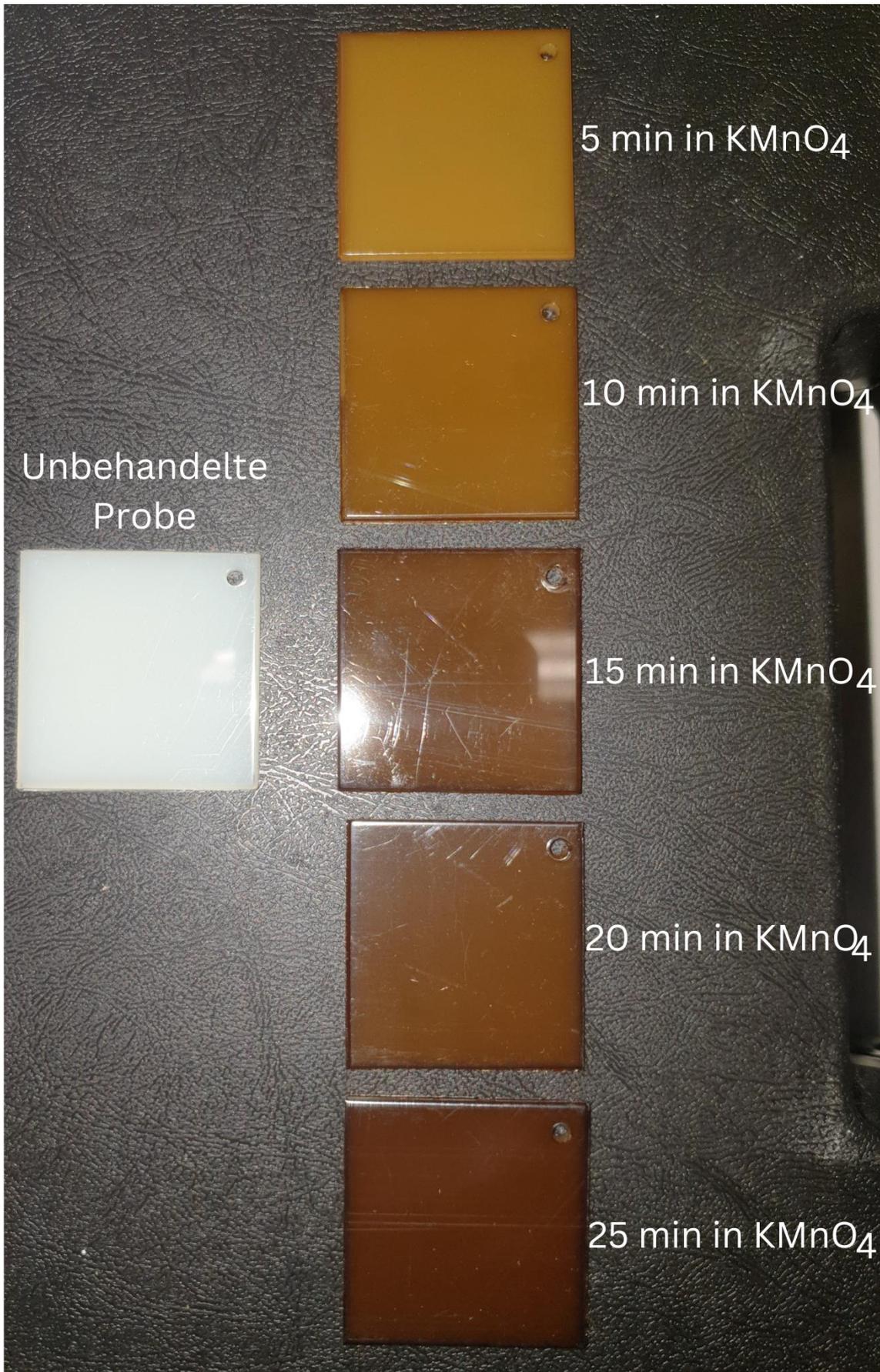
Anlage 1. Proben nach den verschiedenen Vorbehandlungsverfahren	71
Anlage 2. Benetzungswinkel aller Proben	77
Anlage 3. Unterschiedlich vorbehandelte Oberflächen des PA 6 unter dem Lichtmikroskop.....	78
Anlage 4. Unterschiedlich vorbehandelte Oberflächen des PA 12 unter dem Lichtmikroskop.....	88
Anlage 5. Auszug aus dem Datenblatt des Nickel-Phosphor-Elektrolyten	97
Anlage 6. Metallisierte PA 6-Proben.....	100
Anlage 7. Vollständiger Versuchsplan.....	103
Anlage 8. Vollständiger decodierter Versuchsplan	105
Anlage 9. Zeichnung Klebevorrichtung.....	107
Anlage 10. Auszug aus der Produkt-Information des Scotch-Weld® 7236 B/A	108
Anlage 11. Zeichnung Spannvorrichtung.....	109
Anlage 12. Modell der gemessenen Kräfte.....	110
Anlage 13. Kraft-Weg-Diagramme der Stirnabzüge.....	112
Anlage 14. Interpretationen der Kraft-Weg-Diagramme.....	123
Anlage 15. Gegenüberstellung der Maximalkräfte in Balkendiagrammen.....	125

Anlage 1. Proben nach den verschiedenen Vorbehandlungsverfahren

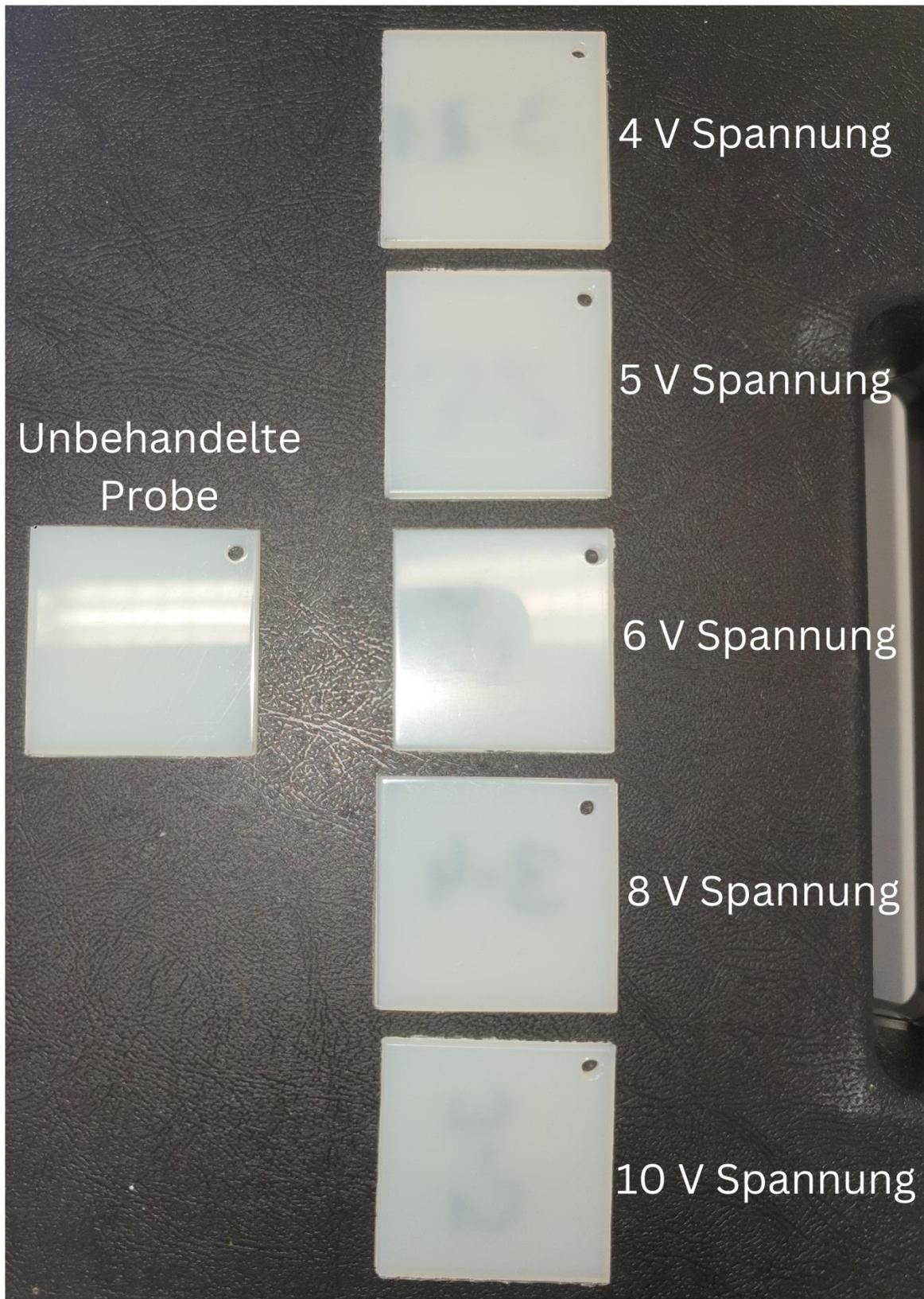
- PA 6: Gestrahlte Proben



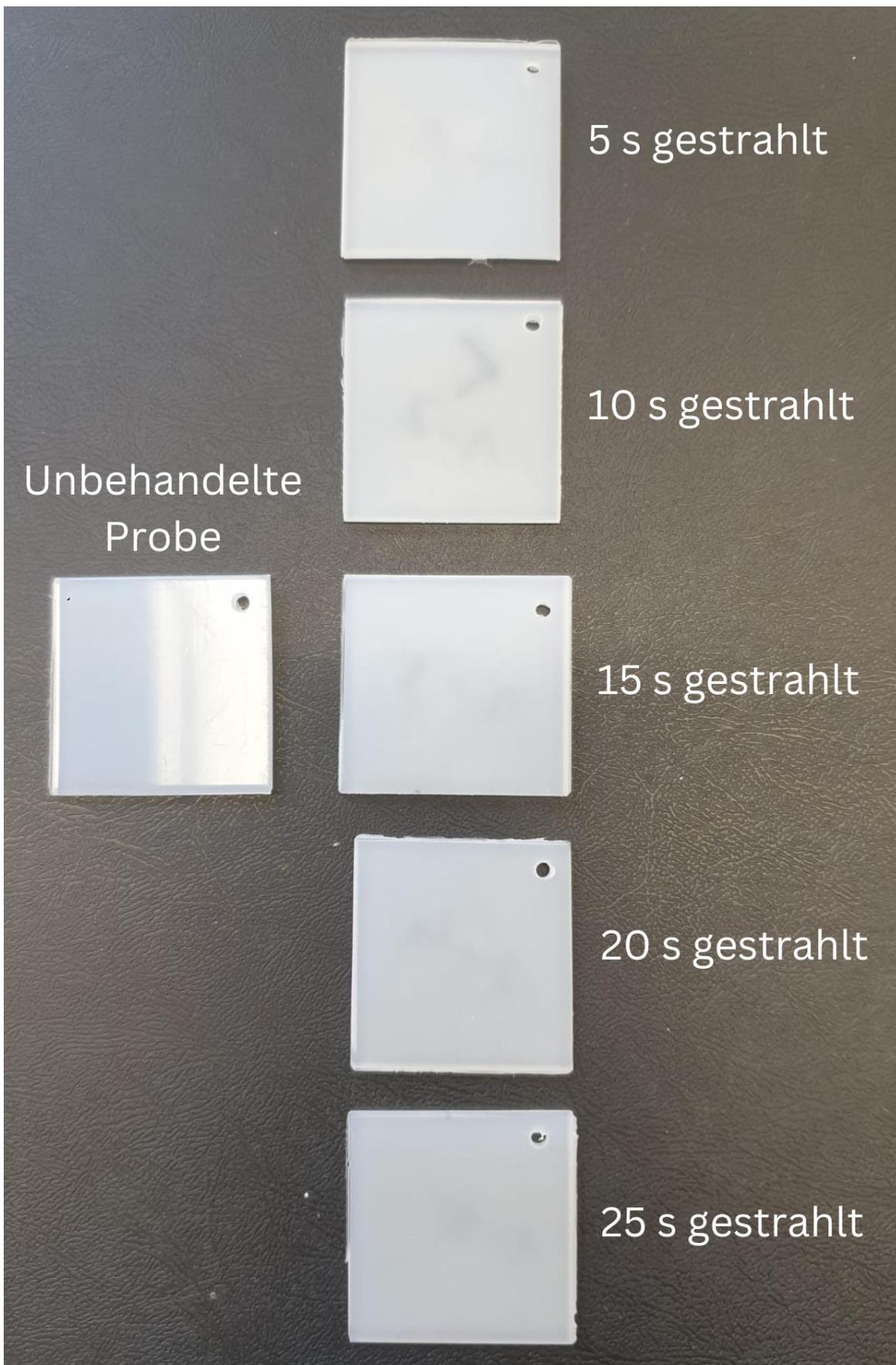
- PA 6: Proben mit Kaliumpermanganat vorbehandelt



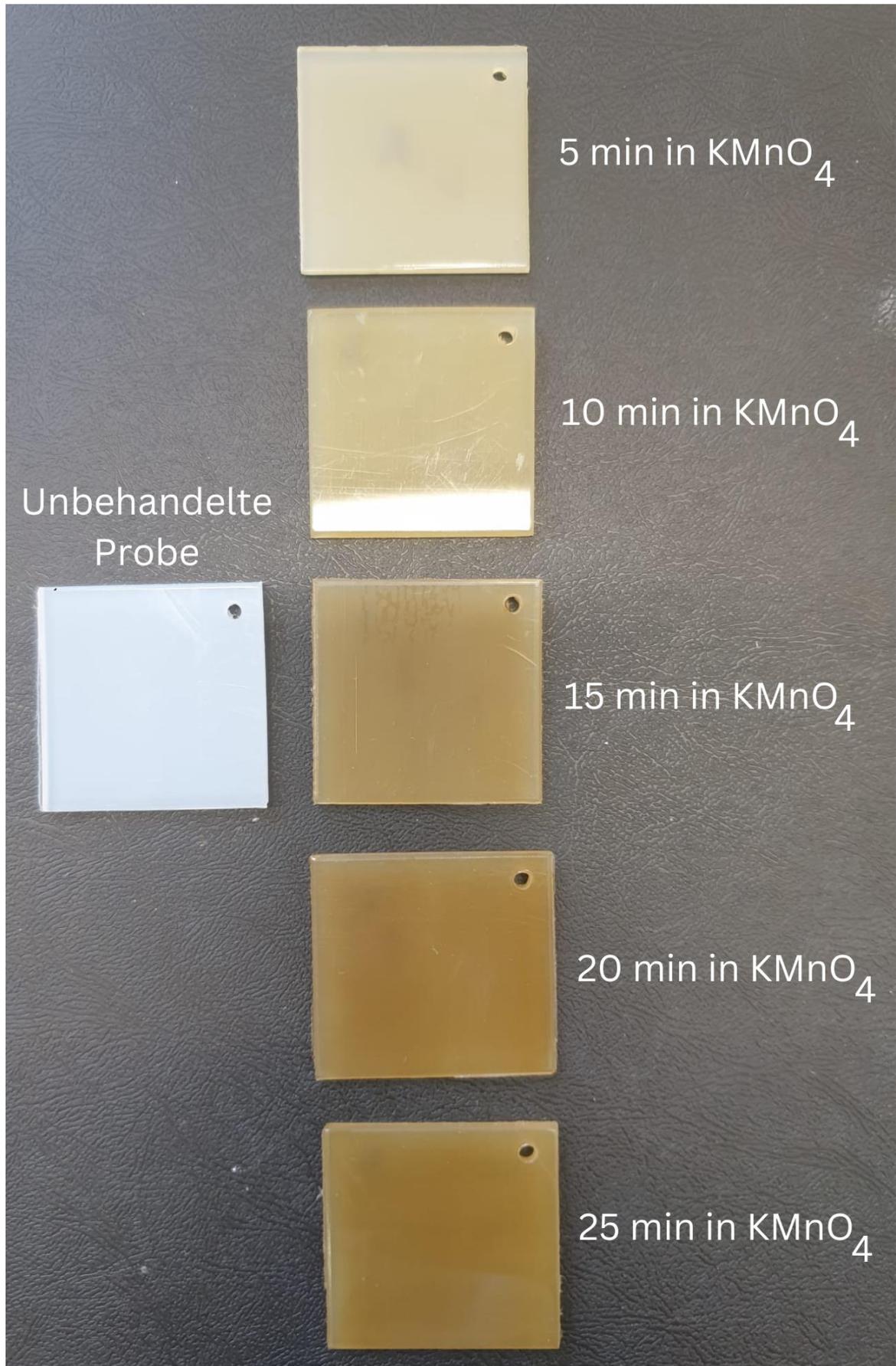
- PA 6: Proben nach der Plasmabehandlung



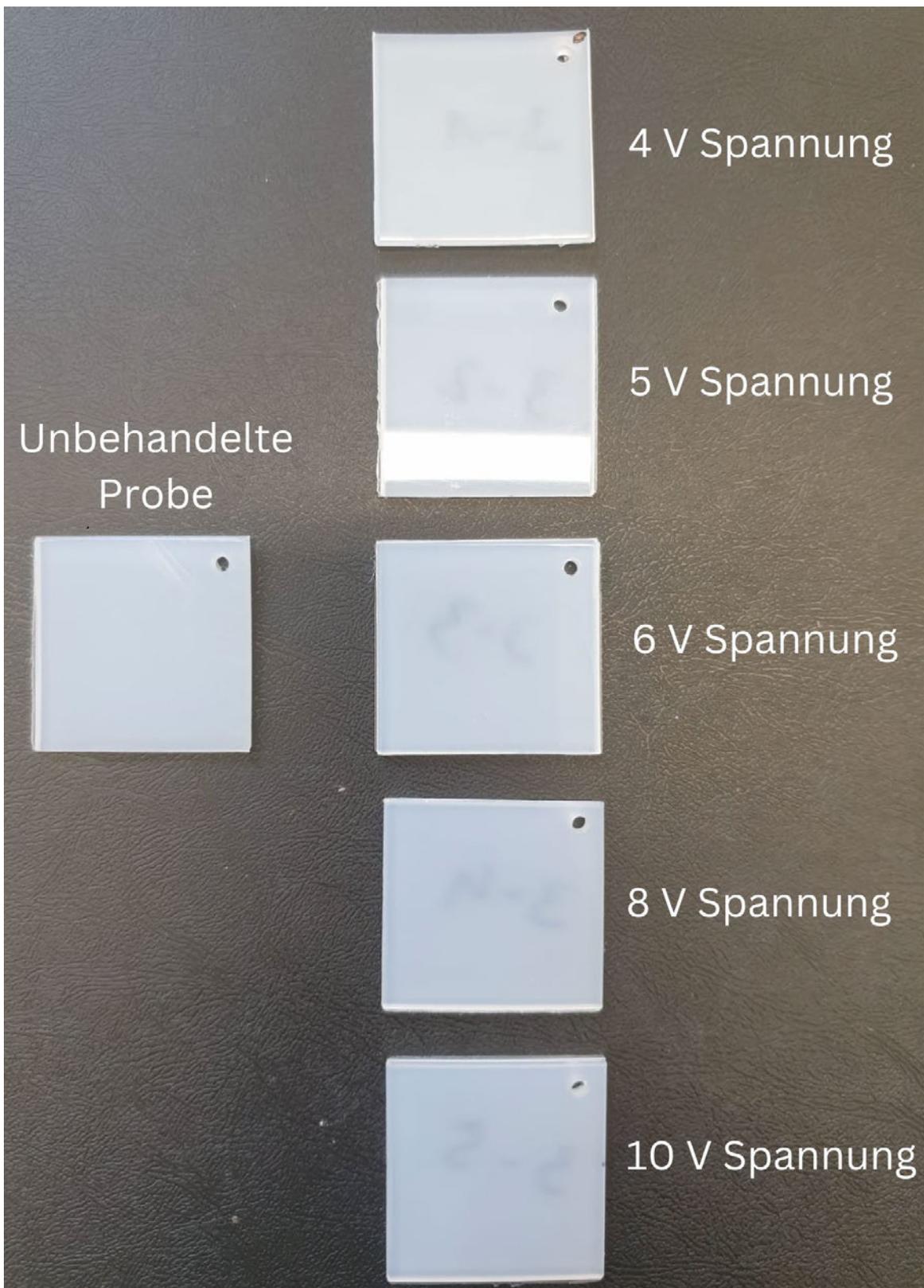
- PA 12: Gestrahlte Proben



- PA 12: Proben mit Kaliumpermanganat vorbehandelt



- PA 12: Proben nach der Plasmabehandlung



Anlage 2. Benetzungswinkel aller Proben

PA6	Vorbehandlungsverfahren																	
	Unbehandelt			Strahlen			KMnO4			Plasma			Essigsäure			Oxalsäure		
	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz
1	79,59°	0,015	0,1217	67,19°	0,7110	7,7190	48,29°	0,0220	0,1583	0,1077	0,1640	64,10°	0,0277	0,1640	0,2047	65,91°	0,0277	0,2047
2	Ameisensäure			59,79°	1,2270	9,7164	42,27°	0,0267	0,1890	0,2850	0,1947	59,97°	0,0290	0,1947	0,2510	59,00°	0,0280	0,2510
3	Benetzungs- winkel			67,09°	1,1633	9,5403	38,83°	0,0287	0,1937	0,2000	0,1783	59,06°	0,0287	0,1783	0,2150	59,06°	0,0277	0,2150
4	Benetzungs- winkel			74,43°	1,1770	8,4637	35,66°	0,0257	0,1930	0,1080	0,2017	56,18°	0,0287	0,2017	0,0613	56,18°	0,0113	0,0613
5	69,89°	1,3817	8,3997	73,12°	1,1766	8,6834	34,30°	0,0247	0,1670	0,2187	0,2033	58,33°	0,0290	0,2033	0,1710	58,33°	0,0237	0,1710

PA12	Vorbehandlungsverfahren																	
	Unbehandelt			Strahlen			KMnO4			Plasma			Essigsäure			Oxalsäure		
	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz
1	75,28°	0,0163	0,1497	75,28°	1,3300	9,4793	50,47°	0,0147	0,1180	0,2477	0,3003	72,02°	0,0207	0,3003	0,3443	72,02°	0,0237	0,3443
2	Ameisensäure			68,81°	1,4010	9,3813	45,02°	0,0137	0,1010	0,0737	0,0767	63,09°	0,0113	0,0767	0,0663	63,09°	0,01	0,0663
3	82,88°	0,0163	0,1497	82,73°	1,6960	11,8593	65,48°	0,0197	0,2883	0,1513	0,0727	61,12°	0,0113	0,0727	0,4137	61,12°	0,0263	0,4137
4	Benetzungs- winkel			87,86°	1,6467	10,3697	52,11°	0,0120	0,0857	0,0793	0,0753	65,16°	0,0103	0,0753	0,01	65,16°	0,01	0,0583
5	88,34°	1,3817	8,3997	96,24°	1,6887	10,6937	57,75°	0,0097	0,0707	0,0867	0,0557	67,52°	0,0077	0,0557	0,0077	67,52°	0,0077	0,0553

Wiederholung der Benetzungswinkel

PA6	Vorbehandlungsverfahren																	
	Unbehandelt			Strahlen			KMnO4			Plasma			Essigsäure			Oxalsäure		
	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz
1	73,53°	0,015	0,1217	73,58°	0,7110	7,7190	51,55°	0,0220	0,1583	0,1077	0,1640	73,74°	0,0277	0,1640	0,2047	67,12°	0,0277	0,2047
2	Ameisensäure			64,97°	1,2270	9,7164	44,39°	0,0267	0,1890	0,2850	0,1947	64,03°	0,0290	0,1947	0,2510	64,03°	0,0280	0,2510
3	Benetzungs- winkel			70,51°	1,1633	9,5403	40,07°	0,0287	0,1937	0,2000	0,1783	64,76°	0,0287	0,1783	0,2150	64,76°	0,0277	0,2150
4	Benetzungs- winkel			75,42°	1,1770	8,4637	38,39°	0,0257	0,1930	0,1080	0,2017	65,20°	0,0287	0,2017	0,0613	65,20°	0,0113	0,0613
5	88,34°	1,3817	8,3997	73,80°	1,1766	8,6834	37,87°	0,0247	0,1670	0,2187	0,2033	65,81°	0,0290	0,2033	0,1710	65,81°	0,0237	0,1710

PA12	Vorbehandlungsverfahren																	
	Unbehandelt			Strahlen			KMnO4			Plasma			Essigsäure			Oxalsäure		
	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz	Benetzungs- winkel	Rauheit in µm Ra	Rz
1	76,64°	0,0163	0,1497	76,64°	1,3300	9,4793	47,29°	0,0147	0,1180	0,2477	0,3003	77,44°	0,0207	0,3003	0,3443	77,44°	0,0237	0,3443
2	Ameisensäure			72,84°	1,4010	9,3813	50,63°	0,0137	0,1010	0,0737	0,0767	72,21°	0,0113	0,0767	0,01	72,21°	0,01	0,0663
3	84,43°	0,0163	0,1497	84,12°	1,6960	11,8593	68,29°	0,0197	0,2883	0,1513	0,0727	69,80°	0,0113	0,0727	0,4137	69,80°	0,0263	0,4137
4	Benetzungs- winkel			88,37°	1,6467	10,3697	58,34°	0,0120	0,0857	0,0793	0,0753	74,69°	0,0103	0,0753	0,01	74,69°	0,01	0,0583
5	89,8°	1,3817	8,3997	91,8°	1,6887	10,6937	64,52°	0,0097	0,0707	0,0867	0,0557	74,14°	0,0077	0,0557	0,0077	74,14°	0,0077	0,0553

Anlage 3. Unterschiedlich vorbehandelte Oberflächen des PA 6 unter dem Lichtmikroskop

- Unbehandelt



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- Unbehandelt – zerkratzt

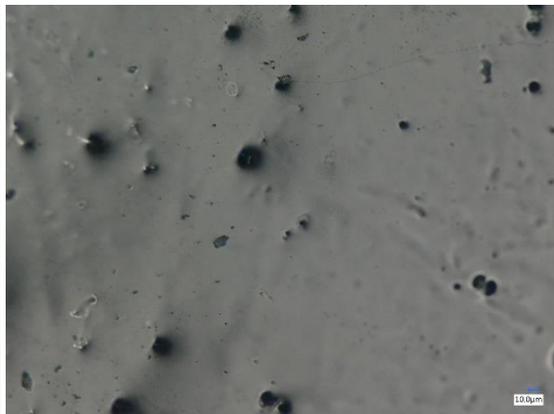


100-fache Vergrößerung

- Mit Ameisensäure behandelt



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 5s gestrahlt



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 10s gestrahlt

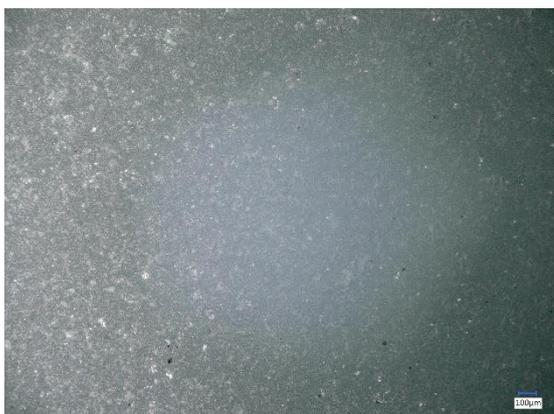


100-fache Vergrößerung

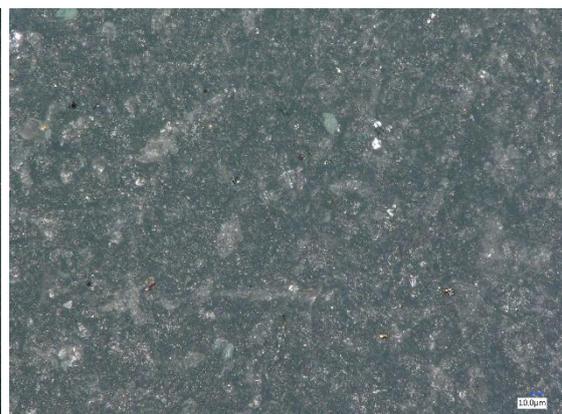


500-fache Vergrößerung

- 15s gestrahlt



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 20s gestrahlt



100-fache Vergrößerung

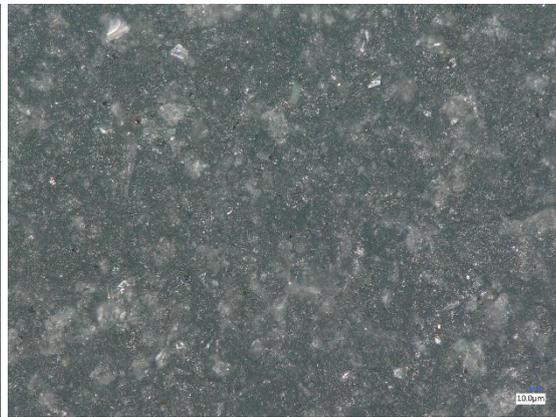


500-fache Vergrößerung

- 25s gestrahlt



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 5 min in Kaliumpermanganat



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 10 min in Kaliumpermanganat



100-fache Vergrößerung

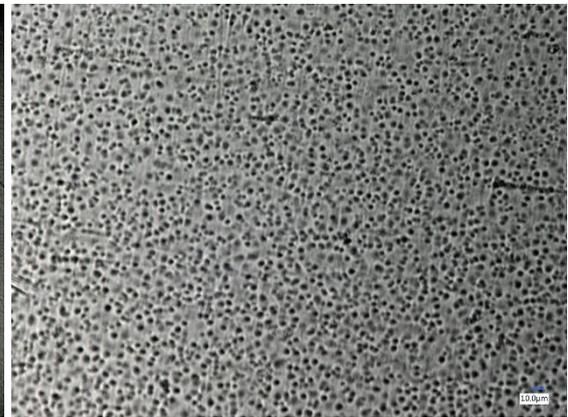


500-fache Vergrößerung

- 15 min in Kaliumpermanganat



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 20 min in Kaliumpermanganat



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 25 min in Kaliumpermanganat



100-fache Vergrößerung

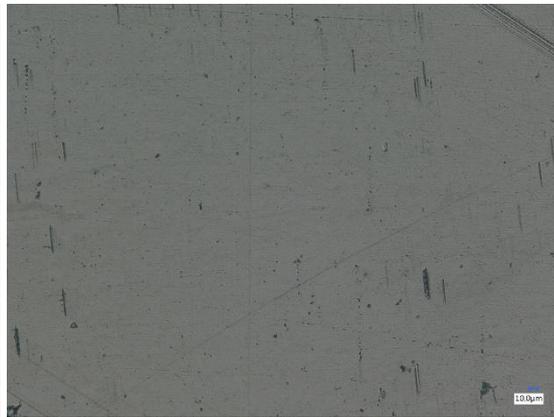


500-fache Vergrößerung

- Plasmabehandlung mit 4 V



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- Plasmabehandlung mit 5 V



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- Plasmabehandlung mit 6 V



100-fache Vergrößerung

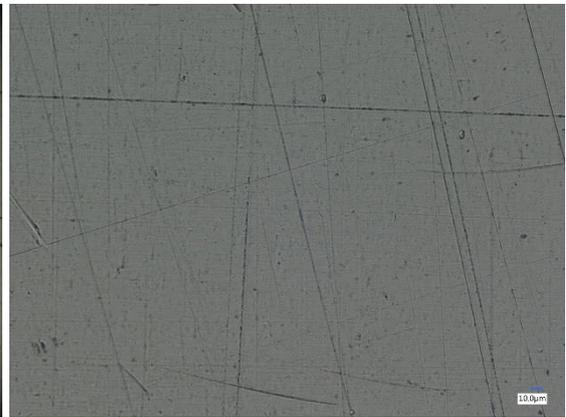


500-fache Vergrößerung

- Plasmabehandlung mit 8 V



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- Plasmabehandlung mit 10 V

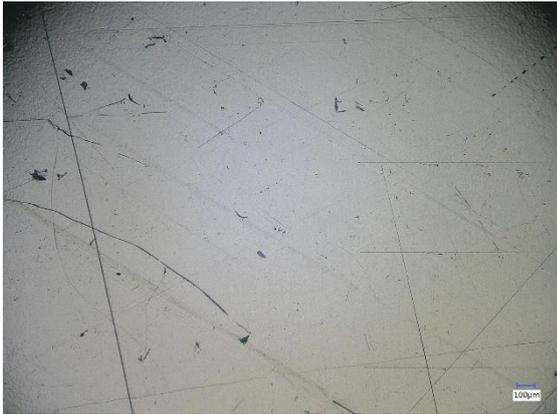


100-fache Vergrößerung

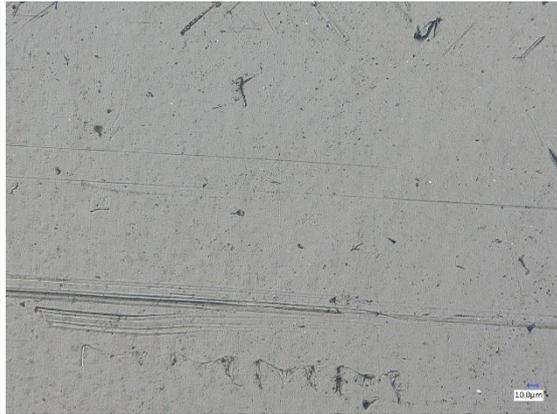


500-fache Vergrößerung

- 5 min in Essigsäure



100-fache Vergrößerung

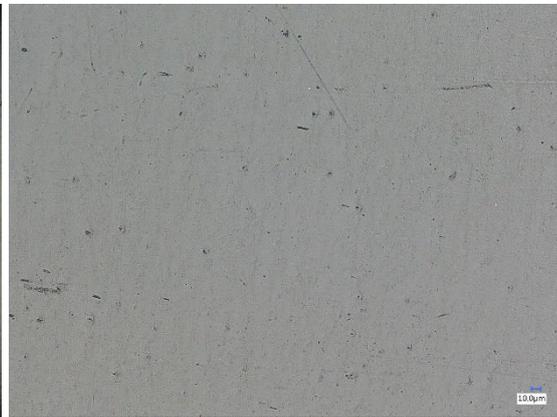


500-fache Vergrößerung

- 10 min in Essigsäure



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 15 min in Essigsäure

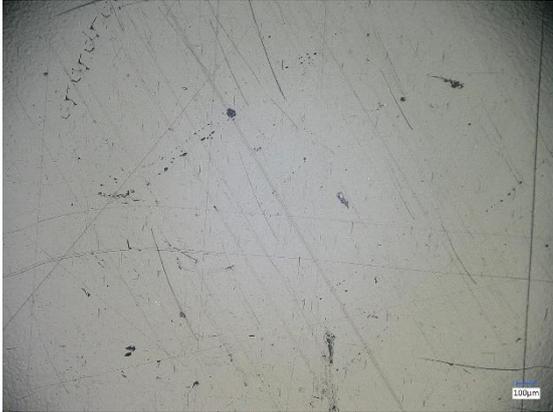


100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 20 min in Essigsäure



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 25 min in Kaliumpermanganat



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 5 min in Oxalsäure



100-fache Vergrößerung

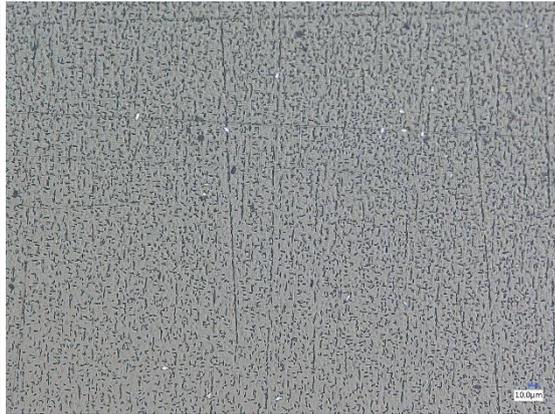


500-fache Vergrößerung

- 10 min in Oxalsäure



100-fache Vergrößerung

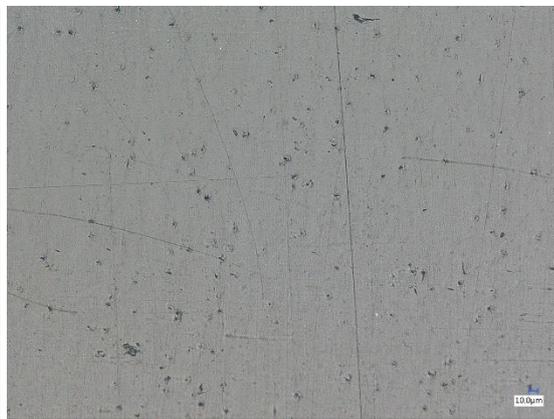


500-fache Vergrößerung

- 15 min in Oxalsäure



100-fache Vergrößerung

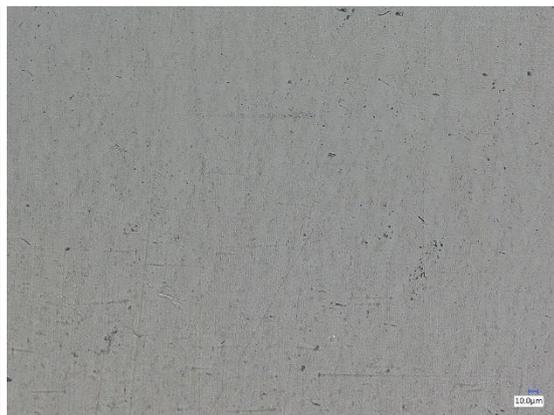


500-fache Vergrößerung

- 20 min in Oxalsäure



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 25 min in Oxalsäure



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

Anlage 4. Unterschiedlich vorbehandelte Oberflächen des PA 12 unter dem Lichtmikroskop

- Unbehandelt



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 5s gestrahlt



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 10s gestrahlt



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 15s gestrahlt



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 20s gestrahlt



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 25s gestrahlt



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 5 min in Kaliumpermanganat



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 10 min in Kaliumpermanganat



100-fache Vergrößerung

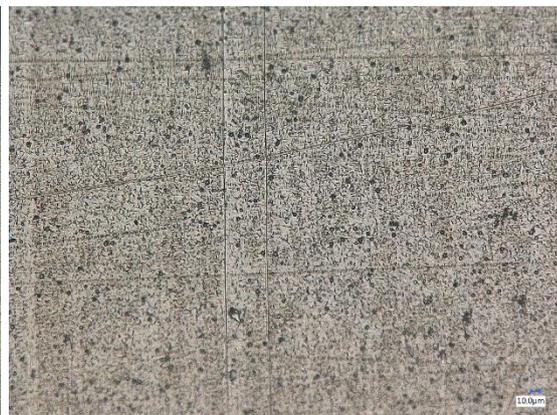


500-fache Vergrößerung

- 15 min in Kaliumpermanganat



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 20 min in Kaliumpermanganat

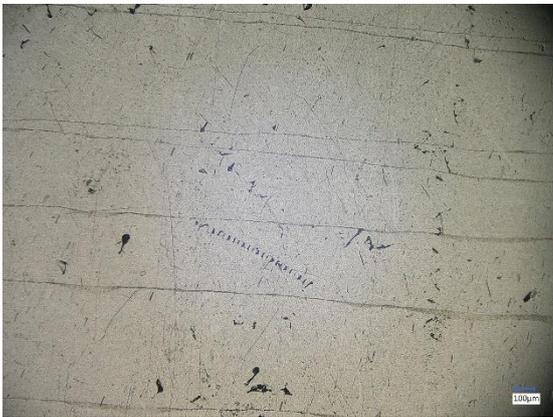


100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 25 min in Kaliumpermanganat



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- Plasmabehandlung mit 4 V



100-fache Vergrößerung

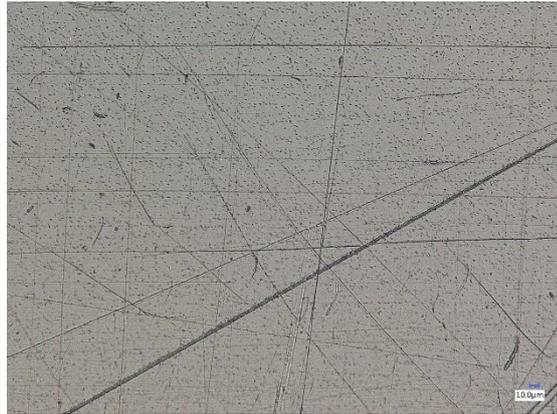


500-fache Vergrößerung

- Plasmabehandlung mit 5 V



100-fache Vergrößerung

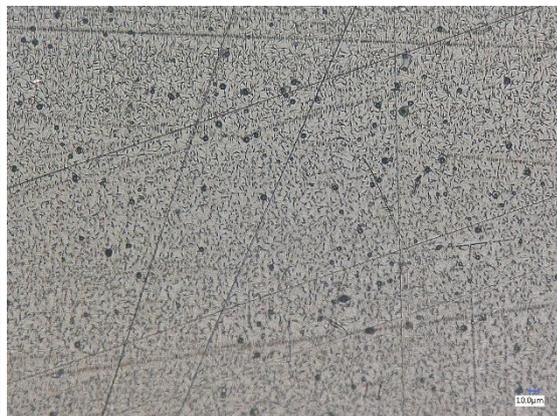


500-fache Vergrößerung

- Plasmabehandlung mit 6 V



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- Plasmabehandlung mit 8 V



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- Plasmabehandlung mit 10 V



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 5 min in Essigsäure



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 10 min in Essigsäure



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 15 min in Essigsäure



100-fache Vergrößerung

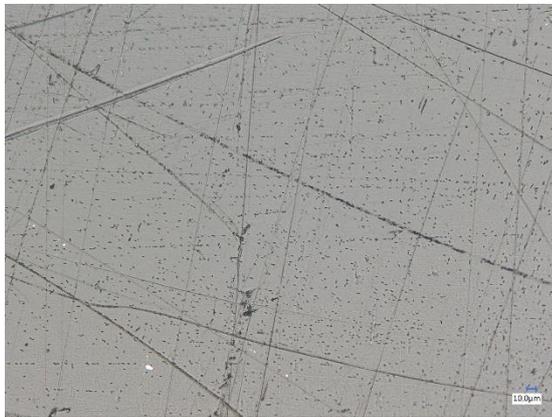


500-fache Vergrößerung

- 20 min in Essigsäure



100-fache Vergrößerung

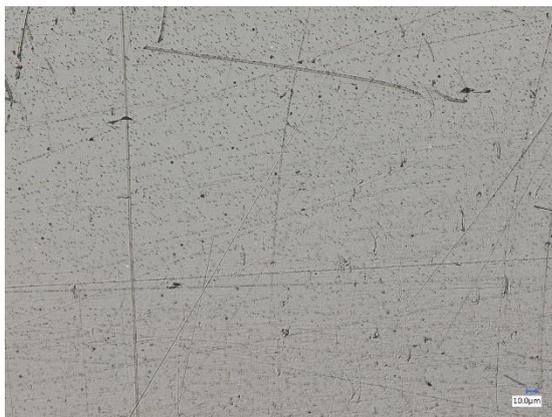


500-fache Vergrößerung

- 25 min in Essigsäure



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 5 min in Oxalsäure



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 10 min in Oxalsäure



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 15 min in Oxalsäure



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 20 min in Oxalsäure



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

- 25 min in Oxalsäure



100-fache Vergrößerung



500-fache Vergrößerung

DURNI-COAT[®] 520-12-50

Aussenstromlos abscheidendes NiP-Verfahren für Verschleiss- und Korrosionsbeanspruchungen

DNC 520-12-50 ist ein Verfahren zur aussenstromlosen Abscheidung von glänzenden Nickel-Phosphor-Legierungen, insbesondere für die Beschichtung in der Leiterplattentechnik. Das Verfahren scheidet Schichten mit einem Phosphorgehalt von 7 – 9 % ab.

Mechanische Schichteigenschaften

Härte: im Abscheidezustand 530 HV 0,02 ± 50
Durch eine Wärmebehandlung (1 h, 400 °C) kann die
Härte auf 1000 HV 0,02 ± 50 gesteigert werden

Die Überzüge besitzen eine mittlere Duktilität, eine gute Korrosions- und Verschleissbeständigkeit.

Alle hier aufgeführten technischen Werte gelten unter den dort genannten Testbedingungen. Wir weisen deshalb ausdrücklich darauf hin, dass auf Grund der unterschiedlichen Einsatzbedingungen nur ein Praxistest beim Anwender Aufschluss über die Leistungsfähigkeit der Schicht bzw. des Schichtsystems geben kann.

DNC 520-12-50 eignet sich für die Beschichtung metallischen Werkstoffe. Nach dem **DNC 520-12-50**-Verfahren kann sowohl Gestell- als auch Trommelware behandelt werden. Die Abscheidungsgeschwindigkeit liegt bei einem neu angesetzten Bad bei 18 – 20 µm/h.

DNC 520-12-50 wird in 4 flüssigen Konzentraten geliefert:

DNC 520-12-50 Badansatzlösung
DNC 520-12-50 Regenerierlösung 1
DNC 520-12-50 Regenerierlösung 2
Stabilisator 10

Zum Neuansatz wird benötigt: **DNC 520-12-50 Badansatzlösung**
DNC 520-12-50 Regenerierlösung 1
Stabilisator 10

für den Badbetrieb: **DNC 520-12-50 Regenerierlösung 1 & 2**
und verdünnte Ammoniaklösung bzw. Natriumcarbonatlösung

Badbehälter und Ausrüstung

DNC 520-12-50 kann in bestehenden Anlagen zur chemischen Vernickelung eingesetzt werden, wobei wärmebeständige Kunststoffe (95 °C) oder anodisch geschützte Edelstahlwannen als Behältermaterial eingesetzt werden müssen.

Die Beheizung soll mit PTFE-bzw. Edelstahldampfschlangen oder elektrischen Tauchbadwärmern (Mantel: Edelstahl anodisch geschützt, Glas oder PTFE) erfolgen.

Eine Absaugvorrichtung ist zur Entfernung von Sprühnebeln oder Dämpfen notwendig. Während Betriebsstillstandzeiten sollte das Bad mit einem Deckel verschlossen werden, um bei oder nahe der Arbeitstemperatur Verdunstungsverluste zu vermeiden und das Einschleppen von Schmutzpartikeln aus der Umgebung zu verhindern.

Filtration und Badbewegung

Eine kontinuierliche Filtration der **DNC 520-12-50** - Elektrolyte während des Arbeitens ist hilfreich zur Abscheidung optimaler Niederschläge. Die Teile der Filteranlage, die mit dem **DNC 520-12-50** - Elektrolyt in Berührung kommen, sollten aus wärme- und chemikalienbeständigem Material gefertigt sein. Die Filteranlage sollte aus einer Tauchkreiselpumpe mit nachgeschalteten Filtergehäusen bestehen, wobei die Tauchkreiselpumpe zur Badbewegung eingesetzt wird. Um bei kontinuierlicher Arbeitsweise eine optimale Durchmischung des Elektrolyten und der zufließenden Regenerierlösungen zu gewährleisten, ist mindestens eine Badumwälzung vom 10 – 14 fachen Badvolumen/h empfohlen. Als Filter sind 3 µm Filter (Kerzen oder Beutel) aus Polypropylen bei kontinuierlicher Arbeitsweise, 1 µm bei diskontinuierlicher Arbeitsweise zu verwenden.

Arbeitsbedingungen

Badansatz:

deionisiertes Wasser	67 Vol.-% (Leitwert < 5 µS/cm)
DNC 520-12-50 Badansatzlösung	18 Vol.-%
DNC 520-12-50 Regenerierlösung 1	4,2 Vol.-%
Stabilisator 10	10 Vol.-%

Der pH-Wert wird nach dem Badansatz bei Raumtemperatur mittels konz. Ammoniaklösung chem. rein oder bei ammoniumfreien Betrieb mit Natriumcarbonatlösung, chem. rein eingestellt.

Regenerierung:	DNC 520-12-50 Regenerierlösung 1	120 g/L Nickel
	DNC 520-12-50 Regenerierlösung 2	604 g/L Natriumhypophosphit
	15 % Ammoniak oder Natriumcarbonatlösung	600 mL/L 25 % Ammoniak 75 g/L Natriumcarbonat
Dosierverhältnis:	1 : 1 : 0,50 Reg. 1 : Reg. 2 : Ammoniak 1 : 1 : 2,4 Reg. 1 : Reg. 2 : Natriumcarbonatlösung	
Arbeitstemperatur:	86 – 90 °C	

pH-Wert:	4,9 – 5,1 (gemessen bei 20 °C, elektrometrisch)
Nickelgehalt:	5,0 ± 0,5 g/L
Reduktionsmittel:	40 ± 4 g/L Um eine Überstabilisierung zu vermeiden, wird wie folgt regeneriert: Bei einem Reduktionsmittelgehalt < 37 g/L, bis 37 g/L grundsätzlich mit DNC 520-12-50 Regenerierlösung 2 stabifrei . Von 37 g/L bis 40 g/L in der gewohnten Weise mit DNC 520-12-50 Regenerierlösung 2 .
Literbelastung:	0,2 – 2,0 dm ² /L
Abscheidegeschwindigkeit:	15 – 20 µm/h (abhängig von pH-Wert, Temperatur)
Bewegung:	Teilebewegung nützlich, jedoch nicht unbedingt erforderlich

Badansatz

Vor Neuansatz bzw. Erstansatz eines **DNC 520-12-50** - Bades sind alle Anlagenteile, die mit **DNC 520-12-50** - Elektrolytlösung in Berührung kommen, mit konzentrierter Salpetersäure zu behandeln. Nach gründlicher Spülung vorgenannter Aggregate mit Wasser und deionisiertem Wasser ist die am Filter austretende Wasserqualität zu überprüfen. Sie sollte einen Leitwert von 5 µS/cm nicht übersteigen.

Das zum Badansatz benötigte Volumen an deionisiertem Wasser (Leitwert < 5 µS/cm) wird vorgelegt. Nach Einschalten des Filterkreislaufes gibt man die **DNC 520-12-50** - Badansatzchemikalien hinzu. Nach Aufheizen auf Arbeitstemperatur wird der pH-Wert nochmals kontrolliert.

Arbeitshinweise

Die stromlos zu vernickelnden Teile werden nach sorgfältiger Vorbehandlung einfach in die **DNC 520-12-50** - Lösung solange eingetaucht, bis die gewünschte Schichtdicke erreicht ist.

Wird im **DNC 520-12-50** nicht gearbeitet, so ist es sinnvoll, das **DNC 520-12-50** abzukühlen (t < 40 °C), um eine maximale Lebensdauer (6 – 7 Metall-turnover) und Stabilität der Lösung zu erreichen.

Basismaterialien

DNC 520-12-50 kann verwendet werden für alle Eisenlegierungen (Stähle, rostfreie Stähle etc.), Nickel-Eisen-Legierungen, Kupferlegierungen, Nickel-Kupfer-Legierungen, und Beryllium. Das Verfahren eignet sich vorzüglich für die Beschichtung von Aluminium-Legierungen, da eine hohe Zinkverträglichkeit (< 300 mg/L Zn) gegeben ist.

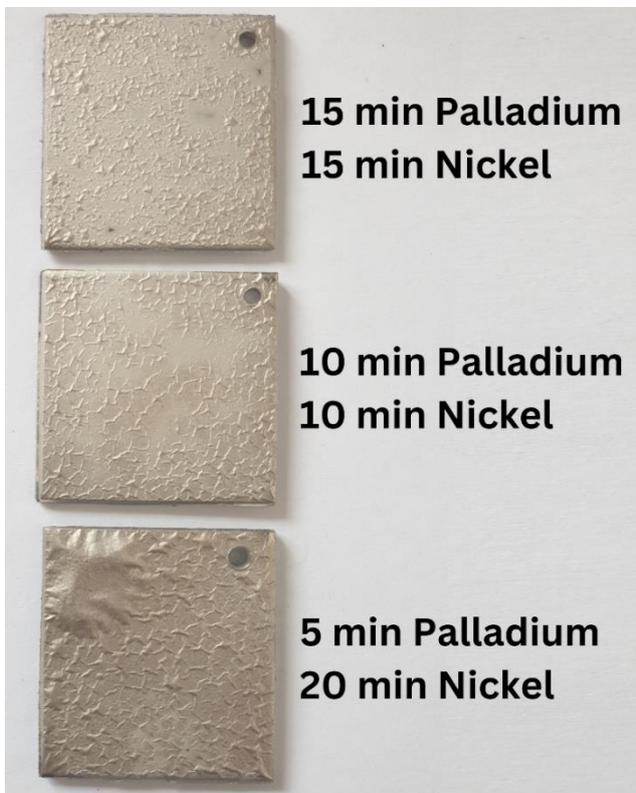
RIAG-Oberflächentechnik stellt gerne die für den Anwendungsfall notwendige Vorbehandlungsvorschrift zur Verfügung.

Arbeitstemperatur

Die normale Arbeitstemperatur liegt zwischen 86 und 90 °C, Optimum für Start: 88 °C. Geringere Temperaturen senken die Abscheidungsrate. Eine Bewegung der **DNC 520-12-50**-Lösung während des Aufheizens und Abkühlens ist notwendig, um lokale Überhitzungen zu vermeiden.

Anlage 6. Metallisierte PA 6-Proben

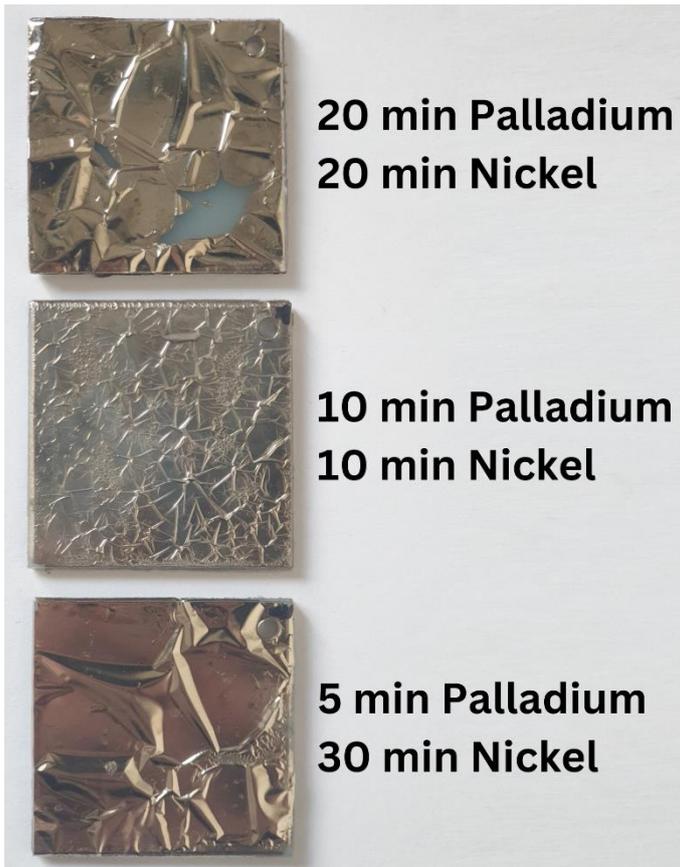
- Vorbehandlung mittels Strahlen



- Vorbehandlung mittel Kaliumpermanganat



- Vorbehandlung mittel Atmosphärendruckplasma



- Vorbehandlung mittels Essigsäure



- Vorbehandlung mittels Oxalsäure



Anlage 7. Vollständiger Versuchsplan

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	StdRf>>	DlaufR>>	Punkttyp	Blöcke	A	B
1	27	1	1	1	2	2
2	9	2	1	1	2	4
3	10	3	1	1	2	5
4	13	4	1	1	1	3
5	26	5	1	1	2	1
6	3	6	1	1	1	3
7	56	7	1	1	2	1
8	17	8	1	1	2	2
9	18	9	1	1	2	3
10	16	10	1	1	2	1
11	28	11	1	1	2	3
12	41	12	1	1	1	1
13	33	13	1	1	1	3
14	15	14	1	1	1	5
15	46	15	1	1	2	1
16	22	16	1	1	1	2
17	53	17	1	1	1	3
18	11	18	1	1	1	1
19	6	19	1	1	2	1
20	31	20	1	1	1	1
21	29	21	1	1	2	4
22	51	22	1	1	1	3
23	5	23	1	1	1	5
24	52	24	1	1	1	2
25	42	25	1	1	1	2
26	35	26	1	1	1	5
27	30	27	1	1	2	5
28	24	28	1	1	1	4
29	55	29	1	1	1	5
30	14	30	1	1	1	4
31	21	31	1	1	1	1
32	7	32	1	1	2	2
33	54	33	1	1	1	4
34	38	34	1	1	2	3
35	39	35	1	1	2	4
36	32	36	1	1	1	2
37	8	37	1	1	2	3
38	20	38	1	1	2	5
39	49	39	1	1	2	4
40	12	40	1	1	1	2
41	4	41	1	1	1	4
42	43	42	1	1	1	1
43	47	43	1	1	2	2
44	60	44	1	1	2	5

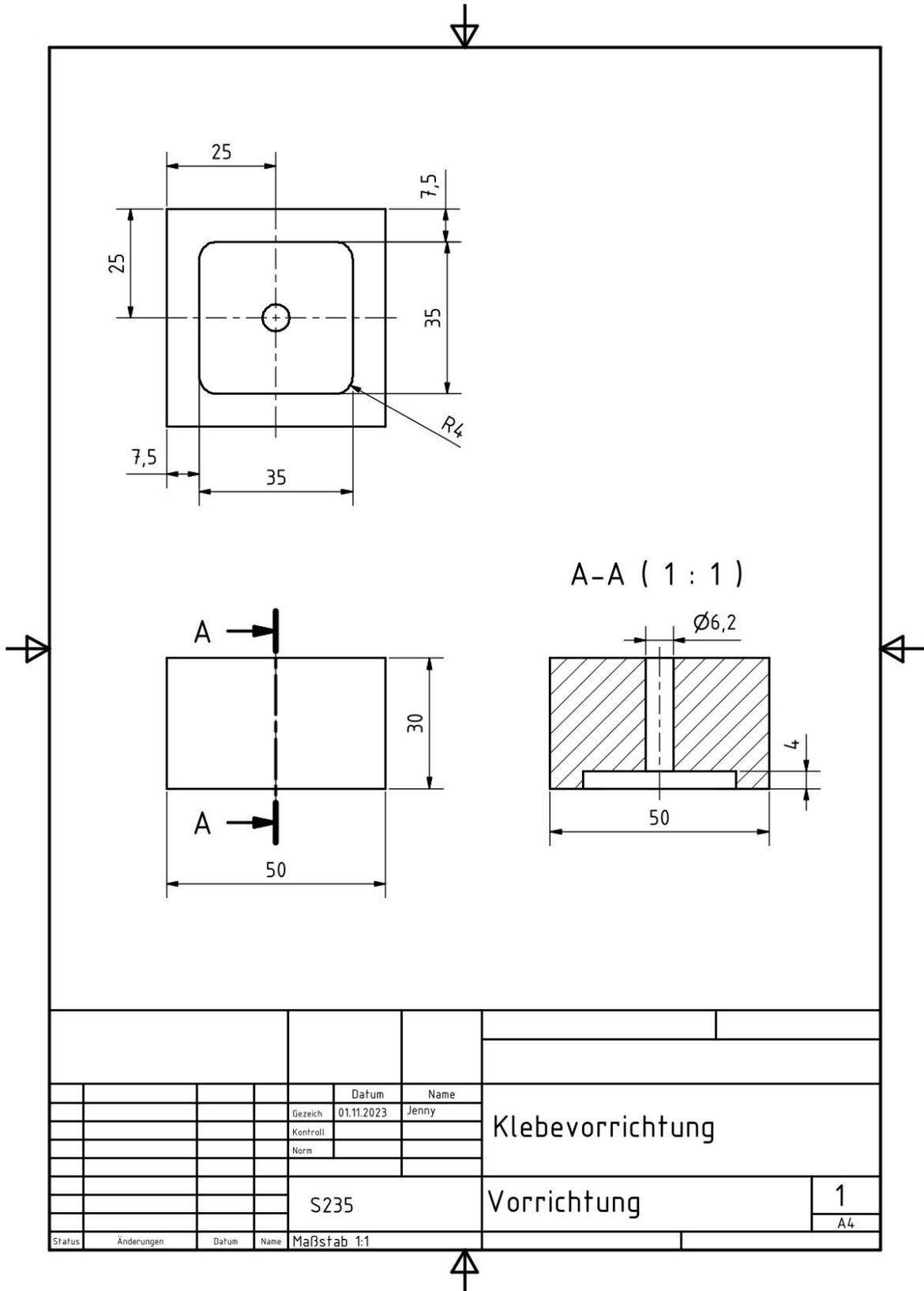
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	StdRf>>	DlaufR>>	Punkttyp	Blöcke	A	B
45	25	45	1	1	1	5
46	37	46	1	1	2	2
47	23	47	1	1	1	3
48	2	48	1	1	1	2
49	34	49	1	1	1	4
50	44	50	1	1	1	4
51	36	51	1	1	2	1
52	19	52	1	1	2	4
53	45	53	1	1	1	5
54	57	54	1	1	2	2
55	40	55	1	1	2	5
56	59	56	1	1	2	4
57	58	57	1	1	2	3
58	50	58	1	1	2	5
59	1	59	1	1	1	1
60	48	60	1	1	2	3

Anlage 8. Vollständiger decodierter Versuchsplan

DlaufRfolg	Punkttyp	Blöcke	A	B	Polymerwerkstoff	Vorbehandlungsverfahren	gemessene Kraft in N
1	1	1	2	2	PA12	KMnO4	47,6
2	1	1	2	4	PA12	Essigsäure	51,2
3	1	1	2	5	PA12	Oxalsäure	66,9
4	1	1	1	3	PA6	Plasma	264,6
5	1	1	2	1	PA12	Strahlen	109
6	1	1	1	3	PA6	Plasma	158,2
7	1	1	2	1	PA12	Strahlen	107,6
8	1	1	2	2	PA12	KMnO4	81,9
9	1	1	2	3	PA12	Plasma	229,6
10	1	1	2	1	PA12	Strahlen	113,3
11	1	1	2	3	PA12	Plasma	149,7
12	1	1	1	1	PA6	Strahlen	95,4
13	1	1	1	3	PA6	Plasma	193,9
14	1	1	1	5	PA6	Oxalsäure	112,6
15	1	1	2	1	PA12	Strahlen	137,5
16	1	1	1	2	PA6	KMnO4	101,9
17	1	1	1	3	PA6	Plasma	132,5
18	1	1	1	1	PA6	Strahlen	103,3
19	1	1	2	1	PA12	Strahlen	79,7
20	1	1	1	1	PA6	Strahlen	114
21	1	1	2	4	PA12	Essigsäure	90,4
22	1	1	1	3	PA6	Plasma	196,1
23	1	1	1	5	PA6	Oxalsäure	79,7
24	1	1	1	2	PA6	KMnO4	109
25	1	1	1	2	PA6	KMnO4	125,4
26	1	1	1	5	PA6	Oxalsäure	64
27	1	1	2	5	PA12	Oxalsäure	71,9
28	1	1	1	4	PA6	Essigsäure	90,4
29	1	1	1	5	PA6	Oxalsäure	96,9
30	1	1	1	4	PA6	Essigsäure	101,9
31	1	1	1	1	PA6	Strahlen	134,7
32	1	1	2	2	PA12	KMnO4	71,2
33	1	1	1	4	PA6	Essigsäure	116,1
34	1	1	2	3	PA12	Plasma	178,2
35	1	1	2	4	PA12	Essigsäure	71,2
36	1	1	1	2	PA6	KMnO4	100,4
37	1	1	2	3	PA12	Plasma	206,1
38	1	1	2	5	PA12	Oxalsäure	56,2
39	1	1	2	4	PA12	Essigsäure	61,2
40	1	1	1	2	PA6	KMnO4	94
41	1	1	1	4	PA6	Essigsäure	122,6
42	1	1	1	1	PA6	Strahlen	88,3
43	1	1	2	2	PA12	KMnO4	58,3
44	1	1	2	5	PA12	Oxalsäure	41,9
45	1	1	1	5	PA6	Oxalsäure	111,1
46	1	1	2	2	PA12	KMnO4	46,9
47	1	1	1	3	PA6	Plasma	188,2
48	1	1	1	2	PA6	KMnO4	123,3

DlaufRfolg	Punkttyp	Blöcke	A	B	Polymerwerkstoff	Vorbehandlungsverfahren	gemessene Kraft in N
49	1	1	1	4	PA6	Essigsäure	143,3
50	1	1	1	4	PA6	Essigsäure	106,9
51	1	1	2	1	PA12	Strahlen	104,7
52	1	1	2	4	PA12	Essigsäure	60,5
53	1	1	1	5	PA6	Oxalsäure	114,7
54	1	1	2	2	PA12	KMnO4	54,8
55	1	1	2	5	PA12	Oxalsäure	56,9
56	1	1	2	4	PA12	Essigsäure	81,9
57	1	1	2	3	PA12	Plasma	157,5
58	1	1	2	5	PA12	Oxalsäure	56,2
59	1	1	1	1	PA6	Strahlen	109
60	1	1	2	3	PA12	Plasma	254,6

Anlage 9. Zeichnung Klebevorrichtung





Scotch-Weld® 7236 B/A

Zweikomponenten-Konstruktionsklebstoff

Produkt-Information	06/2002
---------------------	---------

Beschreibung

Scotch-Weld 7236 B/A ist ein zähelastischer Zweikomponenten-Konstruktionsklebstoff, der bei Raumtemperatur härtet. Er wurde für das Kleben von Metallen wie Aluminium, Stahl, einer Vielzahl von Kunststoffen und Verbundwerkstoffen wie SMC, GFK, CFK und Epoxidharz-Lamine entwickelt.

Kurze Verarbeitungszeit und schnelle Festigkeitszunahme ermöglichen die Weiterverarbeitung geklebter Teile nach 6 – 8 Stunden. Geringes Fließvermögen, hohe Scher-, Schäl- und Schlagfestigkeiten und gute Beständigkeit gegen Öle, Treibstoffe und feuchte Wärme zeichnen das Produkt aus.

Physikalische Daten

	Basis	Härter
Farbe	weiß	rot-orange
Basis	mod. Epoxidharz	mod. Polyamin
Konsistenz	thixotrop	gelartig
Viskosität bei 26°C*	800.000 – 2.000.000 mPa.s	10.000 – 25.000 mPa.s
Spez. Gewicht**	1,2 g/cm ³	1,05 g/cm ³
Festkörper**	100 %	
Mischungsverhältnis nach Volumen	100:31	
Mischungsverhältnis nach Gewicht	100:27	

* Brookfield RVF. Spindel 7,20 Upm. (Basis)

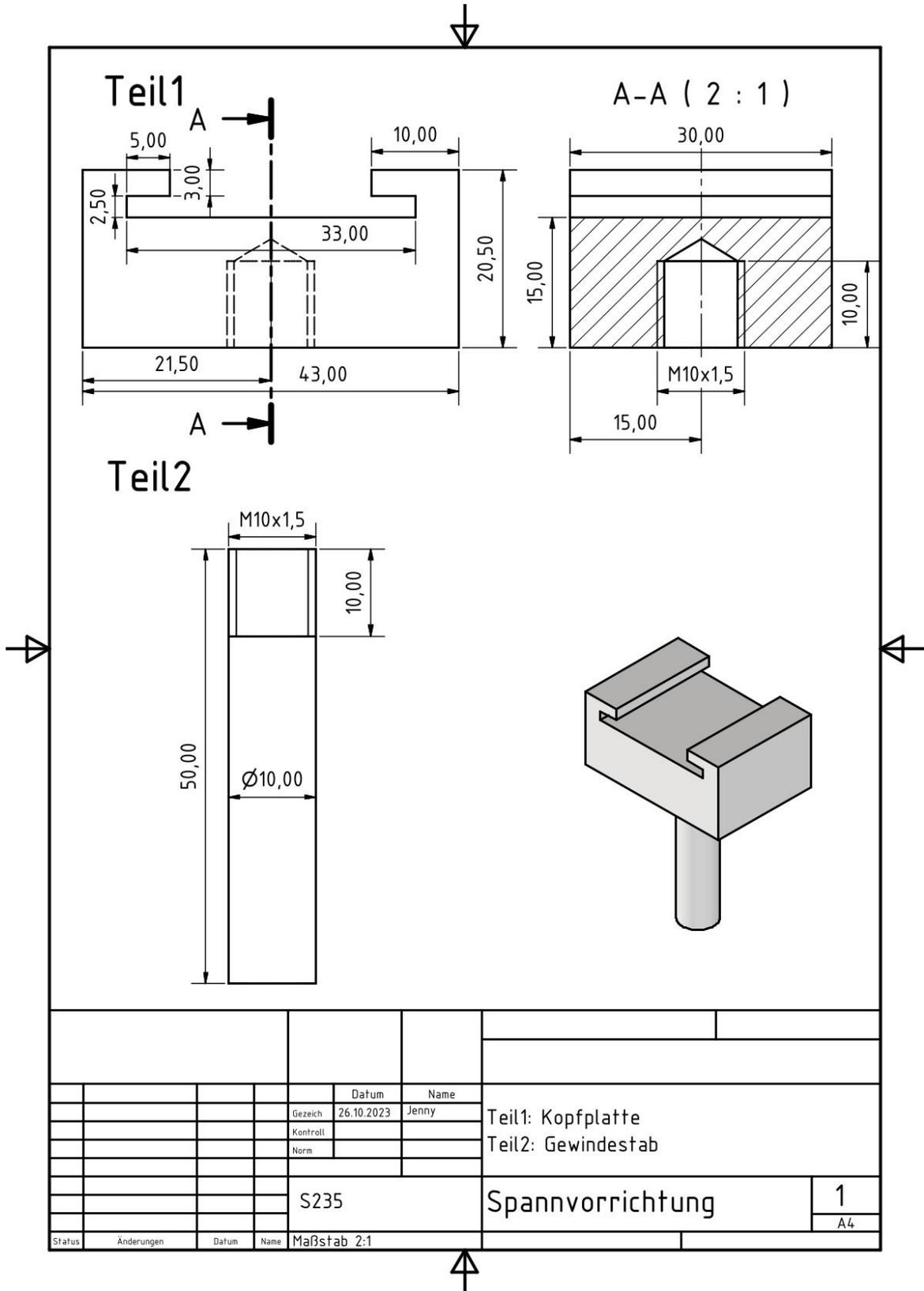
** Durchschnittswerte

Verarbeitungsmerkmale

Methode	Fließen, Spachteln
Verarbeitungszeit	ca. 45 Minuten*
Weiterverarbeitung	6 - 8 Stunden
Härtung	7 Tage bei 23°C 2 Std. bei 65°C
Fixierdruck	2 – 7 N/cm ²

* für 50 g Mischung

Anlage 11. Zeichnung Spannvorrichtung



Anlage 12. Modell der gemessenen Kräfte

WERTE

Allgemeine faktorielle Regression: F vs. Werk; Vorbe

Faktorinformationen

Faktor	Stufen	Werte
Werk	2	1; 2
Vorbe	5	1; 2; 3; 4; 5

Varianzanalyse

Quelle	DF	Seq SS	Beitrag	Kor SS	Kor MS	F-Wert	p-Wert
Modell	9	123716	81,12%	123716	13746,2	23,87	0,000
Linear	5	115254	75,57%	115254	23050,8	40,02	0,000
Werk	1	9072	5,95%	9072	9072,5	15,75	0,000
Vorbe	4	106181	69,62%	106181	26545,4	46,09	0,000
2-Faktor-Wechselwirkungen	4	8462	5,55%	8462	2115,6	3,67	0,011
Werk*Vorbe	4	8462	5,55%	8462	2115,6	3,67	0,011
Fehler	50	28796	18,88%	28796	575,9		
Gesamt	59	152513	100,00%				

Zusammenfassung des Modells

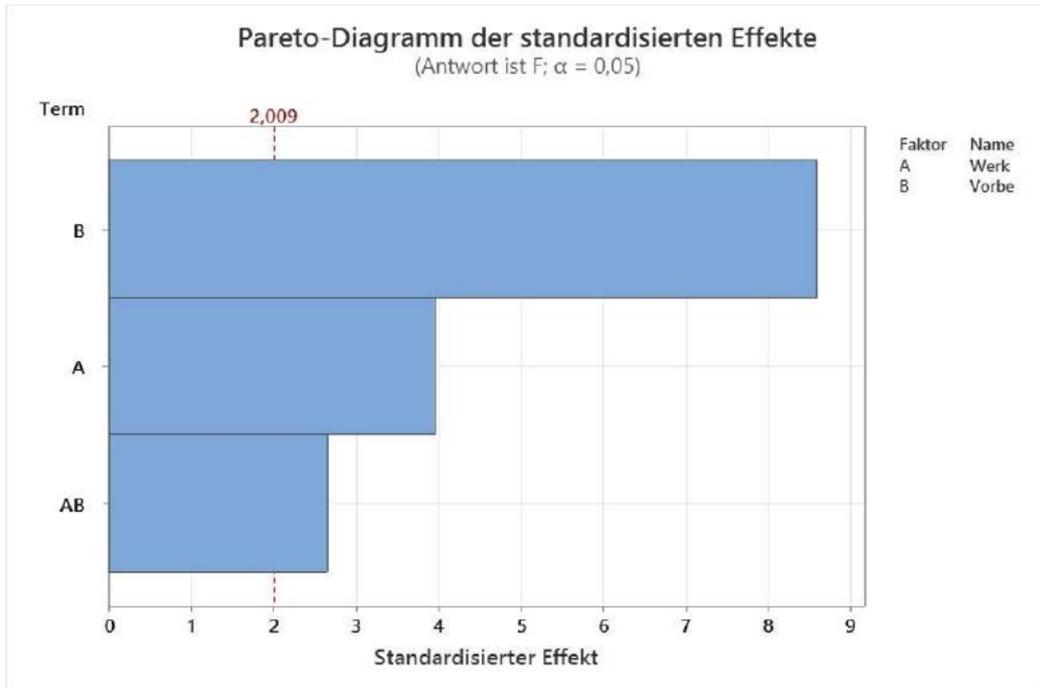
S	R-Qd	R-Qd(kor)	PRESS	R-Qd(prog)	AICc	BIC
23,9985	81,12%	77,72%	41466,8	72,81%	568,19	585,73

Koeffizienten

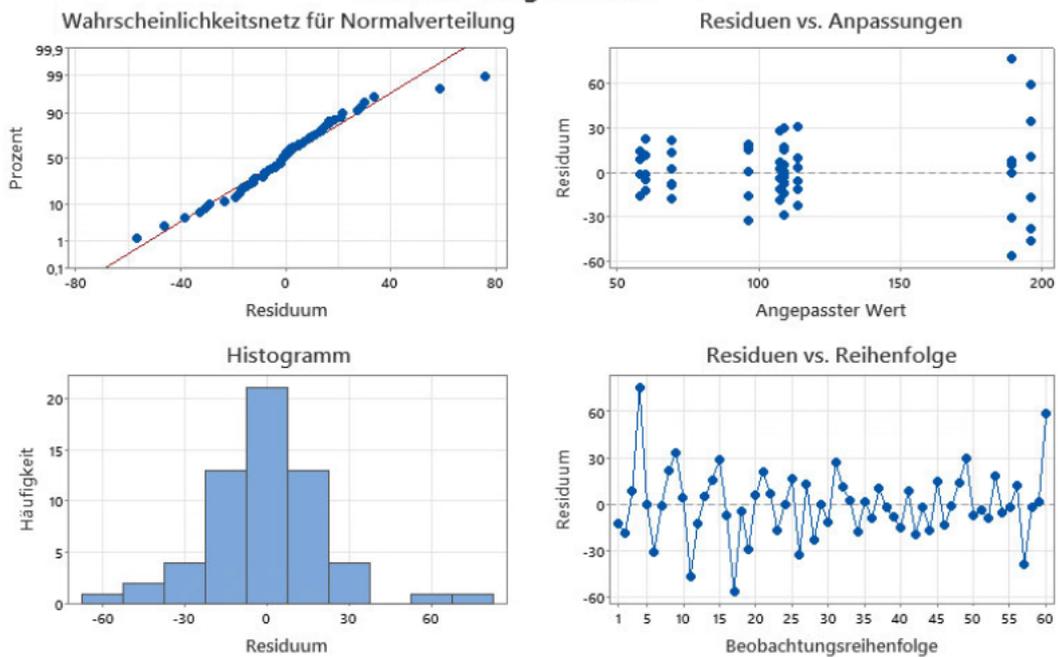
Term	Koef	SE Koef	95%-KI	t-Wert	p-Wert	VIF
Konstante	110,78	3,10	(104,56; 117,01)	35,76	0,000	
Werk						
1	12,30	3,10	(6,07; 18,52)	3,97	0,000	1,00
2	-12,30	3,10	(-18,52; -6,07)	-3,97	0,000	*
Vorbe						
1	-2,74	6,20	(-15,19; 9,70)	-0,44	0,660	1,60
2	-26,22	6,20	(-38,67; -13,78)	-4,23	0,000	1,60
3	81,65	6,20	(69,20; 94,10)	13,18	0,000	1,60
4	-19,32	6,20	(-31,76; -6,87)	-3,12	0,003	1,60
5	-33,37	6,20	(-45,81; -20,92)	-5,38	0,000	*
Werk*Vorbe						
1 1	-12,89	6,20	(-25,33; -0,44)	-2,08	0,043	1,60
1 2	12,14	6,20	(-0,30; 24,59)	1,96	0,056	1,60
1 3	-15,81	6,20	(-28,26; -3,37)	-2,55	0,014	1,60
1 4	9,77	6,20	(-2,68; 22,22)	1,58	0,121	1,60
1 5	6,79	6,20	(-5,66; 19,23)	1,10	0,279	*
2 1	12,89	6,20	(0,44; 25,33)	2,08	0,043	*
2 2	-12,14	6,20	(-24,59; 0,30)	-1,96	0,056	*
2 3	15,81	6,20	(3,37; 28,26)	2,55	0,014	*
2 4	-9,77	6,20	(-22,22; 2,68)	-1,58	0,121	*
2 5	-6,79	6,20	(-19,23; 5,66)	-1,10	0,279	*

Regressionsgleichung

$$\begin{aligned}
 F = & 110,78 + 12,30 \text{ Werk}_1 - 12,30 \text{ Werk}_2 - 2,74 \text{ Vorbe}_1 - 26,22 \text{ Vorbe}_2 + 81,65 \text{ Vorbe}_3 \\
 & - 19,32 \text{ Vorbe}_4 - 33,37 \text{ Vorbe}_5 - 12,89 \text{ Werk} * \text{Vorbe}_1_1 + 12,14 \text{ Werk} * \text{Vorbe}_1_2 \\
 & - 15,81 \text{ Werk} * \text{Vorbe}_1_3 + 9,77 \text{ Werk} * \text{Vorbe}_1_4 + 6,79 \text{ Werk} * \text{Vorbe}_1_5 + 12,89 \text{ Werk} * \text{Vorbe}_2_1 \\
 & - 12,14 \text{ Werk} * \text{Vorbe}_2_2 + 15,81 \text{ Werk} * \text{Vorbe}_2_3 - 9,77 \text{ Werk} * \text{Vorbe}_2_4 - 6,79 \text{ Werk} * \text{Vorbe}_2_5
 \end{aligned}$$

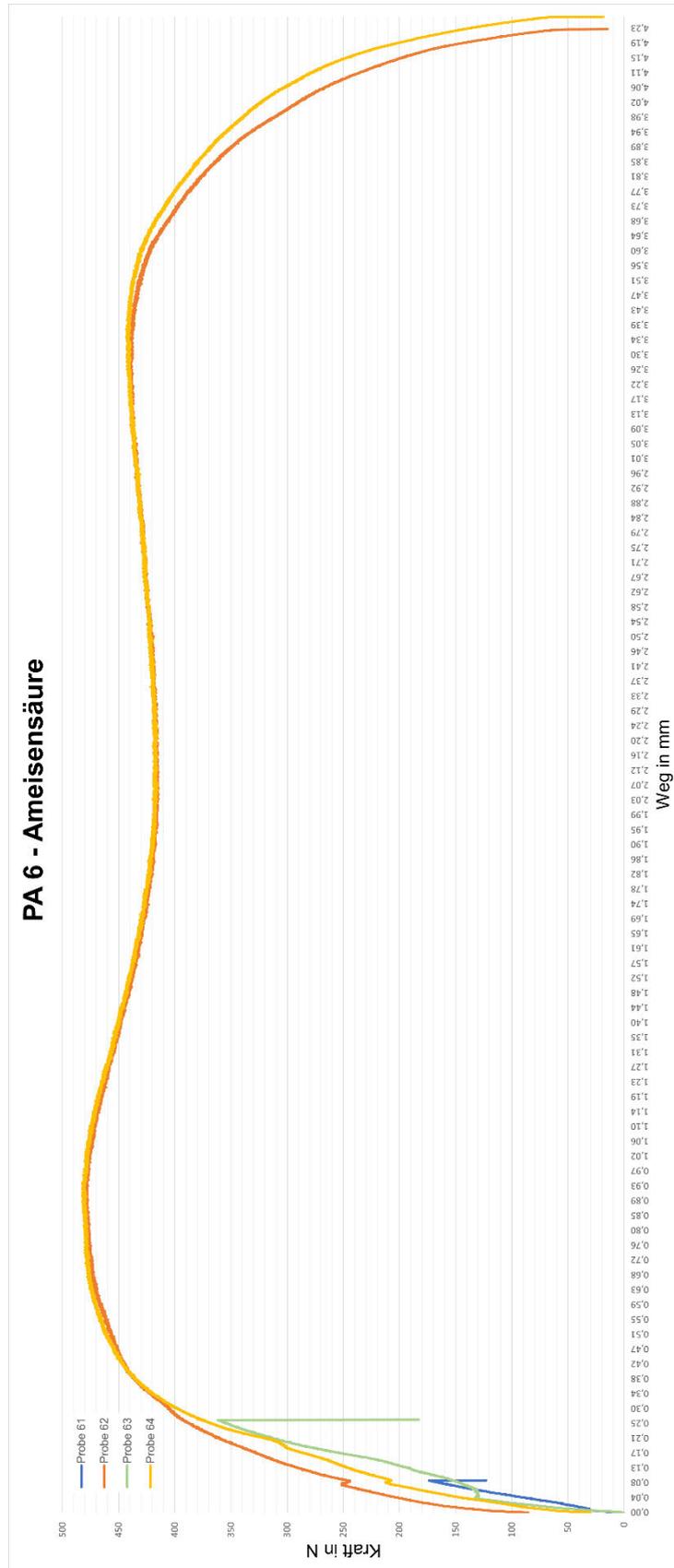


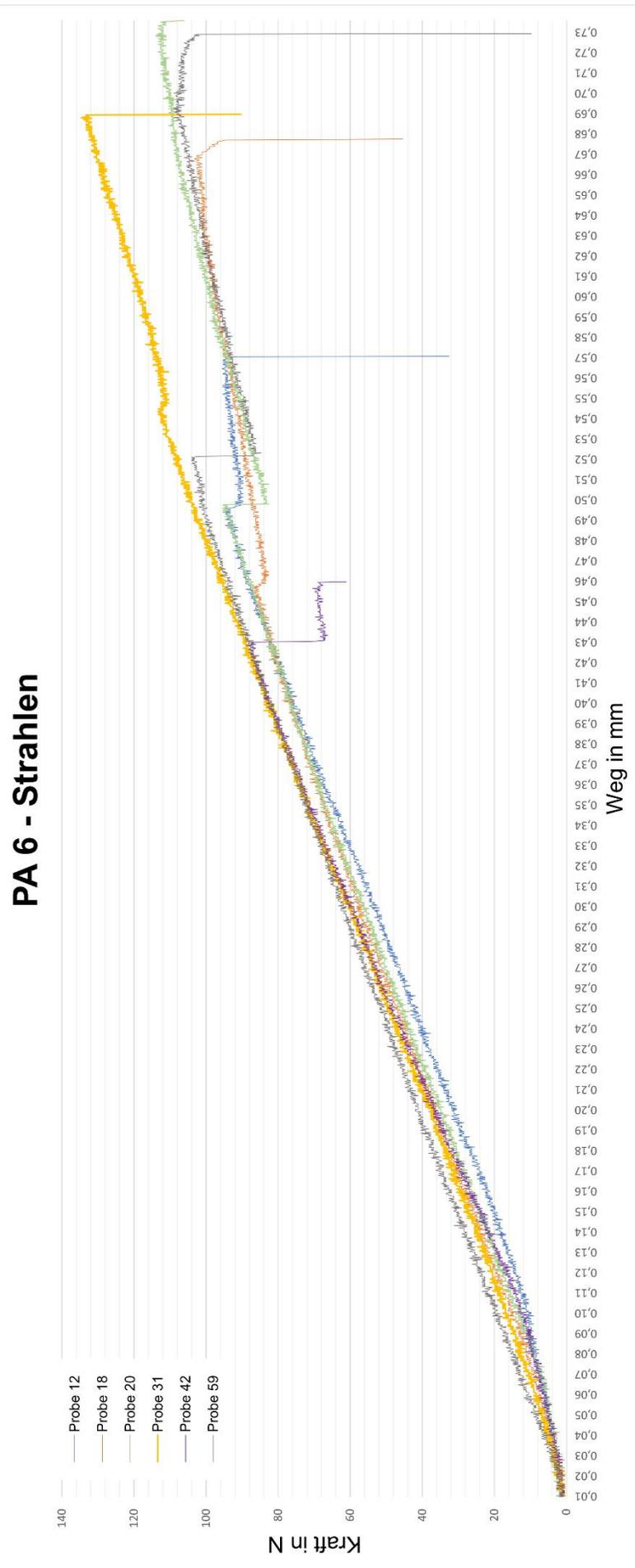
Residuendiagramme für F

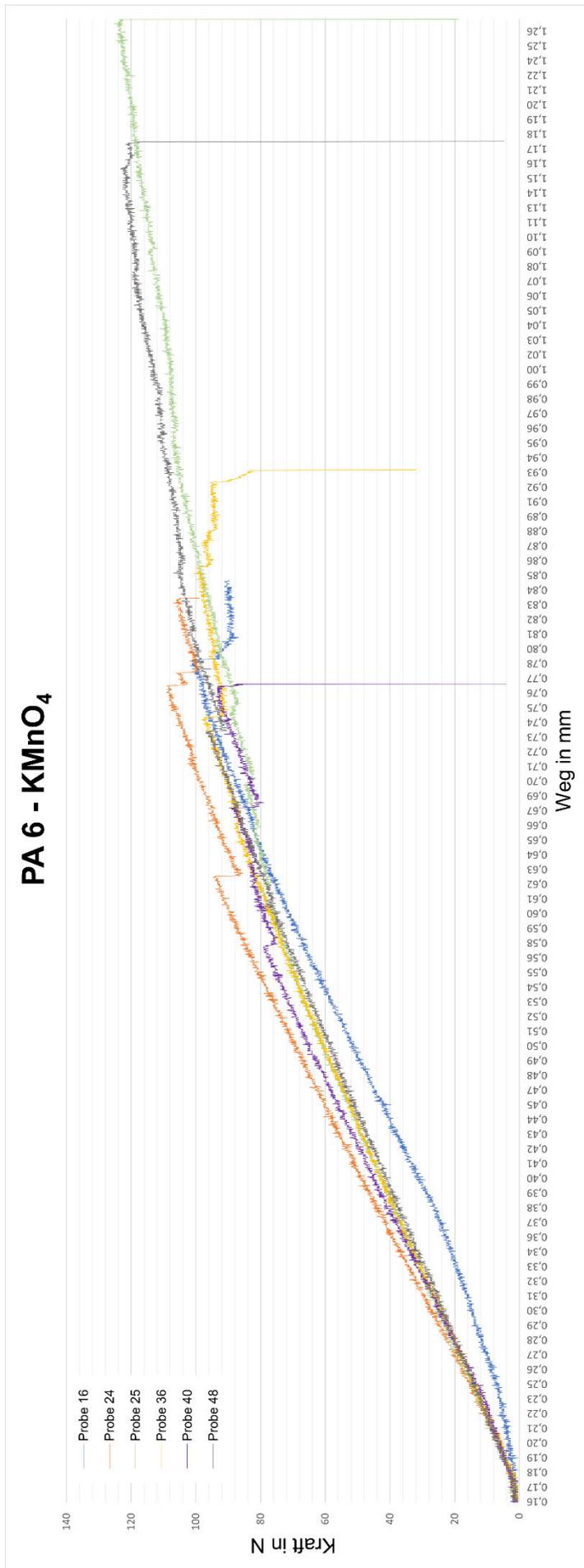


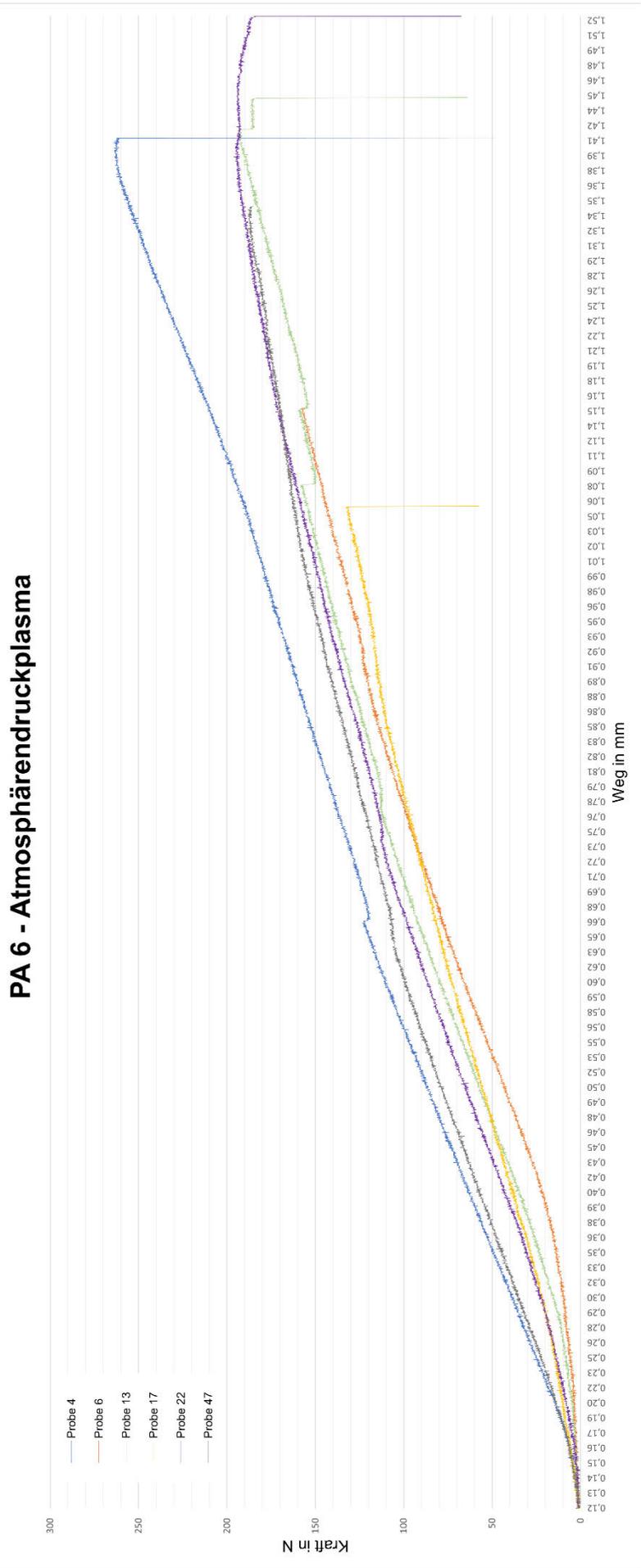
Anlage 13. Kraft-Weg-Diagramme der Stirnabzüge

Die unterschiedliche Achsenteilung der Diagramme ist zu beachten.

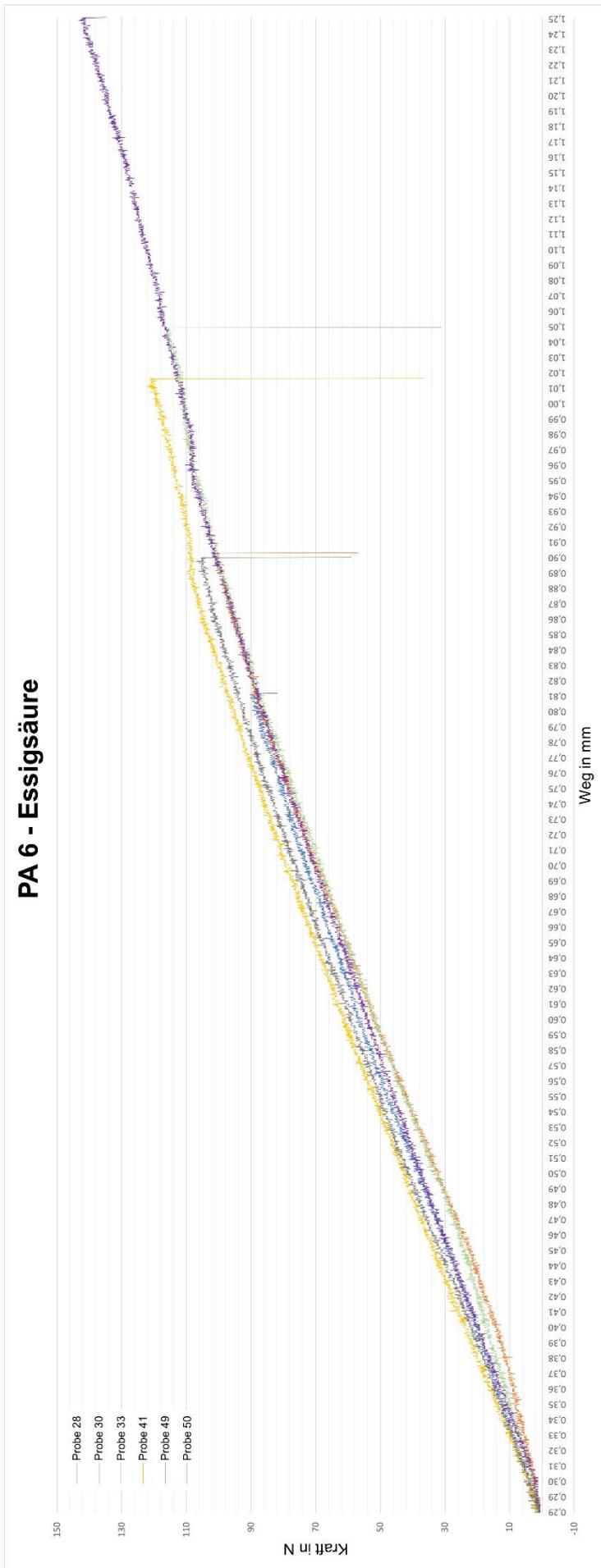




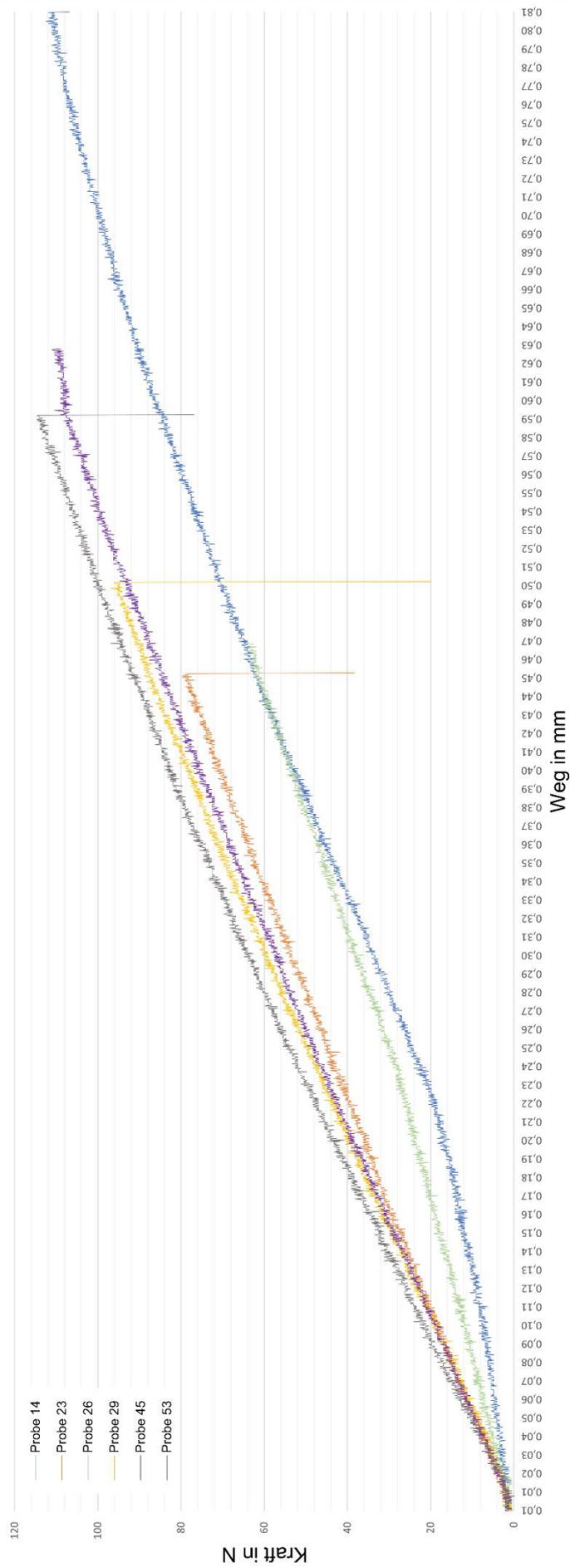


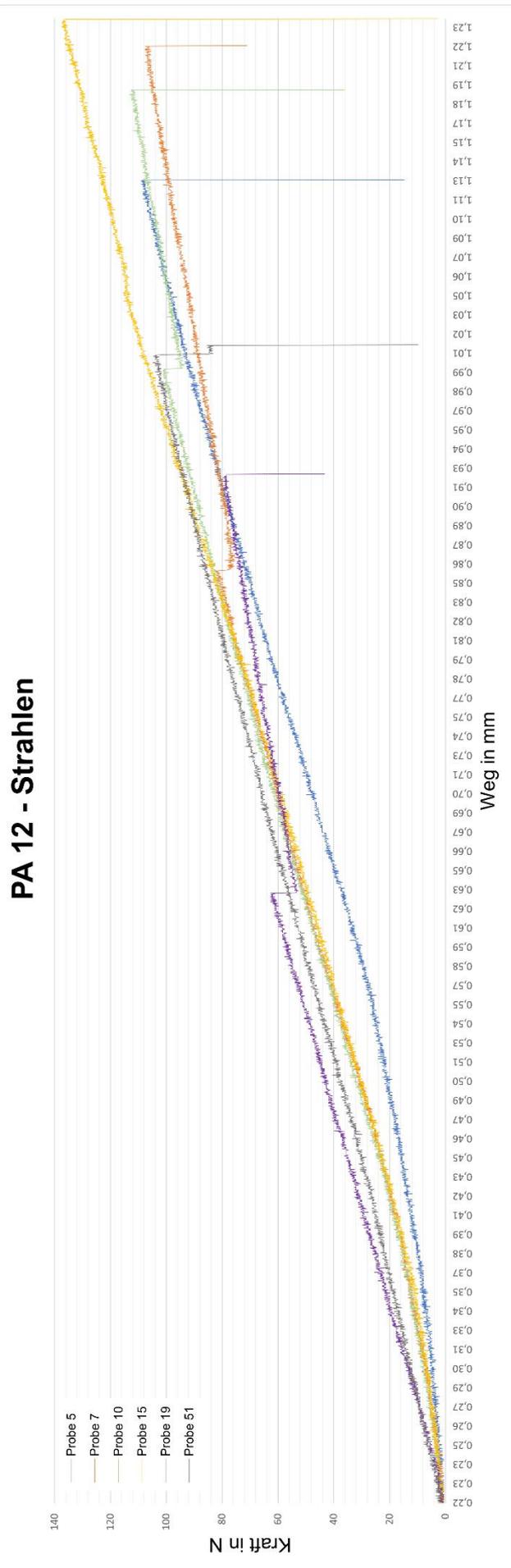


PA 6 - Essigsäure

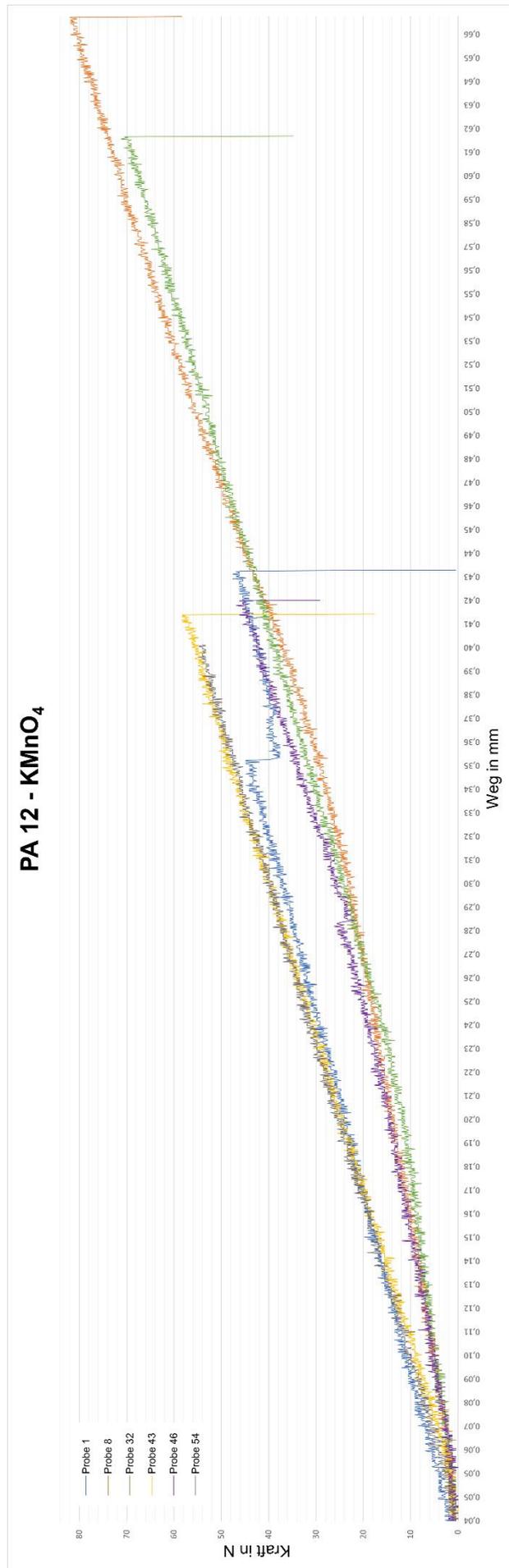


PA 6 - Oxalsäure

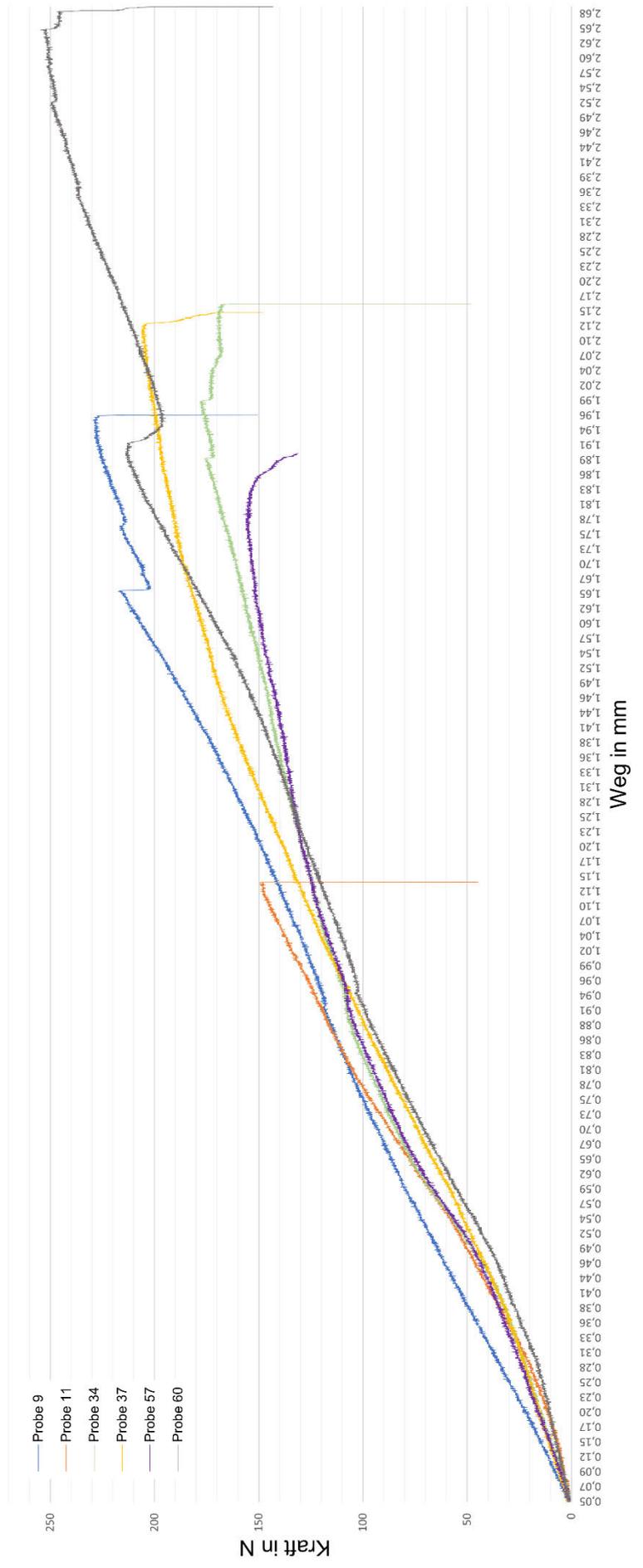




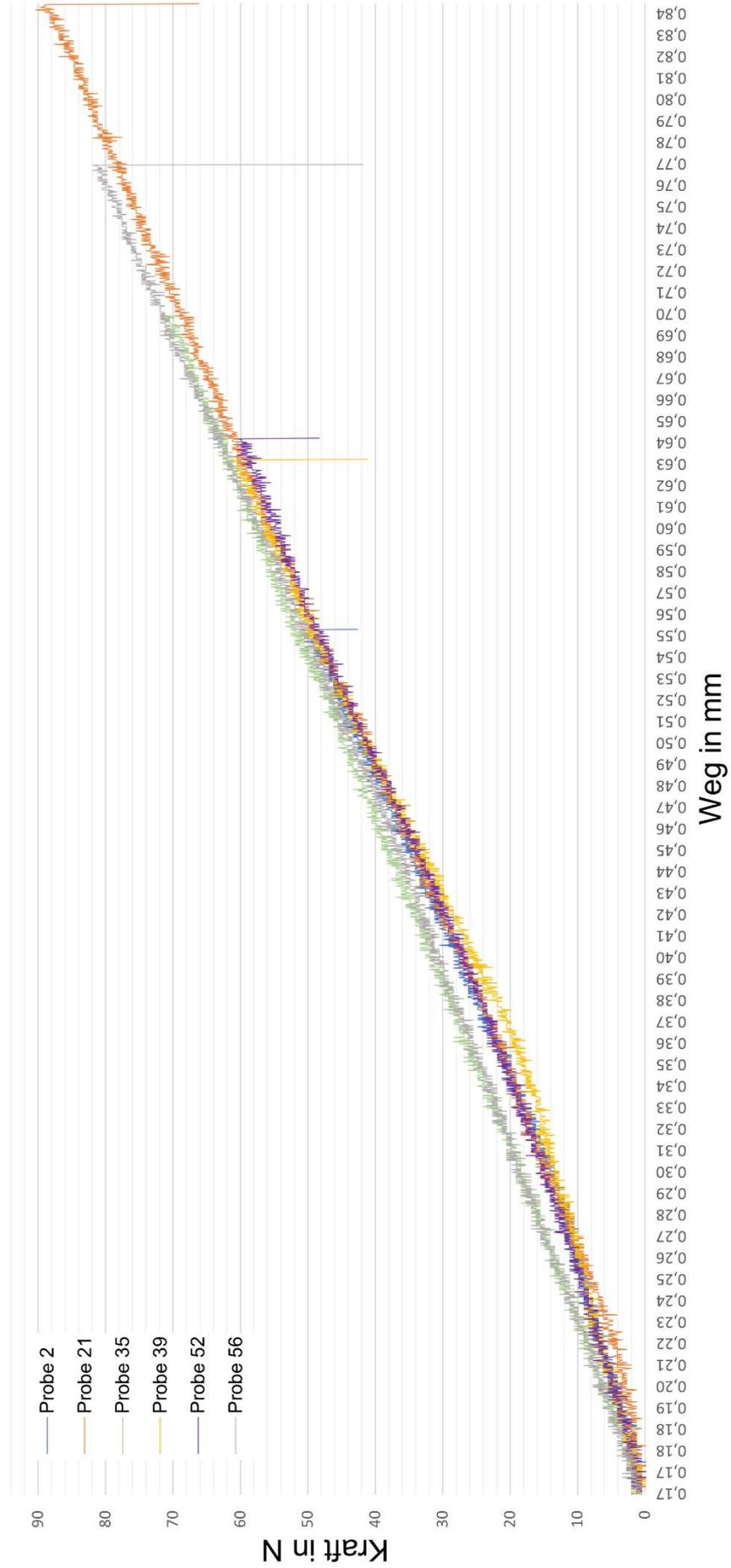
PA 12 - KMnO_4



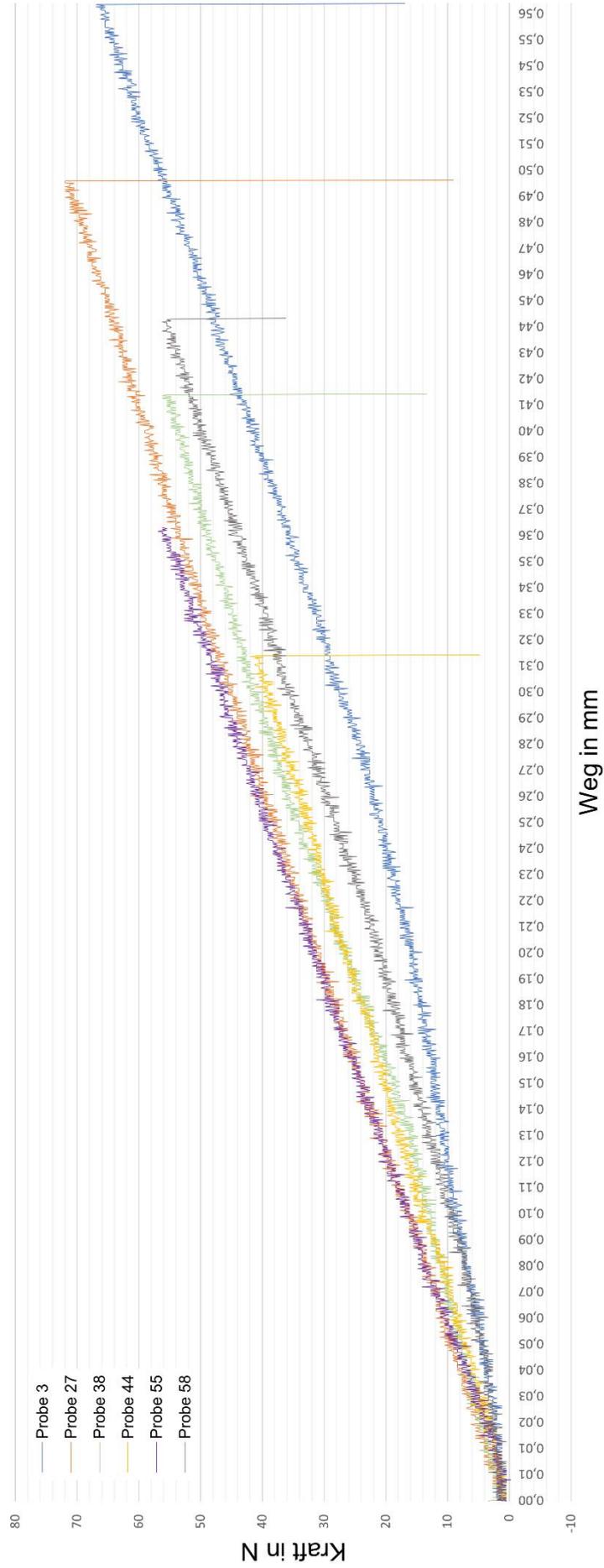
PA 12 - Atmosphärendruckplasma



PA 12 - Essigsäure



PA 12 - Oxalsäure

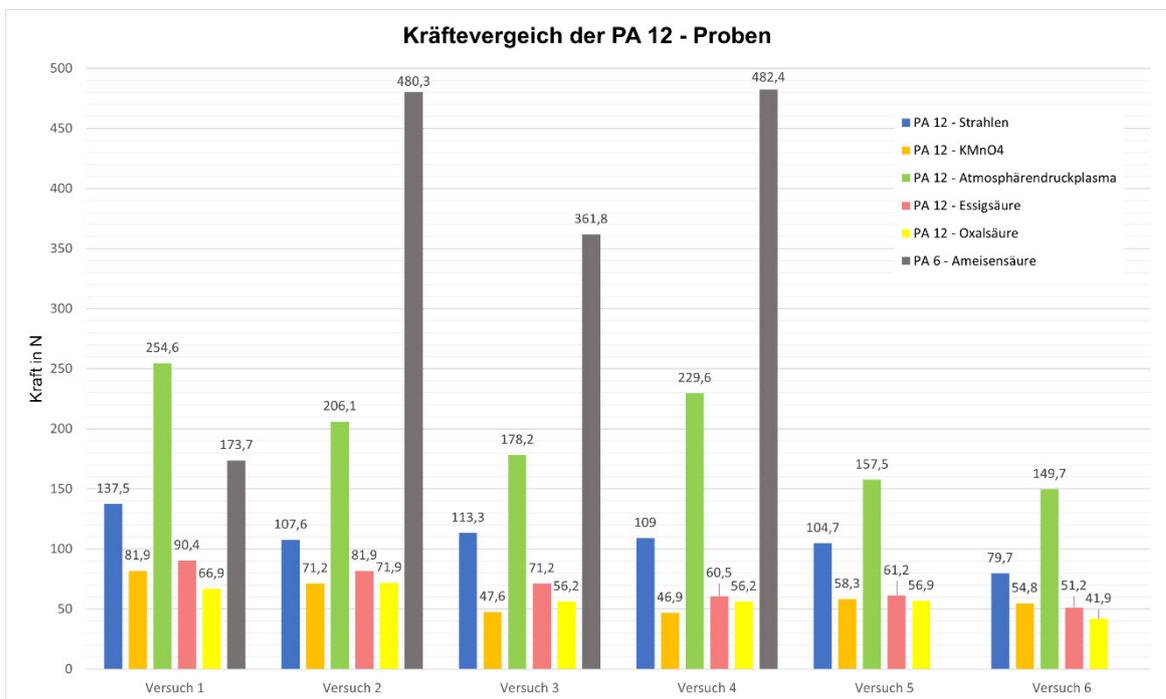
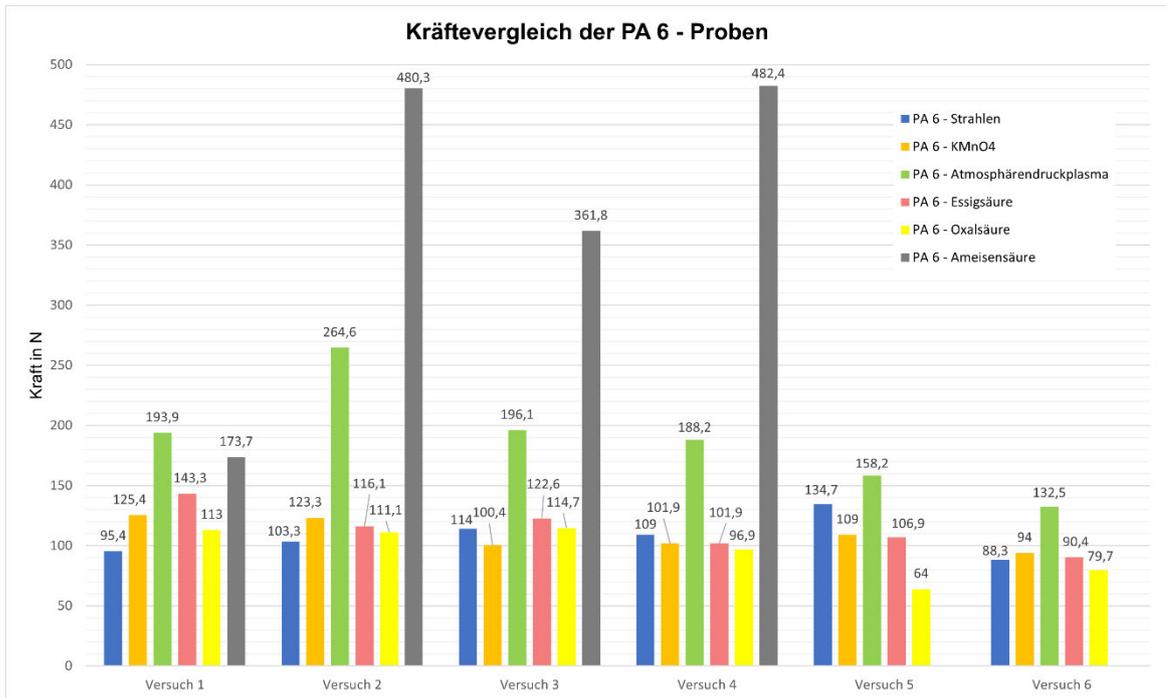


Anlage 14. Interpretationen der Kraft-Weg-Diagramme

Versuchskombination	Interpretation
PA 6 KMnO ₄	<ul style="list-style-type: none"> - Maximalkräfte liegen ungefähr zwischen 95 N und 125 N - Bei allen Proben Kraftabfälle - Anstieg aller Graphen zu Beginn ungefähr gleich groß, bis auf Probe 16; besonders bei den Proben 25 und 48 flacht der Anstieg später ab - Kein deutlicher Ausreißer erkennbar
PA 6 Atmosphärendruck-plasma	<ul style="list-style-type: none"> - Maximalkräfte liegen ungefähr zwischen 130 N und 265 N - Mitunter Kraftabfälle - Anstieg überall ungefähr gleich groß, nur parallelverschoben; Abflachung bei den Proben 22 und 47 - Probe 4 setzt ein wenig von den Anderen ab
PA 6 Essigsäure	<ul style="list-style-type: none"> - Maximalkräfte liegen ungefähr zwischen 90 N und 140 N - Kein Auftreten von Kraftabfällen - Anstieg bei allen Proben ungefähr gleich groß - Keine Ausreißer
PA 6 Oxalsäure	<ul style="list-style-type: none"> - Maximalkräfte liegen ungefähr zwischen 65 N und 115 N - Kein Auftreten von Kraftabfällen - Anstieg der Proben 14 und 26 zu Beginn flacher als der der Anderen, der Anstieg gleicht sich aber später wieder an (mit Parallelverschiebung) - Probe 14 und 26 könnten Ausreißer sein
PA 12 Strahlen	<ul style="list-style-type: none"> - Maximalkräfte liegen zwischen 80 N und 135 N - Kraftabfälle treten bei einigen Proben auf - Anstiege bei allen Proben ähnlich, bis auf Probe 5; deren Anstieg gleicht sich später an; Probe 7 und 19 flachen mit zunehmendem Weg ab - Keine Ausreißer
PA 12 KMnO ₄	<ul style="list-style-type: none"> - Maximalkräfte liegen ungefähr zwischen 45 N und 80 N - Kraftabfälle nur bei Probe 1 und 46 - Anstiege zu Beginn unterschiedlich; drei Proben weisen einen flacheren Anstieg auf, dieser gleicht sich jedoch an (mit Parallelverschiebung) - Keine Ausreißer
PA 12 Atmosphärendruck-plasma	<ul style="list-style-type: none"> - Maximalkräfte liegen ungefähr zwischen 150 N und 255 N - Kraftabfälle liegen vor - Anstiege zu Beginn ähnlich; am Ende jedoch starke Unterschiede - Überall große Abweichungen in Anstieg und Kraft

Versuchskombination	Interpretation
PA 12 Essigsäure	<ul style="list-style-type: none"> - Maximalkräfte liegen ungefähr zwischen 50 N und 90 N - Keine Kraftabfälle - Gleicher Anstieg bei allen Proben - Keine Ausreißer
PA 12 Oxalsäure	<ul style="list-style-type: none"> - Maximalkräfte liegen ungefähr zwischen 40 N und 70 N - Keine Kraftabfälle - Anstiege zu Beginn sehr unterschiedlich, gleichen sich jedoch an (mit Parallelverschiebung)

Anlage 15. Gegenüberstellung der Maximalkräfte in Balkendiagrammen



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Döbeln, den 30.01.2024

A solid black rectangular box used to redact the signature of the student.

Jenny Engelmann